



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



VÜCUDA YERLEŞTİRİLEBİLİR MANYETİK DİŞLİ TASARIMI

Hasan Aykut Aydın

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

İzmir
2019

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

VÜCUDA YERLEŞTİRİLEBİLİR MANYETİK DİŞLİ TASARIMI

Hasan Aykut AYDIN

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Aysun BALTACI

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Programı

İzmir
2019

)

Hasan Aykut AYDIN tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “Vücuda Yerleştirilebilir Manyetik Dişli Tasarımı” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 02.09.2019 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

Jüri Başkanı :Dr.Öğr. Üyesi Aysun BALTACI

Raportör Üye :Dr. Öğr. Üyesi Özgür TAMER

Üye :Dr. Öğr. Üyesi Oğuz GÜRSES

İmza



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Vücuda Yerleştirilebilir Manyetik Dişli Tasarımı” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

01 / 10 / 2019

Hasan Aykut AYDIN

ÖZET

VÜCUDA YERLEŞTİRİLEBİLİR MANYETİK DİŞLİ TASARIMI

AYDIN, Hasan Aykut

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Aysun BALTACI

Ağustos 2019, 82 sayfa

Bu tezde birçok uygulamalarda kullanılan manyetik dişli çeşitleri incelenmiştir.

Yapılan literatür taraması sonucunda medikal bir uygulamada kullanmak üzere, vücuda yerleştirilebilir bir manyetik dişlinin, sonlu elemanlar analizleri ile tasarım optimizasyonunu yapılmıştır. Optimizasyon çalışmaları ile manyetik dişli topolojisinin ve çevrim oranının, manyetik dişlinin performans kriterlerine olan etkisi incelenmiştir.

Elde edilen optimum tasarım ile manyetik dişlinin teorik altyapısını oluşturulmuştur.

Anahtar sözcükler: Manyetik dişli, Sonlu elemanlar yöntemi, taguchi optimizasyon.

ABSTRACT

IMPLANTABLE MAGNETIC GEAR DESIGN

AYDIN, Hasan Aykut

MSc in Mechanical Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Aysun BALTACI

September 2019, 82 pages

In this thesis, several magnetic gear topologies have been investigated.

As a result of the literature review, a design optimization of a implantable magnetic gear with finite element analysis was performed for use in a medical application. With the help of optimization studies, the effect of magnetic gear topology and gear ratio on the performance criteria of magnetic gear was investigated.

The theoretical design of the magnetic gear was formed with the optimum design.

Keywords: Magnetic gear, finite element method, Taguchi optimization.

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım süresince başta çalıştığım konu olmak üzere birçok konu hakkında yeni bilgiler edindim, farklı konulara yapılan farklı yaklaşımları deneyimledim ve farklı programlar kullanarak bu konuda kabiliyetimi geliştirdim. Yaptığım bu tez çalışması ile farklı fizik konuları olsa bile bir olayı genel anlamda nasıl ele alınıp basitleştirebileceğimi ve bilgiye ulaşma kabiliyetimi geliştirdiğimi düşünüyorum. Bu edindiklerimle, çalışmakta olduğum konulara farklı açılardan bakarak doğru bilgiye ulaşma konusunda daha hızlandığımı düşünüyorum.

İZMİR

01/10/2019

Hasan Aykut Aydın

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|-------|
| ŞEKİLLER DİZİNİ | XIV |
| TABLolar DİZİNİ..... | XVII |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... | XVIII |
| 1 GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1 Motivasyon | 1 |
| 1.2 Mekanik ve Manyetik Dişli Özellikleri..... | 1 |
| 1.3 Manyetik Dişli Tarihiçesi | 2 |
| 1.4 Modülatörlü Manyetik Dişliler..... | 7 |
| 2 MANYETİK DİŞLİ TASARIMI | 14 |
| 2.1 Genel Dişli Analitik İnceleme | 14 |
| 2.2 Maxwell Denklemleri..... | 21 |
| 2.3 Kuvvet ve Tork..... | 24 |
| 2.4 Genelleme..... | 25 |
| 3 SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ | 29 |
| 3.1 Çözücü Seçimi..... | 30 |
| 3.2 Kullanılan Malzeme Modellemeleri..... | 33 |
| 3.3 2 Boyut ve 3 Boyutlu Analizlerin Karşılaştırılması | 39 |
| 4 OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI..... | 44 |
| 4.1 Magnet Sayısı ve Çevrim Oranı Optimizasyonu..... | 44 |
| 4.2 Taguchi Metodu ile Boyutlandırma Optimizasyonu | 48 |
| 5 SONUÇLAR..... | 54 |

| | |
|-----------------------|----|
| KAYNAKLAR DİZİNİ..... | 56 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 61 |



ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Şekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Şekil 1.1 Nadir Toprak Mıknatıslarının Günümüze Kadar Gelişme Tarihi (Deshpande,2003). | 3 |
| Şekil 1.2 SmCo Mıknatıslarından Oluşmuş Spiral Dişli | 4 |
| Şekil 1.3 Manyetik Düz Dişli | 5 |
| Şekil 1.4 Paralel Eksenli Manyetik Dişli Topolojisi a) Düz Manyetik Dişli b) Manyetik Sonsuz Dişli..... | 5 |
| Şekil 1.5 Eksenel Eş Manyetik Dişli Topolojisi..... | 6 |
| Şekil 1.6 Konik Manyetik Dişliler | 7 |
| Şekil 1.7 Manyetik Planet Dişli Topolojisi | 7 |
| Şekil 1.8. Eş Eksenli Manyetik Dişli..... | 8 |
| Şekil 1.9 Halbach Manyetik Dişli..... | 9 |
| Şekil 1.10 İç Mıknatıs Kutupları Teğetsel Konumlandırılmış Manyetik Dişli | 9 |
| Şekil 1.11 Dış Mıknatısları Aynı Kutuplandırılmış Manyetik Dişli | 10 |
| Şekil 1.12 2018 Yılında Yapılan Çalışmaya Göre Bazı Modülatörsüz Manyetik Dişliler | 12 |
| Şekil 1.13 2018 Yılında Yapılan Çalışmaya Göre Bazı Modülatörlü Manyetik Dişliler | 12 |
| Şekil 2.1 Manyetik Düz Dişli ile Mekanik Düz Dişli Çizimi..... | 14 |
| Şekil 2.2 Basit Mekanik Dişli Topolojileri a) Düz Dişli b) İçten Mekanik Dişli..... | 14 |
| Şekil 2.3 Manyetik Dişli Topolojisi ve Tork Diyagramı..... | 16 |
| Şekil 2.4 Manyetik Dişli Çevresindeki Toplam Dış Hacim V_T | 18 |
| Şekil 2.5 Döner parçalarına Göre Eş Eksenli Manyetik Dişliler..... | 19 |

| | |
|---|----|
| Şekil 3.1. Comsol Kütüphanesinde Alınan Hallbach Manyetik Dişlisinin Topolojisi..... | 31 |
| Şekil 3.2 Zamana bağlı çözü ile kararlı parametrik çözüm sonrası iç ve dış rotor için aksenal tork değerleri..... | 32 |
| Şekil 3.3. İç Rotor Üzerindeki Aksenal Tork Dağılımının Detaylı Gösterimi | 32 |
| Şekil 3.4. Dış Rotor Üzerindeki Aksenal Tork Dağılımının Detaylı Gösterimi | 33 |
| Şekil 3.5 Malzemelerin atom ve moleküler düzeyde manyetik davranışı..... | 34 |
| Şekil 3.6 Malzemenin manyetik alan yoğunluğunun manyetik alan şiddetine göre değişiminin grafiği | 35 |
| Şekil 3.7 Modülatör Halkası İçin Tanımlanan B-H Eğrisi | 36 |
| Şekil 3.8 B-H Eğrisinde Lineer Olarak Alınan Bölüm..... | 36 |
| Şekil 3.9 Araştırma ve Geliştirme San. Tic. LTD. Şti firmasının Neodyum mıknatısları kataloğu | 37 |
| Şekil 3.10 Manyetik alan yoğunluğu kontrol edilen modülatör halkası üzerindeki noktalar ... | 37 |
| Şekil 3.11. Belirlenen modülatör noktaları üzerinde oluşan manyetik alan yoğunluğu..... | 38 |
| Şekil 3.12. Lineer ve Lineer olmayan malzeme tanımlanan modellerin aksenal tork değerleri | 38 |
| Şekil 3.13 Nd-Fe-B Mıknatısının Sıcaklığa Bağlı B-H Eğrisi | 39 |
| Şekil 3.14. Eş aksenli manyetik dişli modelleri a) 2 Boyutlu Model b) 3 Boyutlu model | 40 |
| Şekil 3.15 3 Boyutlu analiz için yapılan bir ağ modellemesi | 41 |
| Şekil 3.16 Dış rotor üzerindeki aksenal tork değeri | 42 |
| Şekil 3.17 İç rotor üzerindeki aksenal tork değeri..... | 43 |
| Şekil 4.1 Tam sayı olmayan çevrim oranlarının iç rotor üzerindeki aksenal tork değerine etkisi | 45 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.2 Tam sayı olmayan çevrim oranlarının iç rotor üzerindeki aksenal tork değerine etkisi | 45 |
| Şekil 4.3 İç rotor üzerindeki ortalama aksenal tork değişimi | 46 |
| Şekil 4.4 Dış rotor üzerindeki ortalama aksenal tork değişimi..... | 46 |
| Şekil 4.5 İç mıknatıs sayısı ve çevrim oranının aksenal tork değerine etkisi | 47 |
| Şekil 4.6 İç mıknatıs sayısı ve çevrim oranının ripplede'a etkisi | 47 |
| Şekil 4.7 Optimizasyon ile incelenecek parametreler | 48 |
| Şekil 4.8 Deney No 4 Sonucunda Bulunan Grafik..... | 50 |
| Şekil 4.9 Optimizasyon parametrelerinin ortalama iç rotor üzerindeki aksenal tork değerine etkileri..... | 51 |
| Şekil 4.10 Optimizasyon parametrelerinin ortalama dış rotor üzerindeki aksenal tork değerine etkileri..... | 51 |
| Şekil 4.11 Optimizasyon parametrelerinin ortalama iç rotor üzerindeki tork dalgacığına (ripple) etkileri..... | 52 |
| Şekil 4.12 Optimizasyon parametrelerinin ortalama dış rotor üzerindeki tork dalgacığına (ripple) etkileri..... | 52 |

TABLolar DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Tablo 1-1 Mekanik ve Manyetik Dişlilerin Karşılaştırılması..... | 10 |
| Tablo 2-1 Maxwell Denklemlerinde Kullanılan Birimler | 21 |
| Tablo 2-2 4 Ana Maxwell Denklemi | 25 |
| Tablo 3-1 Çözücü seçiminin için oluşturulmuş halbach modellerinin dizayn parametreleri ... | 31 |
| Tablo 3-2 3 ve 2 boyutlu tanımlanan manyetik dişlinin modellemesi için girilen boyutları ... | 40 |
| Tablo 3-3 Ağ yapısına ve yleman sayısına bağlı olarak çözüm süresindeki değişim | 41 |
| Tablo 3-4 Ağ yapısının rotorlar üzerindeki aksel tork değerine etkisi | 42 |
| Tablo 4-1 Taguchi optimizasyonu için oluşturulmuş sırasıyla analiz edilecek dişli parametreleri..... | 49 |
| Tablo 4-2 Yapılan analiz sonucunda bulunan değerler | 50 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

| <u>Simgeler</u> | <u>Açıklama</u> |
|--------------------|--|
| B | Manyetik akı yoğunluğu |
| H | Manyetik alan yoğunluğu |
| W | Açısal hız |
| N_1 | Diş sayısı |
| R | Yarıçap |
| T | Tork değeri |
| ρ_A | Aktif tork yoğunluğu |
| ρ_R | Sistem tork yoğunluğu |
| η | Verim |
| $P_{\text{çıkış}}$ | Çıkış mili gücü |
| $P_{\text{giriş}}$ | Giriş mili gücü |
| n_m | Modülatör demiri sayısı |
| p_h | Hızlı rotor üzerindeki mıknatıs sayısı |
| p_y | Yavaş rotor üzerindeki mıknatıs sayısı |
| G | Çevrim oranı |
| E | Elektrik alan yoğunluğu |

| | |
|------------|-------------------------|
| D | Elektrik akı yoğunluğu |
| V | Volt |
| m | metre |
| C | Columb |
| A | Amper |
| T | Tesla |
| J | Serbest akım yoğunluğu |
| ρ | Serbest yük yoğunluğu |
| M | Manyetizasyon |
| μ_0 | Manyetik geçirgenlik |
| ϵ | Elektriksel geçirgenlik |

1 GİRİŞ

1.1 Motivasyon

Bir enerji formu kullanılarak oluşturulan mekanik gücün aktarılmasını sağlayan mekanizma elemanlarına bağlantı elemanları denir. Endüstrinin sembolleştirmeyi çok sevdiği ve en yaygın olarak kullanılan bağlantı elemanlarından biri de dişlilerdir.

Dişli denildiğinde genellikle mekanik dişliler akla gelse de aslında günümüz gelişen teknolojiyle, mekanik güç manyetik enerji yardımıyla verimli bir şekilde aktarılabilir. Manyetik dişlilerin bu aktarımı mekanik dişlilerin aksine fiziksel temas kurmadan yapabilmektedirler. Fiziksel temas kurmadan güç aktarması sessiz çalışmayı ve bakım gerektirmeme gibi gelecek için umut verici özellikleri de beraberinde getirmektedir(S. Niu, S. L. Ho, and W. N. Fu, 2011).Ayrıca bu özellik, yeni kullanım alanları da sağlamaktadır.

Manyetik dişlinin temassız güç aktarma ile getirdiği yeni güç aktarma alanlarına en güzel örnek medikal alanda skolyoz tedavisinde kullanılan manyetik dişlilerdir. Skolyoz insan omurga ekseninin 3 boyutlu olarak deforme olduğu medikal durumdur. Bu durumda korse tedavisinden sonuç alınamazsa, hareketli rodlar ile omurga tedavi edilmektedir. Bu tedavide hastanın omurgasına rodlar takılır ve 6 ayda bir uzatma işlemine tabi tutulur. Bu işlem 5-10 yıl sürebilmektedir. Manyetik dişlilerin temassız olarak güç aktarabilme özelliğiyle sayesinde, rodlar tekrar cerrahi operasyona ihtiyaç duyulmadan, vücut dışından kontrol edilerek hareket ettirilebilmektedir. Bu sayede hastanın geçireceği operasyon sayısı ve buna bağlı olarak enfeksiyon riski azaltılmaktadır.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, eş eksenli manyetik dişlinin farklı boyutlarda, diş sayısında tork iletimi incelenerek farklı çalışma alanlarında kullanılmak istendiğinde karşılayacak özellikleri belirlenmek istenmiştir.

1.2 Mekanik ve Manyetik Dişli Özellikleri

Teknolojinin gelişmesi beraber mekanizma içerisinde kullanılan parçaların tolerans değerlerinin azalması, kaplama malzemelerinin gelişmesi ve yağlama malzemelerinin çeşitlenmesi gibi birçok özelliği beraberinde geliştirmiştir. Bunların sonucu olarak günümüzde yüksek verimlilik değerine sahip mekanik dişliler üretilmektedir.

Mekanik dişliler gücü fiziksel temas ile ilettikleri için yüksek verimlilik hedeflendiği zaman fiziksel temasın beraberinde getirdiği sürtünmeden kaynaklı gürültü, aşınma ve titreşim gibi sorunların da büyük ölçüde giderilmesi gerekmektedir. Fiziksel temastan kaynaklı bu sorunlar

uzun ömür istenen mekanizmalarda daha fazla üretim, montaj, yağlanma ve bakım maliyetine sebep olmaktadır.

Bu dezavantajlarından dolayı mekanik dişlilere alternatif yeni mekanizmalar üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan biri manyetik dişlilerdir. Manyetik dişliler ilk başlarda düşük verimliliği ve karmaşık yapısıyla dikkat çekmemişlerdir. Fakat neodimyum, samaryum- kobalt gibi yüksek enerjili nadir toprak mıknatıslarının bulunması ve bilgisayar destekli analizler ile karmaşık yapısının çözülebilir olmasıyla rönesansı başlamıştır(C. Liu, K. T. Chau, and Z. Zhang, 2012).

Mekanik dişlilerin çalışma prensibi, bir dişli grubunun torkunu küçük veya büyük dişliler vasıtasıyla kademeli olarak arttırma veya azaltma esasına dayanır. Manyetik dişlinin çalışma prensibi ise, bir rotor üzerinde bulunan kalıcı mıknatısların diğer rotorda bulunan ters kutupları çekmesi sonucu torkun giriş milinden çıkış miline temassız olarak aktarılması ile gerçekleşir. Mekanik dişliler birbirine geometrik bağlı iken manyetik dişliler ise birbirine kuvvet bağlı olarak çalışmaktadırlar.

Yapılan araştırmalar ile mekanik dişliler yerine kalıcı mıknatıslarla oluşturulan manyetik dişli sistemlerinin aşırı ve ani yüklenmeye karşı korunaklı olduğu da görülmüştür. Mekanik dişlilerin aksine diş değiştirmeden, sürekli manyetik alan altında tork aktarımı gerçekleştirilebilmektedir.

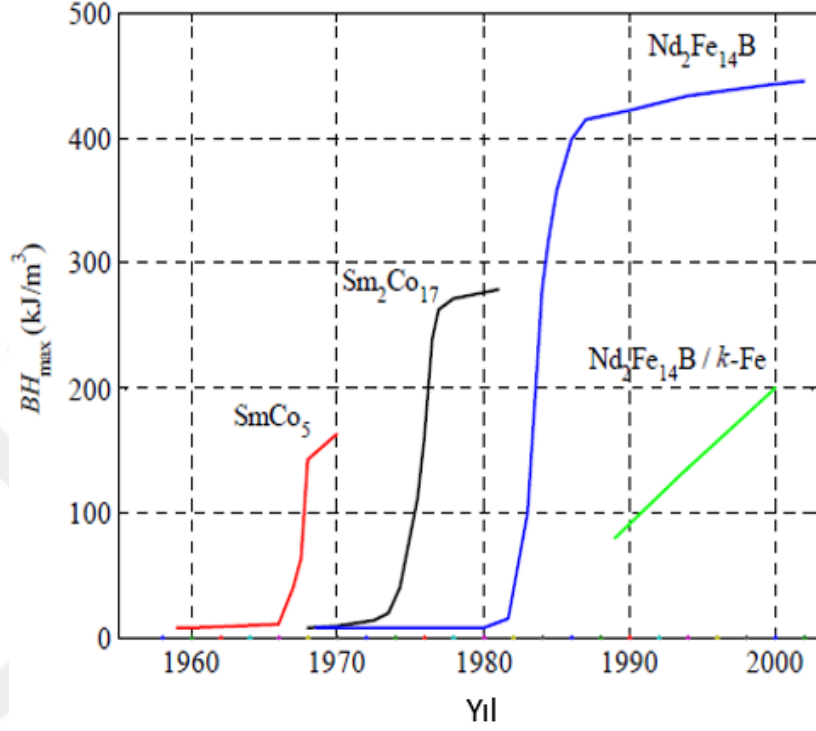
1.3 Manyetik Dişli Tarihi

Manyetik dişli ile ilgili eski bulguları 20. Yüzyılın başlarına kadar takip edilebilmektedir. 20. Yüzyılın başlarında Amerika patent manyetik dişliyi, 2 döner şafttan oluşan ve şaftları üzerinde mıknatıs bulunan olarak tanımlamıştır(S. Niu, S. L. Ho, and W. N. Fu, 2011). Tabii o zamanlarda düşük veriminden dolayı pek ilgi çekmemiştir. 1941 yılında, Faus düz dişliye benzer bir manyetik dişli tasarımı yayınlamıştır(K. Tsurumoto, and S. Kikuchi, 1987). Fakat tasarımda mıknatıs olarak düşük enerjili ferromanyetikler kullandığı için, düşük verimden bu tasarım da ilgi çekememiştir. 1941 yılından sonra uzun zaman manyetik dişli üzerine geliştirme çalışmaları yapılmamıştır.

Nadir toprak mıknatıslarının geliştirilmesi üzerine çalışmalar 1960 yıllarında Samaryum-Kobalt alaşımıyla başlatılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elektrik motorlar ve jeneratörler için uygun sonuçlar elde edilse de Kobaltın nadir bulunan bir ham malzeme olmasından dolayı çok maliyetli olmaktadır.

1982 yılında General Motors ve Sumito Special Metals'in beraber çalışmasıyla geliştirdiği Neodyum mıknatıslarının bulunması ile manyetik dişlilerin mekanik dişlilerin yerine kullanılabilirliği tartışılmaya başlanmıştır. İlk araştırmalar, mekanik dişli sistemlerinin

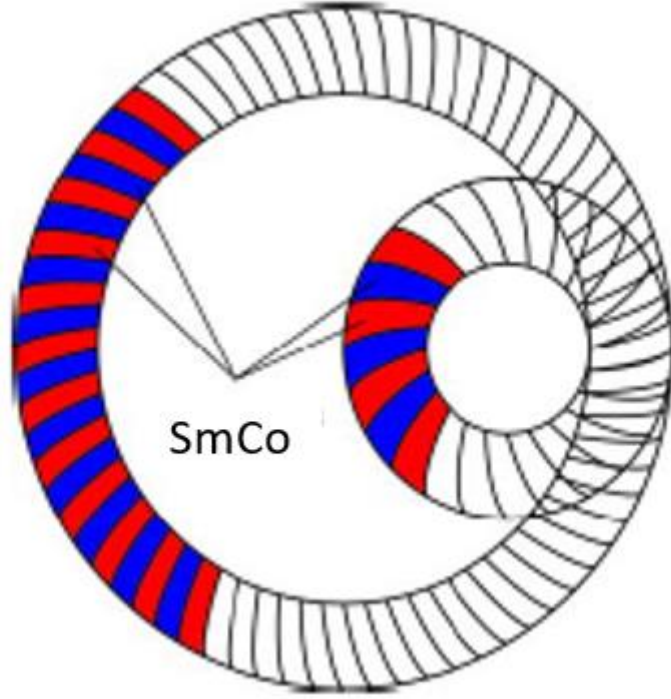
problemleri göz önüne alınarak, dişlileri arasında fiziksel temas olmadan çalışan manyetik dişli mekanizmalarının tasarım ve performans açısından fark yaratabileceği alanlar üzerine olmuştur(S. Pakdelian, N. W. Frank, and H. A. Toliyat, 2014). Nadir toprak mıknatıslarının tarihsel gelişimi şekilde gösterilmektedir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Nadir Toprak Mıknatıslarının Günümüze Kadar Gelişme Tarihi (Deshpande,2003)

Waltzer, yüksek performanslı nadir toprak mıknatıslarının bulunması ile endüstride birçok uygulamada manyetik dişlinin kullanılabilirliği üzerine çalışmalar başladığını göstermiştir (Waltzer,2002). Mıknatısların gelişmesi ve üzerine merakın artmasıyla mıknatıs malzemeleri üzerine çalışmalar da başladı (Campbell, 1994).

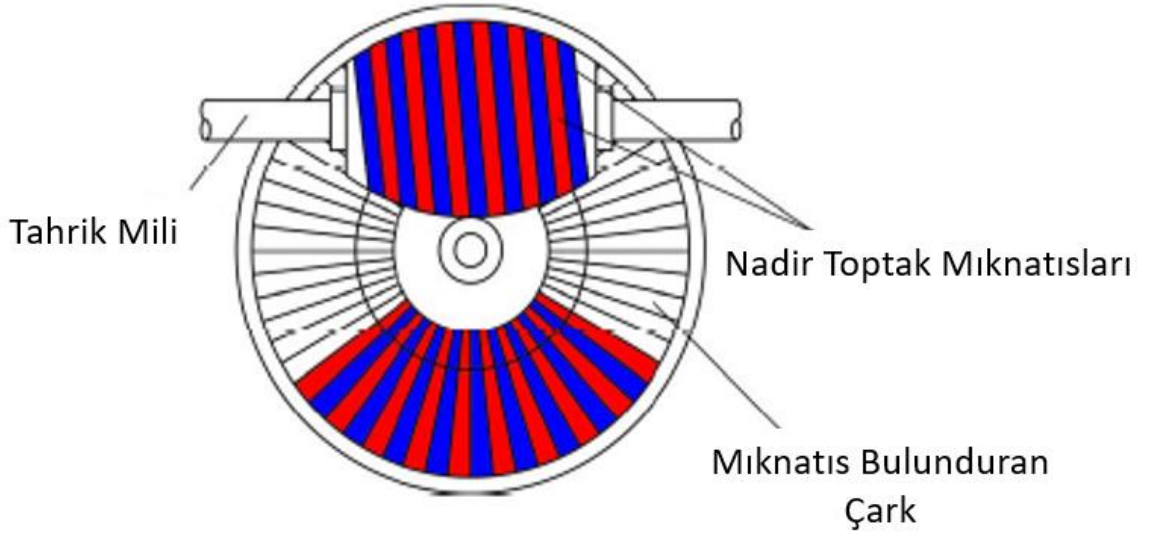
1987 yılında Japon araştırmacılar Tsurumoto ve Kikuchi Şekil 1.2 de görülen, manyetik dişli için yeni güç iletim tipini yayınlamışlardır (K. Tsurumoto, and S. Kikuchi, 1987).



Şekil 1.2 SmCo Mıknatıslarından Oluşmuş Spiral Dişli

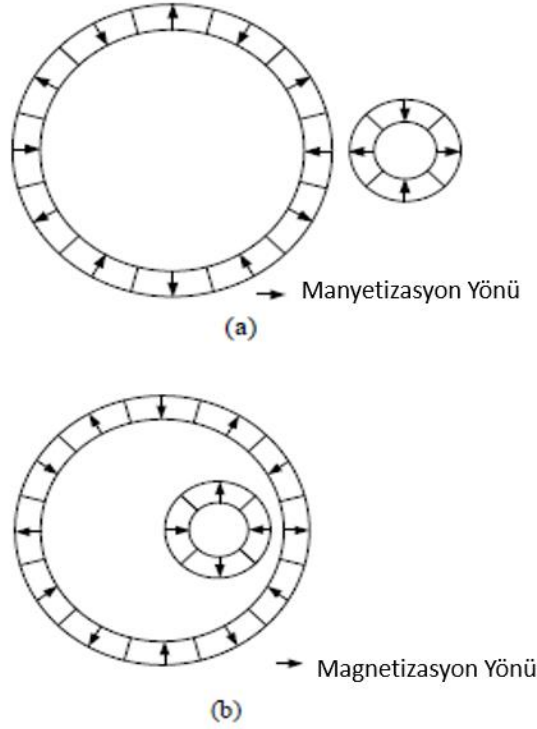
Şekildeki manyetik dişli tasarımı, geleneksel içe kıvrık mekanik dişliye çok benzerdir. Bu tarz manyetik dişlilerin bir önceki tasarımlarından farkı yüksek performanslı nadir toprak mıknatıslarını kullanmalarındadır. Bu sayede elektromanyetik performans artmakta ve elektromanyetik performansına bağlı olarak da tork yoğunluğu da artmaktadır.

1993 yılında manyetik dişli kavramı ile geleneksel sonsuz dişli konsepti birleştirilerek, yeni nadir toprak mıknatıslı sonsuz dişli geliştirilmiştir(S. Kikuchi, and K. Tsurumoto, 1993). Bu çalışmayla, Şekil 1.3 te de gösterilen sonsuz dişliye benzer tasarımdaki manyetik dişlilerin, dişliler arasındaki manyetik kuvveti kullanarak güç iletebileceğini göstermiştir. Ama manyetik dişli tasarımlarında görülen karışık ve büyük boyutluluk sorunlarına çözüm bulunamamıştır.



Şekil 1.3 Manyetik Düz Dişli

Sonsuz manyetik dişlilerdeki tasarımında görülen, karmaşık tasarım ve büyük boyut sorununu çözmek için, İkuta iki basit topoloji içeren paralel eksenli manyetik dişlileri yayınlamıştır (Şekil 1.4) (K. Ikuta, S. Makita, and S. Arimoto, 1991). İkuta tarafından yapılan bu yeni tasarımın Şekil 1.2 deki mekanik dişli ile neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Fakat bu basit topolojilerine rağmen, düşük tork yoğunluklarından dolayı endüstride kullanılmamıştır.

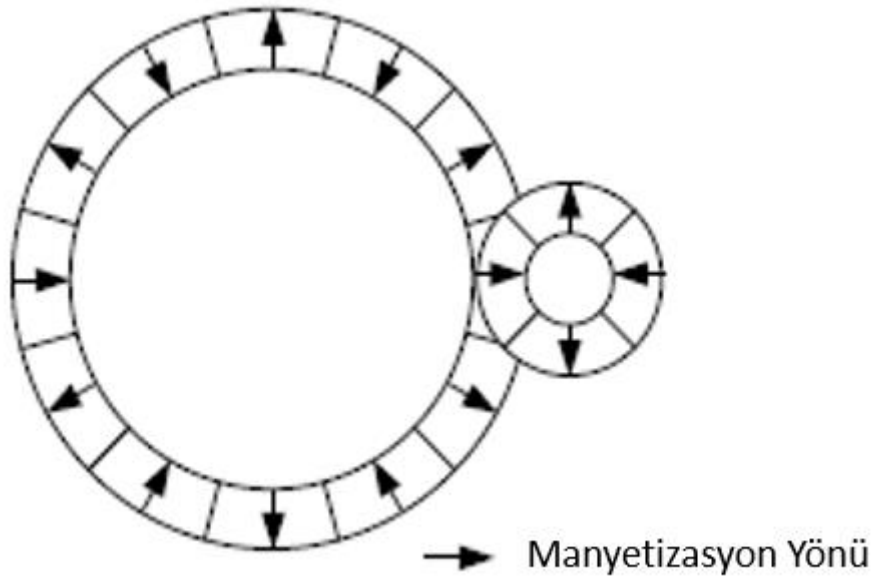


Şekil 1.4 Paralel Eksenli Manyetik Dişli Topolojisi a) Düz Manyetik Dişli b) Manyetik Sonsuz Dişli

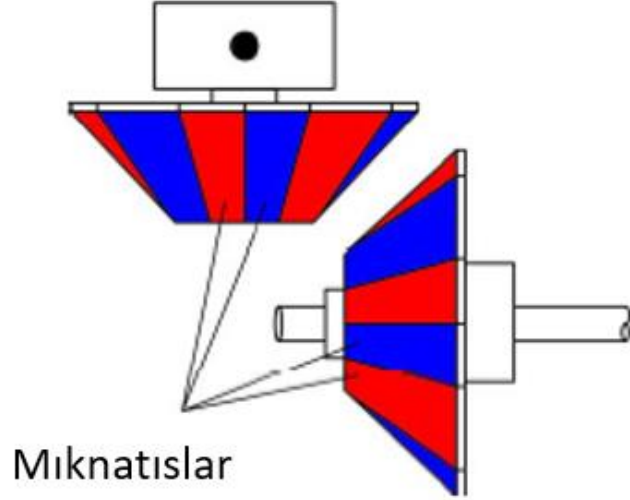
Daha ilerleyen çalışmalarda, farklı mekanik dişli topolojilerinden yola çıkarak, manyetik dişlinin tanımı genişletilmiştir. Bunlardan biri Şekil 1.5 te görülen, birbirine bir ucundan kontaklandırılmış eş manyetik dişlilerdir. Bu manyetik dişlilerin karakteristik olarak eş manyetik performansının analizi ve tartışma çalışmaları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

Manyetik dişlinin dezavantajı olan tork iletme kapasitesinin düşük olması, endüstri alanlarından üzerine düşülüp daha çok gelişmesini de engellemiştir. Ama yine yapılan çalışmalarda, mekanik konik dişliden yola çıkılarak tasarlanan manyetik konik dişli başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir Şekil 1.6. Yapılan bu çalışmada da tasarım kriterlerinden kolay üretilebilirlik ve basit çalışma prensibine rağmen tork iletim kapasitesi istenilen seviyelere çıkarılamamıştır.

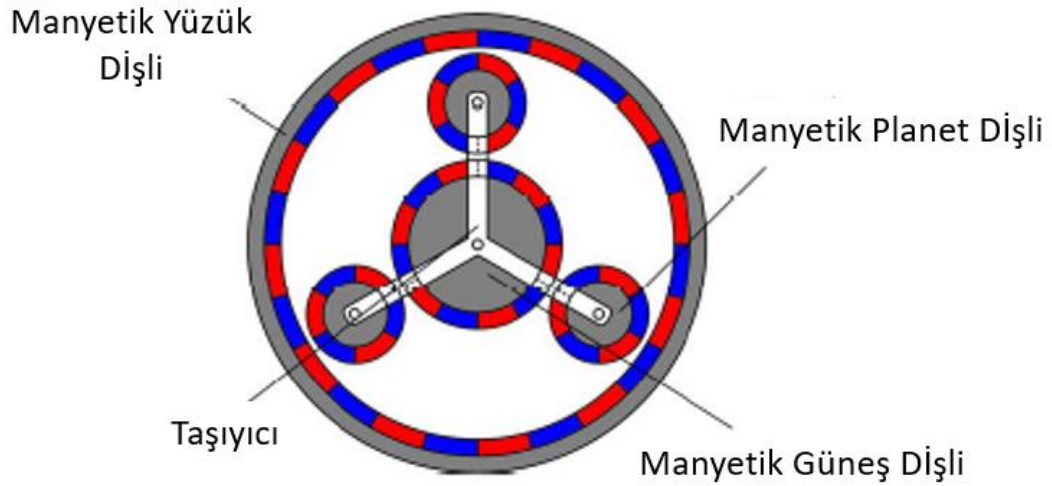
Bir başka çalışmada, mekanik planet dişli kutusu konseptiyle birleştirilmiş manyetik dişli kutusu tasarımı yayınlanmıştır. Yayınlanan manyetik dişli kutusu birleşenleri olan manyetik güneş dişlisi, taşıyıcı, manyetik halka dişlisi ve manyetik planet dişlisi Şekil 1.7 de gösterilmiştir. Manyetik planet dişlisinin tork yoğunluğunun belirlenmesinde en kritik parametre dişli kutusu manyetik kutup sayısıdır. Manyetik kutup çifti sayısının 6 olduğu uygulamada, maksimum tork yoğunluğu 100 kNm/m^3 değerlerine ulaşmaktadır. Bu değer geleneksel dişliler ile yarışabilecek bir değerdir.



Şekil 1.5 Eksenel Eş Manyetik Dişli Topolojisi



Şekil 1.6 Konik Manyetik Dişliler



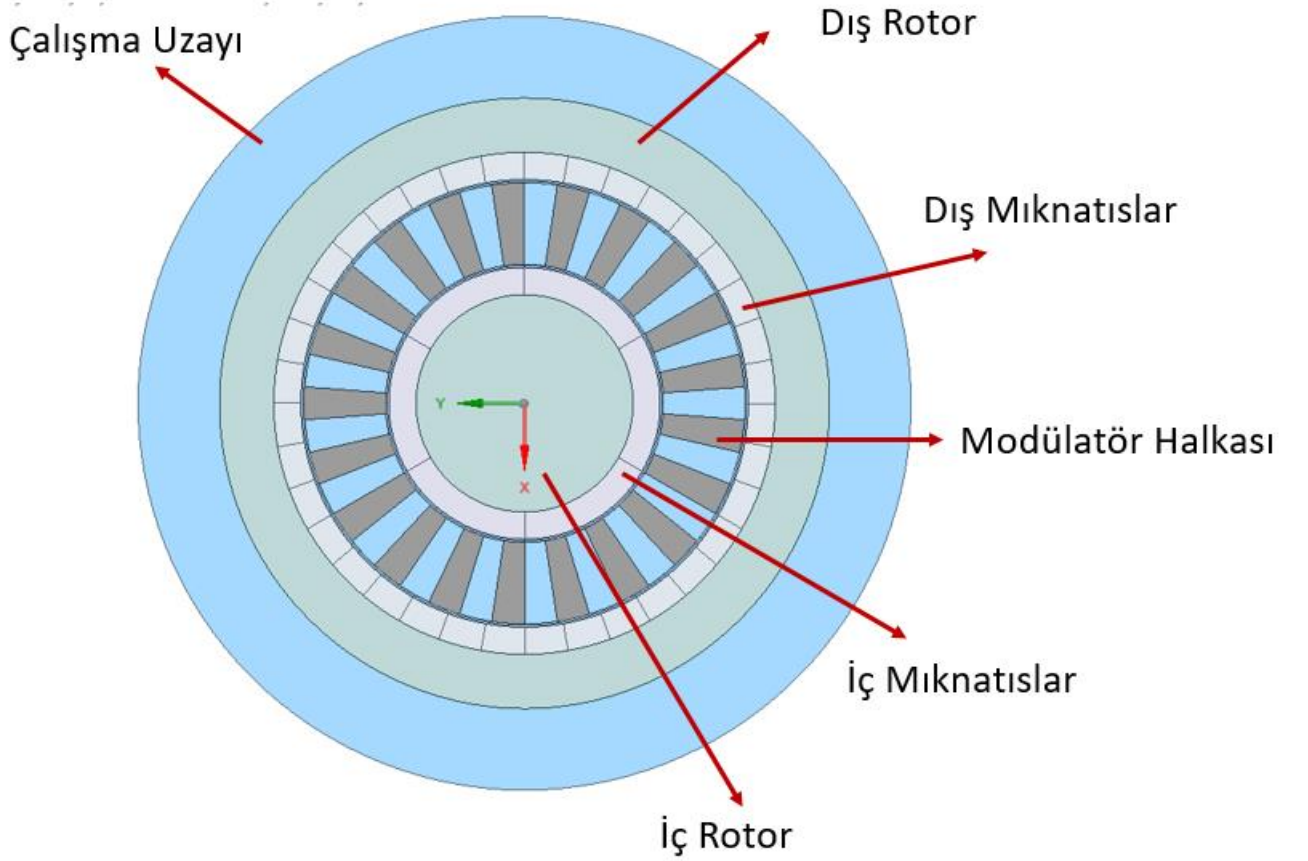
Şekil 1.7 Manyetik Planet Dişli Topolojisi

Açıkça görüldüğü gibi, bütün manyetik dişli türlerinin mekanik benzerlerinden türetilmiş, yani benzer topolojilere sahip olup sadece mekanik dişlerin yerine mıknatıs kutup çiftleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, mekanik dişlilerdeki temas ile tork aktarma istenmediği zamanlarda temassız tork aktarma mekanizması gerçekleştirilebilir. Dolayısıyla geleneksel dönüşüm türü olarak sınıflandırılabilirler. Aynı zamanda sadece sürekli mıknatıs parçalarının tork aktarımına dahil olduğu kaydedilmiştir. Bu yüzden, sürekli mıknatıs maddelerinin düşük etkili kullanımına sebep olur, dolayısıyla düşük tork yoğunluğunun büyük dezavantajına neden olur.

1.4 Modülatörlü Manyetik Dişliler

2001 yılında Attalah ve Howe mıknatısların arasında manyetik alan çizgileri için akış yolu oluşturacak ferromanyetik parçacıkların (modülatörleri) kullanarak yüksek performanslı eş

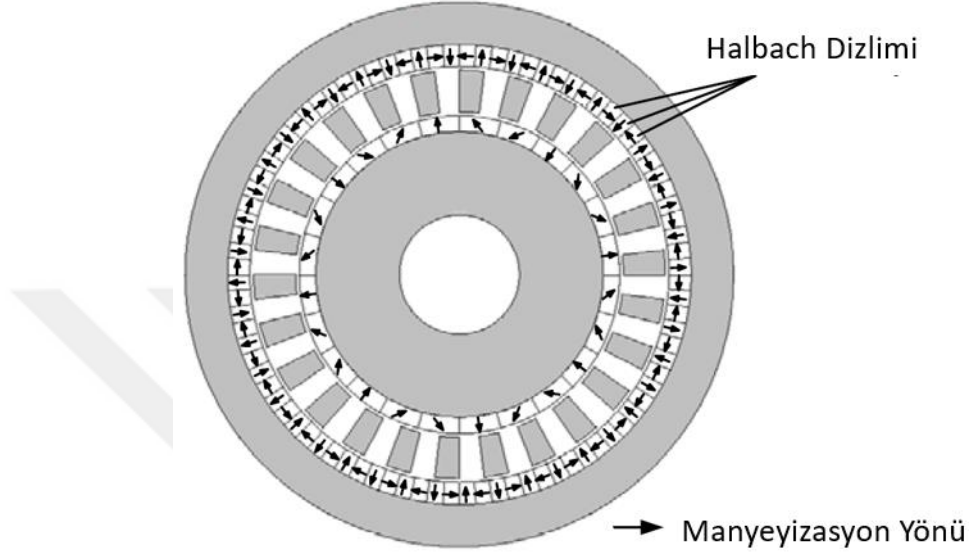
eksenli manyetik dişlilerin üretilebileceğini yayınladı (Atallah, K. & Howe, D. 2001). Şekil 1.8 de görüldüğü gibi yayımlanan manyetik dişli dış rotora gömülü mıknatıs çiftinden, ferromanyetik bir sabit halkadan ve iç rotora gömülü mıknatıs çiftlerinden oluşmaktadır. Bu tasarımda gömülü mıknatıslar arasında kalan ferromanyetik halka, mıknatıslardan üretilen manyetik alanın modüle ederek yüksek verimli tork iletimini sağlar. O zamana kadar yapılan manyetik dişli çalışmalarından farklı olarak bu tasarımda bütün manyetik kutuplar aynı zamanda tork iletimini sağlamaktadır. Bu sayede yüksek tork yoğunluklarına çıkılmaktadır. Bu tip manyetik dişlilerin tork iletimini başarılı bir şekilde gerçekleştirmesi modülatör halkası sayesinde olmaktadır. Daha sonra bu çalışmadan yola çıkarak birçok modülatörlü manyetik dişli çeşitleri görülmüştür (Rasmussen, P. O., Andersen, T. O., Jorgensen, F. T., & Nielsen, O. 2005.).



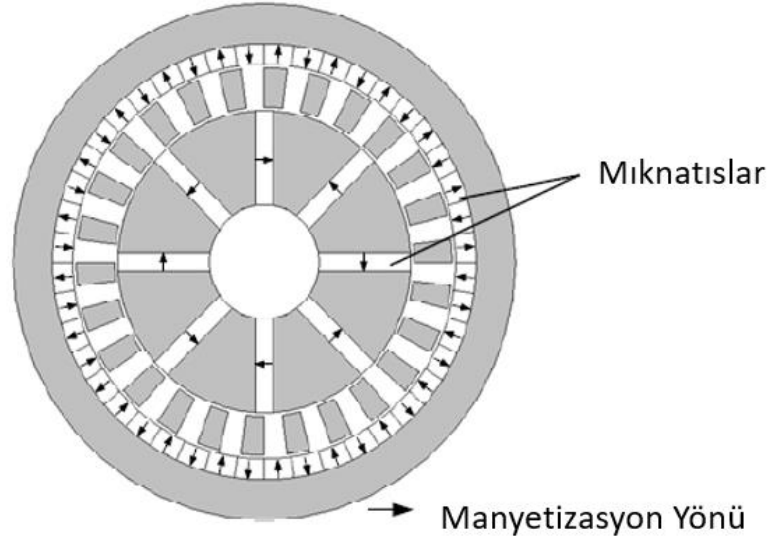
Şekil 1.8. Eş Eksenli Manyetik Dişli

Jian ve Chau hallbach Şekil 1.9 'daki gibi mıknatıs dizilimine sahip Hallbach manyetik dişlisinin tasarımını yayınladılar (L. Jian, and K. T. Chau, 2009). Mıknatıs kutuplarının hallbach diziliminde kullanılmasının sebebi rotorlar ve modülatör arasındaki her iki hava boşluğunda sinüs eğrisi şeklinde manyetik akı oluşturmaktır. Oluşturulan bu akımla manyetik akı gücü geliştirilebilir ve buna bağlı olarak tork aktarma verimi artırılabilir. Fakat bu şekilde tasarımın

karmaşılaştırılması, beraberinde montaj zorluğunu ve üretim maliyeti getirmektedir. Benzer bir topolojide mekanik güvenilirliği arttırmak için Rasmussen farklı bir magnet kutuplaması konfigürasyonu denemiştir. Şekil 1.10 da görüldüğü gibi yüksek hızlı tork etrafına kol şeklinde mıknatıslar yerleştirilmesiyle yüksek mekanik güvenilirliği sağlanmaktadır. Üstelik bu yapı akı odaklamanın avantajlarını sunmakta, dolayısıyla tork yoğunluğunu daha da arttırmaktadır.



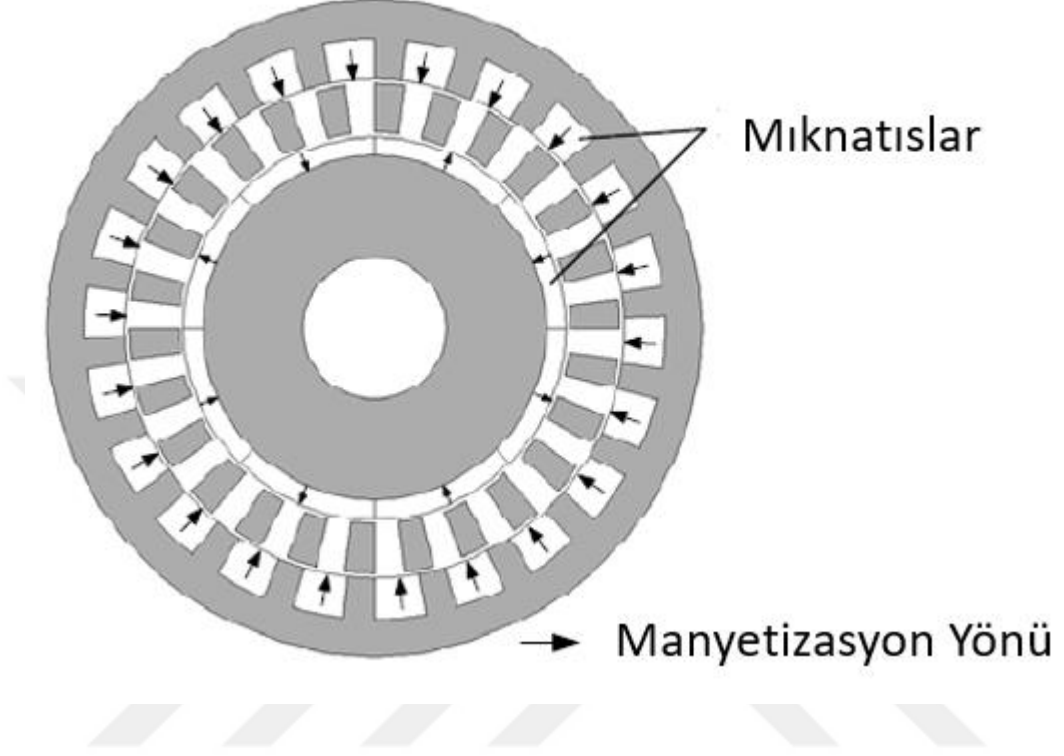
Şekil 1.9 Halbach Manyetik Dişli



Şekil 1.10 İç Mıknatıs Kutupları Teğetsel Konumlandırılmış Manyetik Dişli

Mekanik bütünlüğün daha da iyileşmesi ve magnet sayısını azaltmak için Liu ve arkadaşları yeni Şekil 1.12'deki gibi yeni bir eş kutup yönlü manyetik dişli topolojisi önermişlerdir (J. Li, K. T. Chau, and W. Li, 2011,). Aynı kutup yönlerine sahip mıknatısların rotorlara

gömülmesiyle, etraflarındaki demir yataklar ters kutup yönlerine sahip mıknatıslar gibi davranır. Böylece mekanik güvenilirlik sağlanmış ve dış rotordaki mıknatıs sayısı yarıya indirilmiştir.



Şekil 1.11 Dış Mıknatısları Aynı Kutuplandırılmış Manyetik Dişli

Bundan önce yapılan çalışmalar, çalışma prensibi, dişli oranı, tork yoğunluğu, verim ve yapısal karmaşıklığı gibi özelliklerine göre Tablo 1.1’de özetlenebilir[37].

Tablo 1-1 Mekanik ve Manyetik Dişlilerin Karşılaştırılması

| Tip | Operasyon Yöntemleri | Çevrim Oranı | Tork Yoğunluğu | Mıknatıs Kullanımı | Yapı |
|-----------------------------------|----------------------------------|--------------|----------------------------|--------------------|---------------|
| Mekanik Dişli | Dişlerin Teması İle | 1.4-230 | 100-200 kNm/m ³ | - | Basit |
| Spiral Manyetik Dişli | Manyetik Alanın Direk Bağlanması | 3:1 | 1.7 kNm/m ³ | Düşük | Karmaşık |
| Manyetik Sonsuz Dişli | | 33:1 | 0.74 kNm/m ³ | | |
| Düz Manyetik Dişli | | 3:1 | 11.6 kNm/m ³ | | |
| Manyetik Konik Dişliler | | 1:1 | 3 kNm/m ³ | | Basit |
| Manyetik Planet Dişliler | | 3:1 | 100 kNm/m ³ | | |
| Halbach Manyeti Dişli | Manyetik Alan Modülasyonu | 17:4 | 124 kNm/m ³ | Yüksek | Karmaşık |
| Eş Eksenli Manyetik Dişli | | 11:2 | 50-150 kNm/m ³ | | |
| Akı Odaklı Sikloit Manyetik Dişli | | 5.5:1 | 92 kNm/m ³ | | Hafif Karışık |
| İçten Manyetik Dişli | | 7.33:1 | 59 kNm/m ³ | | |

P. O. Rasmussen ve diğ. tarafından hazırlanan çalışma eş eksenli manyetik dişliler üzerinedir. Önceki tasarımlara paralel gitmiş olsa da iç rotor mıknatısların dış rotora göre daha dik olarak hizalanması diğer bir ifade ile spoke tipli bir tasarım oluşmasına neden olmuştur [23]. Hız oranı 1:5,5 olarak belirlenen bu çalışmada aynı zamanda mekanik dişlilerle hız oranı ve moment yoğunluğu kapasitesi eşit olmak şartıyla bir kıyaslama da yapılmıştır. Kayıplar minimize etmek koşuluyla teorik olarak % 96'ya varan bir verimlilik söz konusu olduğunu belirtmiştir.

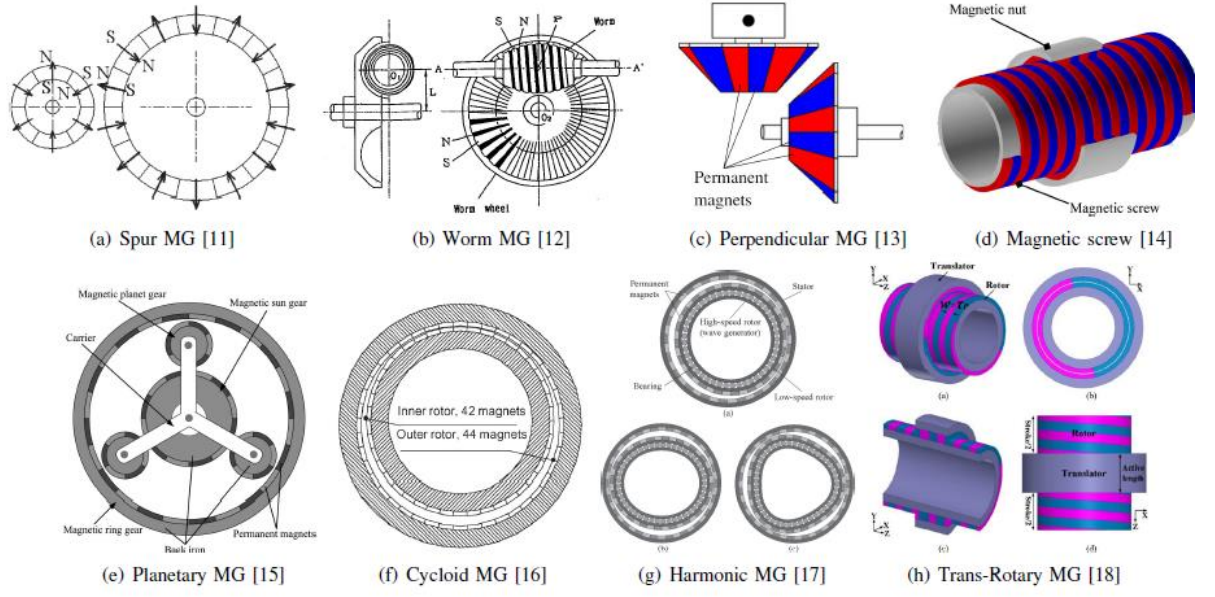
K. Atallah ve diğ. 2004 yılında yayımladığı çalışmasında, 2001 yılında yayımladığı kendi çalışmasını biraz daha ilerleterek verimlilik değerinin % 97'ye ulaştığını belirtmiş aynı zamanda % 75 oranında moment yoğunluğu artışı söz konusu olmuştur [24].

2005 yılında K. Atallah ve diğ. tarafından yayımlanan çalışma lineer manyetik dişli yapıları üzerinde yayımlanmış olup bu çalışmada yer alan lineer manyetik dişli yapıları eşeksenli (koaksiyel) manyetik dişli yapılarına yakın çalışma prensibine sahiptir [25]. İki sürekli mıknatıs çelik bir boyunduruğa bağlıdır. Düşük çevirme oranına sahip olmasına karşın lineer elektrik makinelerinde verimli çalışabileceği gözlemlenmiştir.

W. Hafla ve diğ. tarafından 2007 yılında yayımlanan çalışmasında amaç eşeksenli manyetik dişlilerin verimliliğinin artışı üzerinde bir çalışmayı ortaya koymaktır [26]. Yüksek performansa sahip makinelerde incelemek için bu analiz diferansiyel denklemler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın doğruluğunu ispatlamak doğrultusunda üç boyutlu doğrusal olmayan analize ihtiyaç duyulmuştur. Bu yayında üç boyutlu bir yapının doyum ihmal edilmeden ve aynı zamanda hava boşlukları da ilave olmak üzere kapsamlı bir matematiksel araştırma ve çalışma ortaya konulmuştur.

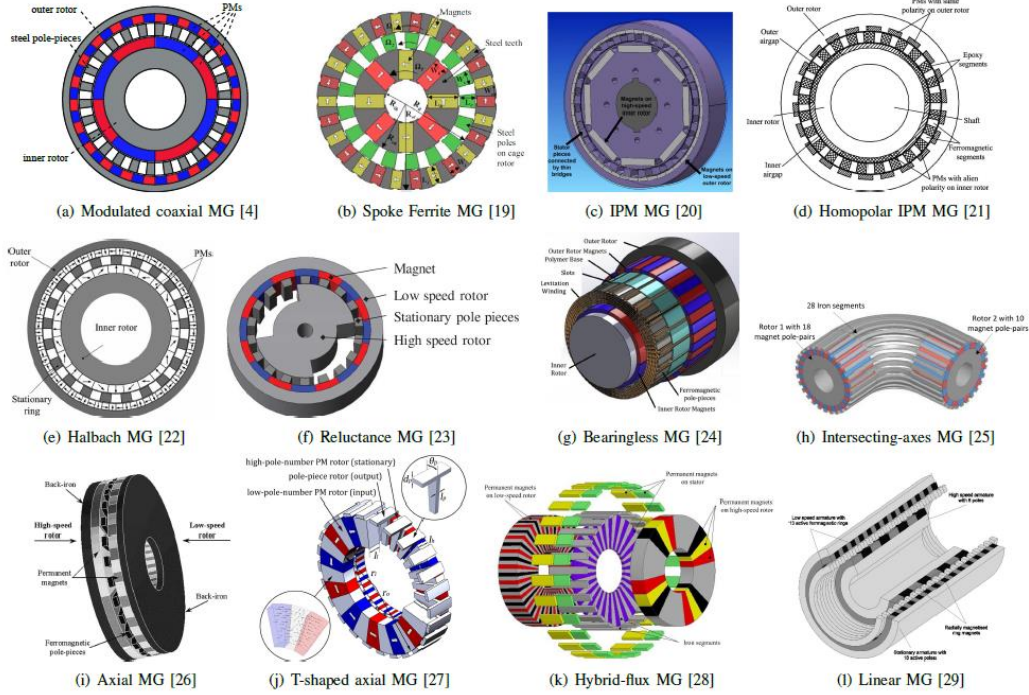
Frank ve diğ. tarafından 2009 yılında iki makale yazılmıştır. Bu iki yazıda iki farklı eş eksenli manyetik dişliler tanımlanmıştır [58,59]. İlk yazısında gemi işletmeciliğinde manyetik dişlinin kullanım alanlarını tartışırken, ikinci yazısında rüzgar gücü uygulamalarında kullanımını tartışmıştır. İki yazısında da manyetik dişli performansı, özellikle de farklı diş oranlarına göre tork değerleri açıklanmıştır.

2018 yılında yapılan çalışmada manyetik dişliler modülatörlü ve modülatörsüz olarak iki farklı şekilde kategorilendirilmiştir [2]. Bu çalışmaya göre spur, worm perpendicular magnetic screw, planetary, cycloid harmonic trans-rotary olmak üzere 8 farklı geleceksel manyetik dişli vardır (Şekil 1.13) .



Şekil 1.12 2018 Yılında Yapılan Çalışmaya Göre Bazı Modülatörsüz Manyetik Dişliler

Aynı çalışmada modülatör kullanılan manyetik dişliler; coaxial, spoke ferrite, ipm, homopolar ipm, halbach, reluctance, bearingless, intersectign-axes, axial, T-shaped axial, hybrid-flux ve linear olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 1.13 2018 Yılında Yapılan Çalışmaya Göre Bazı Modülatörlü Manyetik Dişliler

Bu zamana kadar anlatılan çalışmalar ile manyetik dişlilerin uygulama alanlarının ne kadar geniş ve genişlemekte olduğu anlaşılabilir. Manyetik dişliler genel olarak bütün mekanik dişli yapılarına uygulanabilir.

Manyetik dişli uygulamalarının bazı avantajları aşağıdaki gibidir:

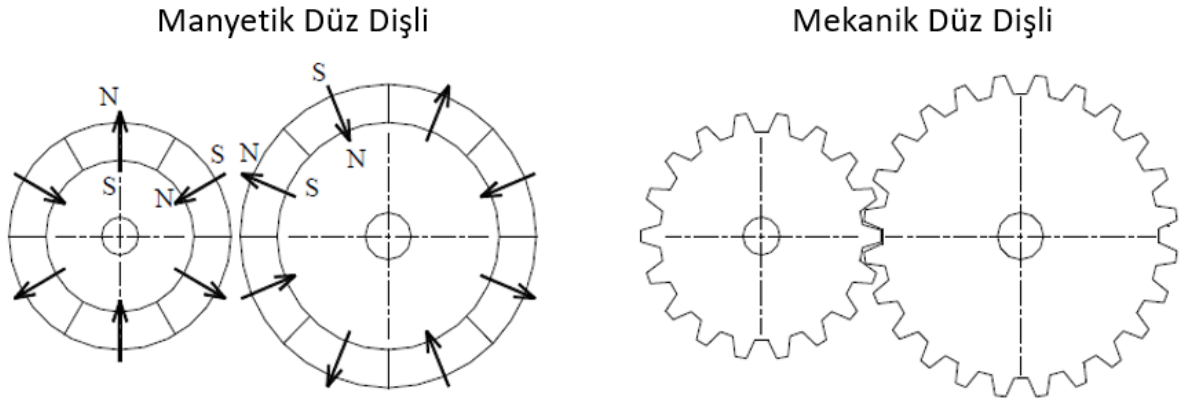
- Fiziksel bir temas olmadan güç iletimi
- Tek kademe yüksek çevrim oranları
- Kullanımında yağa gerek duyulmaması
- Yapısından dolayı aşırı yüklere karşı korumalı
- Yüksek tork yoğunluğu
- Yüksek verim potansiyeli
- Çalışmaya başladıktan sonra neredeyse hiç bakıma ihtiyaç duymamaları.

Yapılan bu araştırmanın sonucunda en fazla avantaj sağlayacak iki manyetik dişli eşitleri belirlenmiştir. Bunlar eş eksenli manyetik dişli ve harmonik manyetik dişliler. Yapılan literatür çalışmalarında da en çok bu iki dişli mekanizmaları üzerine durulduğu grlmştir. Harmonik manyetik dişliler eksentrik dönmenin ele alınması gibi daha karışık bir yapıya sahipler. Bu nedenle medikal alanda kullanılmak üzere yapılacak manyetik dişli çalışması eş eksenli manyetik dişli üzerinden devam edilmesine karar verilmiştir.

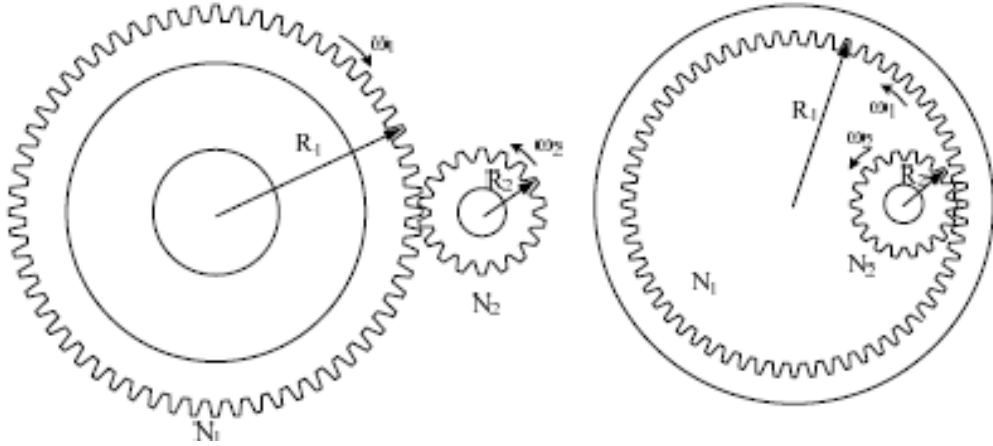
2 MANYETİK DİŞLİ TASARIMI

2.1 Genel Dişli Analitik İnceleme

Mekanik dişlilerin benzer bir şekilde manyetik dişlilerde gücü ya da hızı rotorlarında bulunan dişliler sayesinde iletir. Farkı manyetik dişlinin dişleri mıknatıslardan oluşmaktadır. İkisinde de tork ya da hız iletim oranı iç rotor ve dış rotordaki dişlerin sayısına bağlıdır. İki dişlinin çeşitlerine bakıldığında benzerlikleri zaten anlaşılmaktadır (Şekil 2.1 - 2.2).



Şekil 2.1 Manyetik Düz Dişli ile Mekanik Düz Dişli Çizimi



Şekil 2.2 Basit Mekanik Dişli Topolojileri a) Düz Dişli b) İçten Mekanik Dişli

Farklı topolojilere sahip her mekanik dişlinin kendi hareket denklemi vardır. Şekil 2.1' de verilen mekanik düz dişlinin hareket denklemi aşağıdaki gibidir:

$$w_1 = -\frac{N_1}{N_2} w_2 = -\frac{R_2}{R_1} w_2 \quad (1)$$

$$w_1 T_1 = w_2 T_2 \quad (2)$$

Denklemden w_1 ve w_2 rotorların açısal hızını ifade eder; N_1 ve N_2 rotorlar üzerindeki diş sayısını ifade eder; R_1 ve R_2 rotorların yarıçaplarını ifade eder, T_1 ve T_2 rotorlar üzerinde oluşan tork değerini ifade eder. İlk denklemden de anlaşılacağı gibi iki dişli rotoru birbirinin tersi yönünde dönmektedir. İkinci denkleme, rotorlar arasında güç iletimini vermektedir.

Şekil 2.1 (b) de gösterilen içten kontaklı manyetik dişlilerin analitik hesabı da aşağıdaki gibidir:

$$w_1 = -\frac{N_2}{N_1} w_2 = -\frac{R_2}{R_1} w_2 \quad (3)$$

$$w_1 = -\frac{N_2}{N_1} w_2 = -\frac{R_2}{R_1} w_2 \quad (4)$$

$$w_1 T_1 = w_2 T_2 \quad (5)$$

Şekil 2.1(b) den ve denklemden görüleceği üzere, içten kontaklı dişliler rotorlar aynı yönde dönmektedir.

Mekanik dişlilerin günlük ve endüstriyel hayatımızda önemli bir yeri olmasına rağmen, kendi çalışma prensiplerinden dolayı çözülemez problemleri vardır. Bunlardan birincisi, mekanik dişlilerde tork iletimi sadece hareket eden rotor dişlilerinin birbirine temas eden yüzeylerinde olur. Bu kontak iletimi birçok negatif özellikleri beraberinde getirmektedir, bunlara örnek olarak ses, sürtünmeden kaynaklı kayıplar ve mekanik titreşimler verilebilir. Bu negatif özelliklerin çözümü için dişliler düzenli olarak yağlanmaya ve bakıma ihtiyaç duyarlar. Bu çözümlerde maliyetini arttırmakta ve mekanik güvenliğini azaltmaktadır. Örneğin, rüzgar enerjisi sistemlerinde en çok karşılaşılan problem mekanik dişli mekanizmasının bozulmasıdır. Bozulmayı önlemek için bakım çalışmaları yapılsa da rüzgar türbinlerinin dişli kutuları yerden yüksektedir, bu yüzden yüksekte çalışma koşullarını gerektirmektedir. Bu gerekliliklere örnek olarak çalışma zorluğu, güvenlik riski ve kalifiyeli çalışan bulunması verilebilir.

Bu zorluklar araştırmacıları temassız güç iletim elemanlarını araştırmaya itmiştir. Sonuç olarak manyetik dişliler bulunmuştur.

Geleneksel mekanik dişliler çelik dişlerini kullanarak tork transfer ederler. Rotor üzerindeki dişler birbirleriyle temas eder ve temas eden bu yüzeylerde aşınma meydana gelmektedir. Manyetik dişlilerde fiziksel bir temas olmadığı için benzer bir aşınma görülmez. Manyetik dişlilerde tork rotolar üzerindeki mıknatıslar sayesinde, iki rotor arasında aktarılır.

$$R_{\zeta} = \frac{N_{kutupsys2}}{N_{kutupsys1}} \quad (6)$$

Manyetik dişli sistemlerinde çevrim oranı R_{ζ} genelde 1 den büyük değerler alır bu da yüksek hızlı şaftın giriş şaftı ve düşük hızlı şaftın çıkış şaftı olduğu anlamına gelir. Mekanik dişliler ve manyetik dişliler arasında aynı çevrim oranı formül vardır. Sadece birisinde dişler sayılırken diğerinde mıknatıs kutupları sayılır.

Elektrik makineleri literatüründe tork yoğunluğu performans kriteri olarak tanımlanır. Tork yoğunluğu birim rotor hacmine karşılık gelen tork miktarını ya da birim sistem hacmine karşılık gelen tork miktarı olarak ifade edilir. Elektrik makineleri literatüründe kullanılan bu ifade manyetik dişliler içinde kullanılmaktadır. Üzerinde mıknatıs bulunduran dişliler belirli bir miktar rotor hacmine de sahiptirler ve bu hacmin transfer edilen maksimum torkla kıyaslanması aktif tork yoğunluğu olarak tanımlanır (7).

$$\rho_A = \frac{T_{mak}}{V_A} \quad (7)$$

Aktif tork yoğunluğu ρ_A farklı manyetik dişlilerin birbirleri ile kıyaslanması için kullanılan bir parametredir. V_A rotorların toplam hacmi olarak alınmıştır.

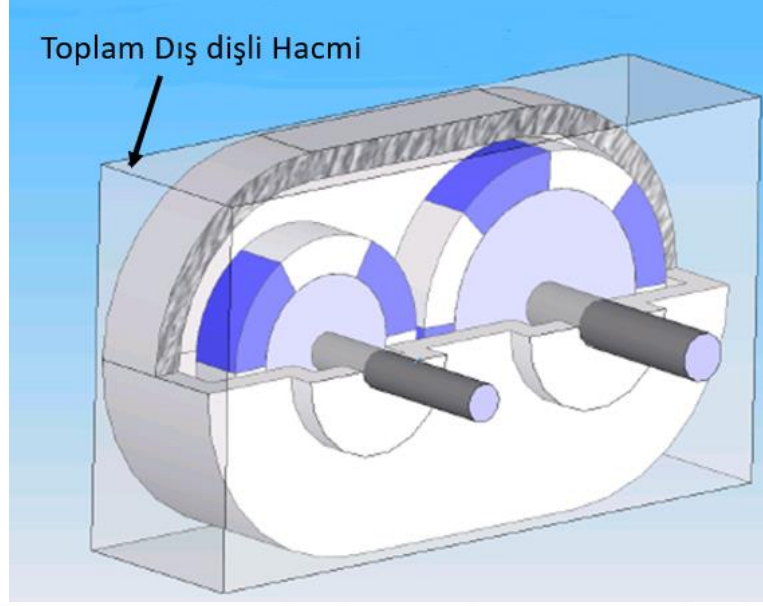
Bazı durumlarda manyetik dişli ile mekanik dişlinin tork yoğunluklarının karşılaştırılması gerekli olabilmektedir. Manyetik dişliler iyi daha iyi tork yoğunluğu ölçümü bu sebeple tanımlanmıştır. Toplam sistemin tork yoğunluğu ρ_R :

$$\rho_R = \frac{T_{mak}}{V_T} \quad (8)$$

Mekanik dişliler de nominal tork değeri T_{Nom} ile hesaplanan bir tork yoğunluğu değerine sahiptir.

$$\rho_T = \frac{T_{Nom}}{V_T} \quad (9)$$

Bu denklemdaki V_T değeri bütün dış dişli kutusu hacmi için kullanılmaktadır. Bazı uygulamalarda farklı dişli topolojileri olduğu için hesaplamak zor olabilmektedir, fakat dış hacminin alınmasıyla bu karışıklık giderilmektedir. Bu yüzden dişli mekanizmasının etrafındaki yaklaşık hacim olarak tanımlanır. Bir dişli mekanizmasının yaklaşık alınan hacim değeri Şekil 2.4 te belirtilmiştir.



Şekil 2.4 Manyetik Dişli Çevresindeki Toplam Dış Hacim V_T

Mekanik ve manyetik dişliler belirli bir verime sahiptirler. Bu verim çıkış milindeki gücün, tahrik milindeki güce bölünmesiyle bulunur.

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} \quad (10)$$

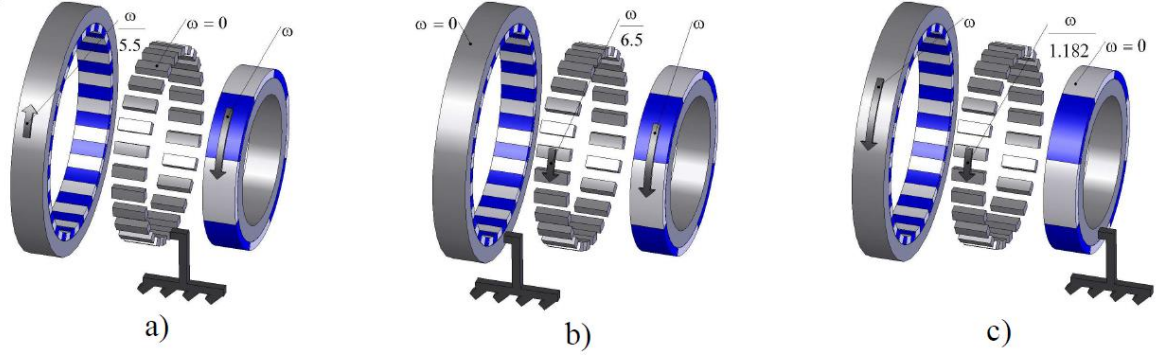
İçerisinde modülatör halkası barındıran manyetik dişliler için benzer denklemler türetilmiştir.

Öncelikle yapılan verimlilik çalışmalarına göre görüşmüştür ki, verimli bir çalışma için modülatör sayısı:

$$n_m = p_h + p_y \quad (11)$$

Hızlı rotor üzerindeki mıknatıs sayısı p_h yavaş rotor üzerindeki mıknatıs sayısı p_y olarak tanımlanmıştır.

Eş eksenli ve modülatörlü bir manyetik dişli giriş ve çıkış milline göre çeşitleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Döner parçalarına Göre Eş Eksenli Manyetik Dişliler

Şekil 2.5 a da gösterilen dişlide modülatör halkası sabittir, Şekil b de dış rotor sabit iken c de iç rotor sabittir.

Modülatörün sabit olduğu dişli kutularında çevrim oranı (Şekil 2.5 a):

$$G_{\zeta a} = \frac{n_m - p_h}{p_h} \quad (12)$$

Denklem 12 'de n_m modülatör sayısını, p_h hızlı rotordaki mıknatıs sayısını ve G_{ζ} çevrim oranını ifade eder. Bu denklem mutlak koşullar için geçerlidir, yani dişliler arasında kaymanın olmayacağı düşünülmektedir.

Nominal açısal hızı:

$$w_y = \frac{1}{-G_{\zeta a}} \cdot w_h \quad (13)$$

Denklem 13 'de w_y yavaş rotorun açısal hızını, w_h hızlı rotorun açısal hızını ifade eder.

Eğer güç aktarımı sırasında kayıpların olmadığını varsayarsak, sistemin toplam güç sıfır olmalı.

$$P_y + P_m + P_h = 0 \quad (14)$$

$$w_y \cdot T_y + w_m \cdot T_m + w_h \cdot T_h = 0 \quad (15)$$

$$T_y \cdot \frac{1}{-G_{\zeta a}} w_h + 0 + T_h \cdot w_h = 0 \quad (16)$$

$$T_y = G_{\zeta a} \cdot T_h \quad (17)$$

Dış rotorun sabit olduğu dişli kutularında çevrim oranı (Şekil 2.5 b):

$$G_{\zeta b} = \frac{n_m}{p_y} = \frac{n_m}{p_h} \quad (18)$$

Denklem 18 'de n_m modülör sayısını, p_y hızlı rotordaki mıknatıs sayısını ve G_{ζ} çevrim oranını ifade eder.

Modülör ve iç rotorun açısal hız ilişkisi:

$$w_m = \frac{1}{-G_{\zeta b}} \cdot w_y \quad (19)$$

Eğer güç aktarımı sırasındaki ilişki:

$$P_y + P_m + P_h = 0 \quad (20)$$

$$w_y \cdot T_y + w_m \cdot T_m + w_h \cdot T_h = 0 \quad (21)$$

$$0 + T_m \cdot \frac{1}{G_{\zeta b}} w_m + T_h \cdot w_h = 0 \quad (22)$$

$$T_m = -G_{\zeta b} \cdot T_h \quad (23)$$

İç rotorun sabit olduğu durumda güç aktarım ilişkisi (Şekil 2.5 c):

$$G_{\zeta m} = \frac{w_y}{w_m} = \frac{G_{\zeta b}}{G_{\zeta a}} = \frac{\frac{n_s}{p_y}}{\frac{n_m - p_y}{p_y}} = \frac{n_m}{n_m - p_y} \quad (24)$$

2.2 Maxwell Denklemleri

Elektromanyetik alanlar, şarj ve akım kaynaklarından ortaya çıkar ve Maxwell denklemleriyle çözümlenir. Maxwell alan denklemleri:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (25)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (26)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (27)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (28)$$

Bu denklemlerde J (A/m²) ve ρ (C/m³) kaynak terimleri ve H , B , E ve D alanlardır. Bu terimlerin açıklamaları Tablo 2-1 verilmiştir.

Tablo 2-1 Maxwell Denklemlerinde Kullanılan Birimler

| Alan | Tanım |
|------|--|
| E | Elektrik Alan Yoğunluğu (V/m) |
| D | Elektrik Akı Yoğunluğu (C/m ²) |
| H | Manyetik Alan Yoğunluğu (A/m) |
| B | Manyetik Akı Yoğunluğu (T) |

Tablo 2.1 'deki açıklamada, V=volt, m=metre, C=Columb, A=amper, T= Tesla yı ifade etmektedir.

Yukarıda tanımlanan alanlar uzay ve zamanı içeren vektörel bir büyüklüktür. Örneğin,

$$B = B_x(x, y, z, t)\hat{x} + B_y(x, y, z, t)\hat{y} + B_z(x, y, z, t)\hat{z} \quad (29)$$

Yukarıdaki denklemden gördüğümüz gibi bütün alan denklemlerinde 12 bilinmeyen bileşeni vardır. Fakat bu denklemler tutarlı olsa da bileşenlerin hepsi bağımsız birleşen değildir.

Bu nedenle, 12 bilinmeyi belirmek için gereken 12 bağımsız skaler denklemi sağlamazlar. Spesifik olarak iki divergence denklemi, iki eğim denkleminde biri yük denkleminin sürekliliğini dayatılırsa elde edilebilir. Bu nedenle, alan teorisi denklemlerinin ek bağımsız denklemlerle güçlendirilmesi gerekir. Bunlara bölüm 2.2.1 de bahsedilecektir.

Serbest akım yoğunluğu J (A/m²) ve serbest yük yoğunluğu ρ (C/m²) alan denklemlerindeki iki kaynak terimdir. Serbest yük yoğunluğu malzeme içerisindeki hareketine göre atomik ya da moleküler olarak ikiye ayrılmaktadır. Serbest akım yoğunluğu serbest yük hareketine bağlıdır. Bu hareketler; iletkenin iletken içerisindeki hareketi (iletken akımı), yarı iletkenlerdeki iletken elektronlarının hareketi (iletken akımı), pozitif veya negatif iyonların sıvı içerisindeki hareketi (elektrolitik akım) ve elektron ya da iyonun vakum altında hareketi (konveksiyon akımı).

Alan denklemleri süreklilik denklemi ile ifade edildiği gibi serbest yükün korunmasını içerir,

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (30)$$

Bu denklem divergence denkleminin (28) zamana bağlı türevlenmesiyle (30) elde edilmiştir.

Diğer taraftan, eğer denklem (2.6) görüldüğü gibi bağımsız denklemse, iki divergence denklemi (2.2) ve (2.4) daha öncede belirtildiği gibi iki eğim denkleminde elde edilebilir.

Serbest yüke ek olarak bağlı yükte vardır. Bağlı yük atomik ve ya moleküler düzeyde yer değiştiren ama ondan ayrılmayan yüklerdir. Bağlı yükler polarizasyon sırasında ortaya çıkar.

Temel İlişkiler

Daha önceden bahsedildiği gibi, Maxwell denklemleri tek başına alan denklemlerinin tamamlanmasını sağlayamaz. Teoriyi tamamlamak için, alan denklemleri aşağıda bahsedilen bağımsız denklemler eklenerek türetilmelidir:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (31)$$

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (32)$$

M (A/m) manyetizasyon, P (C/m²) polarizasyon, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T m/A havanın manyetik geçirgenliği ve $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m havanın elektriksel geçirgenliğini temsil eder.

Manyetizasyon, malzemenin birim hacim başına düşen dipol momentine karşılık gelmektedir. Manyetizasyonun formülize edilmiş,

$$M = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_i m_i}{\Delta V} \quad (33)$$

Denklemdaki $\sum_i m_i$, ΔV hacmindeki malzemenin manyetik dipole momentlerinin vektörel toplamını vermektedir.

Kararlı, lineer, homojen ve izotropik kabulleri altında temel ilişkiler aşağıdaki hale dönüşmektedir.

$$B = \mu H \quad (34)$$

Ve

$$D = \epsilon E \quad (35)$$

Denklemlerdeki μ ve ϵ manyetik geçirgenlik ve elektriksel geçirgenliği temsil etmektedir. Bu denklemlere ek olarak J ve E arasında bir ilişki daha vardır,

$$J = \sigma E \quad (36)$$

Bu denklemde σ iletkenliği temsil etmektedir ve birimi A/Vm dir.

Lineer olmayan, homojen olmayan ya da anizotropik malzeme özellikleri için denklemler tekrardan değiştirilir. Eğer μ , ϵ ve σ alana bağlı olarak değişiyorsa lineer olmayan malzeme tanımı yapılmalıdır. Lineer olmayan malzemelerin denklemleri (34, 35, 36) den yola çıkılarak aşağıdaki gibi türetilir

$$B = \mu(H)H \quad (37)$$

$$D = \epsilon(E)E \quad (38)$$

Ya da

$$J = \sigma(E)E \quad (39)$$

Lineer olmayan özelliğe bağlıdır.

Eğer μ , ϵ , ve σ malzeme içerisindeki pozisyona bağlı olarak değişiyorsa, bu durumda homojen olmayan malzeme tanımı yapılır. Bu durumda koordinat durumlarına göre formülize edilir. Örneğin $\mu=(x, y, z)$, $\epsilon=(x, y, z)$, ve $\sigma=(x, y, z)$. Eğer μ , ϵ , ve σ malzeme içerisindeki yöne bağlı olarak değişiyorsa, bu durumda anizotropik malzeme tanımı yapılır. Anizotropik malzemeler genel olarak 3 denklemden oluşur:

$$B_x = \mu_{11}H_x + \mu_{12}H_y + \mu_{13}H_z \quad (40)$$

$$B_y = \mu_{21}H_x + \mu_{22}H_y + \mu_{23}H_z \quad (41)$$

$$B_z = \mu_{31}H_x + \mu_{32}H_y + \mu_{33}H_z \quad (42)$$

Denklem (29) ve (30) e benzer.

2.3 Kuvvet ve Tork

Alanlar her ne kadar önemli olsa da onların da etkileşimde olduğum yüklü parçacıklar ile olan ilişkisi de bir o kadar önemlidir. Genel olarak elektromanyetik analizlerde kararlı parçalara aktarılan elektromanyetik kuvvet ve torku belirlenmek istenir. Bunu belirlemek için bir u hızıyla hareket eden q yükün E- ve B- alan geçirgenliği altındaki davranışı incelenir. Hareket eden bu yükün üzerindeki kuvvet Lorentz denklemi ile açıklanır:

$$\text{(Lorentz Kuvveti)} \quad F = \rho(E + u \times B) \quad (43)$$

Süreklilik sınırında denklem (44) genelleştirir

$$f = \rho E + J \times B \left(\frac{N}{m^3} \right) \quad (44)$$

Yukarıdaki denklemde ρ serbest yük yoğunluğunu ve J serbest akım yoğunluğunu temsil etmektedir. Ayrıca f kuvvet yoğunluğudur. Bir B manyetik alanı altında, kararlı bir yüke etkiyen kuvvet ve tork değeri bulunmak istenmektedir. Denklem (45) te akım dağılımına J etkiyen Lorentz kuvveti bulunur.

$$F = \int_v J \times B \, dv \quad (45)$$

Denklemde v akım dağılımının J hacmini temsil etmektedir. Aynı durumda etkiyen tork değeri de aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$T = \int_v r \times (J \times B) dv \quad (46)$$

Denklemden r hesaplanan tork noktasının vektörüdür.

2.4 Genelleme

Bu bölümde önemli denklemlerin tekrar üzerinden geçilecektir.

Elektromanyetik alan bir yük ve akım kaynağından oluşur ve Maxwell denklemleri ile açıklanır (Tablo 2.2).

Tablo 2-2 4 Ana Maxwell Denklemleri

| Diferansiyel Formu | İntegral Formu | |
|---|---|----------------------------|
| $\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$ | $\oint_c H \cdot dl = \int_s \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot ds$ | Amper Yasası |
| $\nabla \cdot B = 0$ | $\oint_s B \cdot ds = 0$ | Manyetizm için Gaus Yasası |
| $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ | $\oint_c E \cdot dl = -\int_s \frac{\partial B}{\partial t} ds$ | Fraday Yasası |
| $\nabla \cdot D = \rho$ | $\oint_s D \cdot ds = \int_v \rho dv$ | Gaus Yasası |

Alan denklemleri tutarlıdır ama bütün bağımsız değişkenleri kapsamaz. Bu yüzden fazladan ilişkiler tanımlamak gerekir.

$$B = \mu_0(H + M) \quad (47)$$

Ve

$$D = \epsilon_0(E + P) \quad (48)$$

Kararlı, lineer, homojen ve izotropik malzeme yaklaşımıyla denklem $B=\mu H$ ve $D=\epsilon E$ şeklinde basitleştirilebilir. E alanı ile akım yoğunluğu arasında fazdan bir denklem daha vardır $J=\sigma E$.

Maxwell denklemleri yükün korunumunu da içerir:

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (49)$$

Eğer ρ yükü u hızıyla E- ve B- alanlarından geçerken, Lorentz kuvvetine maruz kalırlar:

$$F = \rho(E + u \times B) \quad (50)$$

Süreklilik sınırında denklem (51) genelleştirilir:

$$f = \rho E + J \times B \quad (51)$$

İki farklı malzemenin olduğu bir durumda Maxwell denklemleri çözümünün gerçekleştirilecekse, malzeme sınırları arasına sınır şartları eklenmelidir. Birbirine teğet olan birleşenler için sınır koşulları H ve E:

$$H_{1t} - H_{2t} = J_{ns} \quad (52)$$

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (53)$$

Genel olarak basit uygulamalarda $J_{ns}=0$ ve $H_{1t}=H_{2t}$ 'dir. Normal parçaların B ve D 'si için sınır şartları

$$B_{1n} = B_{2n} \quad (54)$$

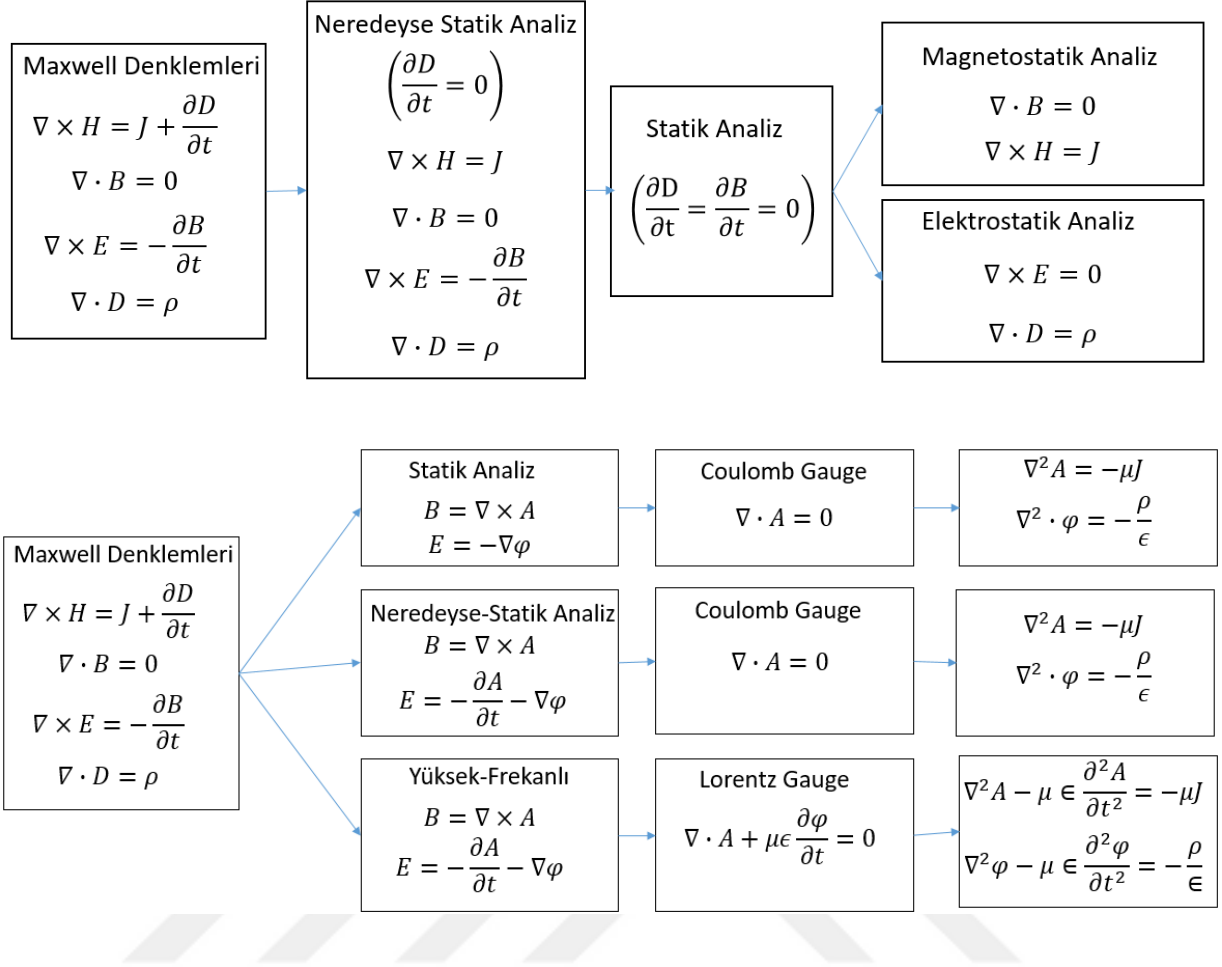
$$D_{1n} - D_{2n} = \rho_s \quad (55)$$

Alanlar Maxwell denklemleri direk çözümlerle de belirlenebilir. Ancak, değişkenlerin skaler ve vektör potansiyellerinde ϕ ve A değerlerinde bir değişiklik yapması daha uygun olur:

$$B = \nabla \times A \quad (56)$$

Ve

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \phi \quad (57)$$



Kararlı, lineer, homojen ve izotropik analizde Lorentz koşulu uygulanır:

$$\nabla \cdot A = -\pi\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (58)$$

Ve potansiyel homojen olmayan dalga denklemleri ile bulunur

$$\nabla^2 A - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\mu J \quad (59)$$

$$\nabla^2 \phi - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (60)$$

Bu denklemlerin sonuçları:

$$A(x, t) = \frac{\mu}{4\pi} \int_v \frac{J(x', t - |x - x'|/u)}{|x - x'|} dv' \quad (61)$$

Ve

$$\varphi(x, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_v \frac{\rho(x', t - |x - x'|/u)}{|x - x'|} dv \quad (62)$$

B ve E alanları denklem (56) ve (57) den hesaplanabilmektedir. B ve H bulunduktan sonra, temel ilişkiler ile H ve D de bulunabilir.

Son olarak elektro manyetik uygulamaları statik, neredeyse statik ve yüksek frekanslı olarak kategorize edebiliriz. Şekillerde 2.2 ve 2.3 Bu kategoriler için alan denklemlerinin sırasıyla alanlar ve potansiyeller açısından azaltılmasını ve sadeleştirilmesini göstermektedir. Bütün bu denklemler kararlı, lineer, homojen ve izotropik malzeme kabulü altında kullanılmaktadır.



3 SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ

Yapılan literatür taramaları sonucunda, medikal bir alanda kullanımı görülmemiş eş eksenli ve modülatörlü manyetik dişli üzerine performans çalışmaları yapılmıştır. Çalışmalar sanal ortamda sonlu elemanlar analizleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler ile manyetik dişlinin belirlenen performans parametrelerine göre boyutlandırılması yapılmıştır.

Manyetik dişlinin birçok performans parametresi vardır. Öne çıkan parametreler

- Hızı
- Verimi
- Gücü
- Boyutu
- Ömrü
- Sıcaklığı
- Ağırlığı
- Maliyeti
- Şok faktörü
- Akustik gürültüsü
- Tork salınımı

Dişliler birçok uygulamada farklı güç kaynaklarıyla tahrik edilmektedir. Bütün uygulamalar düzgün çalışmamaktadır ve bu sebepten şok etkisine maruz kalmaktadır. Dişlinin bu şok etkisine dayanması istenir ve bu yüzden yapılacak uygulamalarda tasarımcıların bunu performans parametresi olarak ele alması gerekmektedir. Bu şok faktör genelde yanma ile güç üretilmesi gibi durumlarda önemli hale gelmektedir. Yapılan bu çalışmada şok faktörü ihmal edilmiştir.

Manyetik dişliler fiziksel temas ile güç iletmemelerine rağmen yüksek yüklemeler ve yüksek hızlarda, yapının yeterince rijit olmamasından kaynaklı akustik gürültü oluşabilmektedir. Yapılan bu çalışmada oluşabilecek gürültü miktarı da ihmal edilmiş, performans kriteri olarak alınmamıştır.

Manyetik dişlilerde kullanılan mıknatısların maruz kaldığı sıcaklığa bağlı olarak çalışma performansı değişmektedir. Hatta curie sıcaklığına geldiklerinde manyetik özelliklerini tamamen kaybetmedirler. Sıcaklık bir elektromanyetik bir mekanizmada çok önemli bir performans kriteri olmasına rağmen bu çalışmada performans kriteri olarak düşünülmemiştir. İleride yapılacak çalışmalarda performans kriterlerine eklenebilir.

Manyetik dişlilerde oluşturulan elektromanyetik kuvvet ve torkun rotor üzerindeki mıknatlara, modülatörü oluşturan demir halkalara ve rotolara etkimesiyle oluşan gerilme dağılımlarından yola çıkılarak ömür hesabı yapılabilir. Fakat yapılan çalışmada üretim ve montaj durumu daha belirlenmediği için bu performans kriteri de ihmal edildi.

Manyetik dişlinin diğer performans parametreleri olan ağırlık ve maliyet mekanizmanın boyutuna ve yapıdaki mıknatıs sayısına göre değişmektedir. Bu çalışmada doğrudan bu performans kriterleri incelenmese de çalışma sonucunda bir fikir vermektedir.

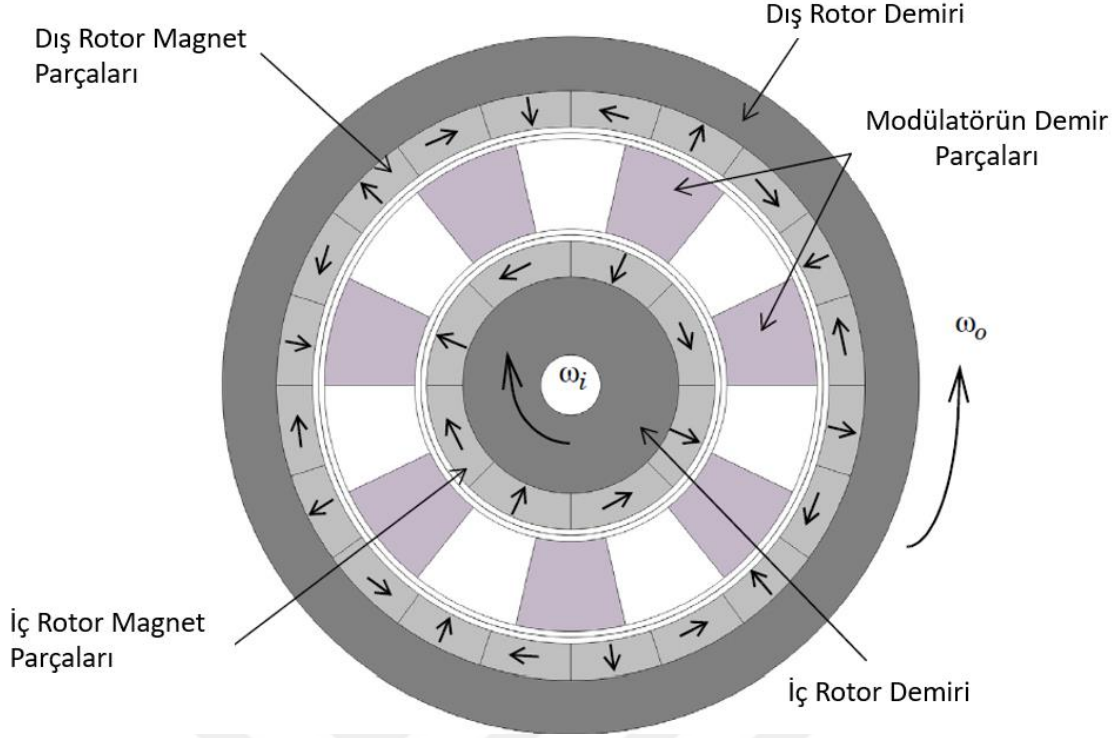
Bu çalışmada; hız, verim, güç ve boyut performans kriteri olarak seçilmiştir. Yapılacak olan analizler bu doğrultuda modellenmiştir.

Çalışmada boyutlandırma optimizasyonu ile hava boşluğu, mıknatıs, rotor ve modülatör kalınlıklarının performans kriterlerine etkisi incelenmiştir. Yapılan bir diğer optimizasyon çalışmasında çevrim oranı ve mıknatıs sayısının performans kriterlerine etkisi incelenmiştir. Optimizasyon analizlerine başlamadan önce yapılacak olan analizlerin çözüm sürelerini azaltmak ve belirsizliği ortan kaldırmak için yaklaşımlar ve kabuller yapılmıştır. Örneğin, tez için yapılan bütün analiz çalışmalarında kullanılan malzemelerin homojen ve izotropik olduğu kabul edilmiştir. Benzer şekilde çalışma boyunca yapılan sonlu elemanlar analizlerinde eş eksenli manyetik dişlinin dış rotoru, dış rotor mıknatısları, modülatör halkası, iç rotor, iç rotor mıknatısları ve çalışma uzayı modellenmiştir.

3.1 Çözücü Seçimi

Eş eksenli manyetik dişli zamana bağlı olarak ya da hareketli parçaların açılı değerleri adım adım değiştirilerek (kararlı) çözdürülebilmektedir. Bu iki çözücü seçiminin sonuca etkisini anlamak için referans bir eş eksenli manyetik dişli modeli alınıp iki çözücü ile benzer adımlarda analiz edilerek, bulunan iç ve dış rotordaki eksenel tork değerleri ve çözüm zamanı karşılaştırılmıştır.

İki çözücünün karşılaştırılması için referans olarak COMSOL kütüphanesinden hallbach tipi manyetik dişlinin zamana bağlı manyetik alan analizi modeli ele alınmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Comsol kütüphanesinde alınan hallbach manyetik dişlisinin topolojisi

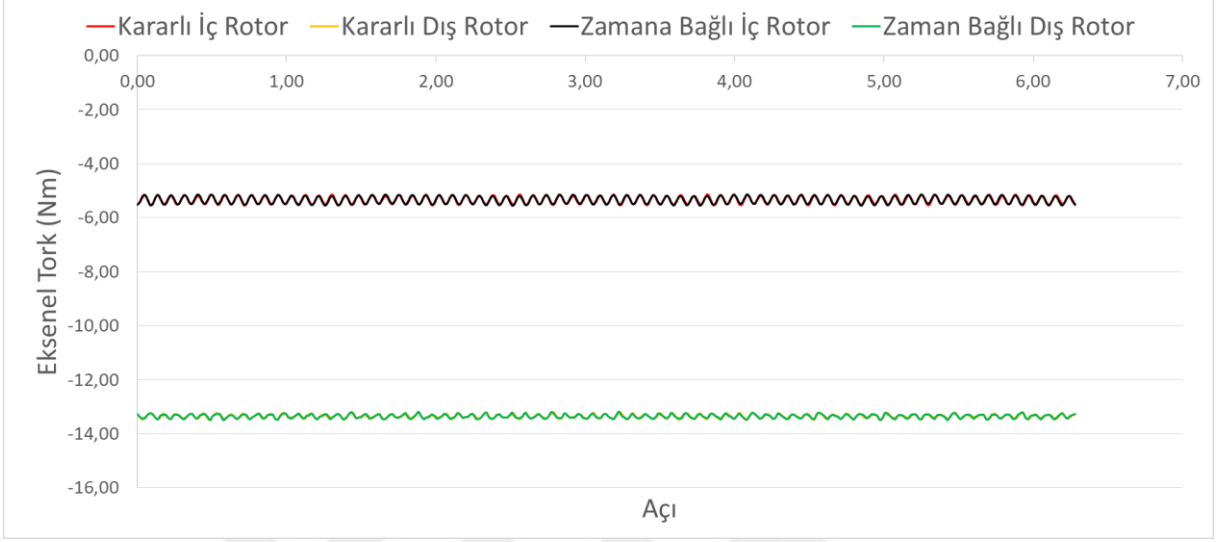
Comsol kütüphanesinden alınan hallbach tipi manyetik dişlinin parametrik (kararlı) çözümünü için de aynı topoloji ve ölçülerde modellenmesi yapılmıştır (Tablo 3.1).

Tablo 3-1 Çözücü seçiminin için oluşturulmuş hallbach modellerinin dizayn parametreleri

| | Zamana Bağlı | Kararlı (Açıya Bağlı) | Birim |
|--|--------------|-----------------------|----------|
| Manyetik Dişli Kalınlığı | 100,00 | 100,00 | [mm] |
| Mıknatısların Manyetik alan Yoğunluğu | 1,40 | 1,40 | [T] |
| İç ve Dış Rotordaki Hava Boşluğu | 2,00 | 2,00 | [mm] |
| Dış Havanın Kalınlığı | 15,00 | 15,00 | [mm] |
| İç Rotordaki Şaft Yarıçapı | 5,00 | 5,00 | [mm] |
| İç Rotordaki Demirin Kalınlığı | 13,00 | 13,00 | [mm] |
| Dış Rotordaki Demirin Kalınlığı | 9,00 | 9,00 | [mm] |
| İç Rotordaki Mıknatıs Kalınlığı | 6,00 | 6,00 | [mm] |
| Dış Rotordaki Mıknatıs Kalınlığı | 6,00 | 6,00 | [mm] |
| Modülator Halkalarının Kalınlığı | 15,00 | 15,00 | [mm] |
| İç Rotorun Frekansı | 2,50 | | [1/s] |
| Dış Rotorun Frekansı | 1,00 | | [1/s] |
| Zamanın aralığı | 0 ile 1 | | [s] |
| Açı Aralığı | | 0 ile 6,28 | [radyan] |
| Çözüm Adımı Sayısı | 360,00 | 360,00 | |

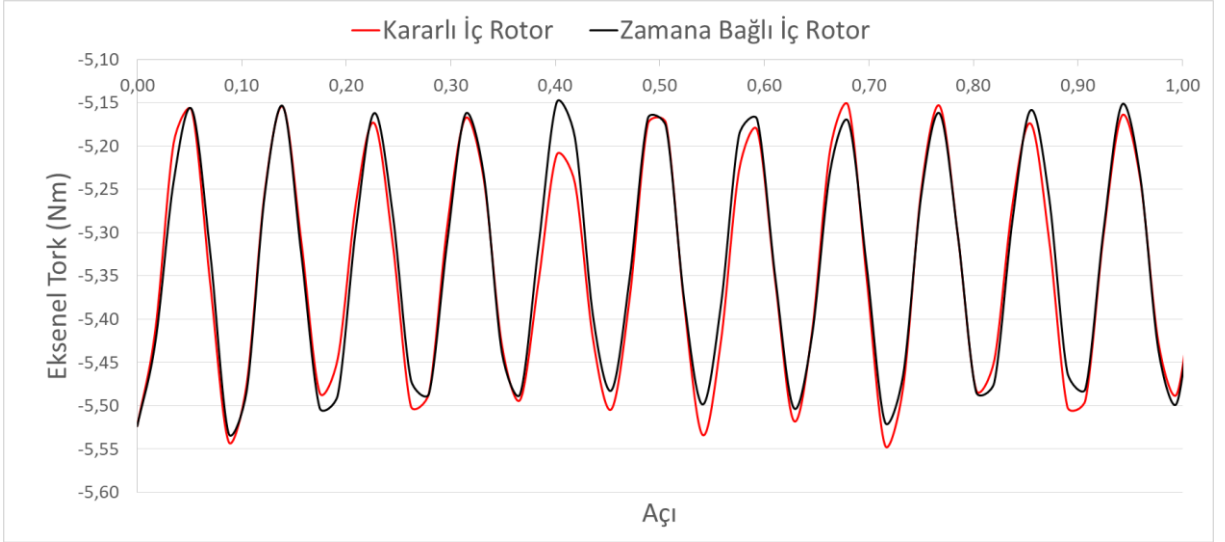
Kütüphaneden alınan referans model zamana bağlı bir çalışmadır. Alınan bu modelin hız tanımlanan iç ve dış rotoruna hız tanımı yerine açı tanımlanıp, parametrik olarak

çözdürülmüştür. Daha sonra bu açı değerlerinde karşılık gelen iç ve dış rotordaki eksenel tork değerleri ile zamana bağlı yapılan çözümdeki tork değerleri karşılaştırılmıştır. Aşağıdaki Şekil 3.2 'de 2 dişli modelinin de 1 tam tur attığında iç ve dış rotorundaki eksenel tork değişimi verilmektedir.

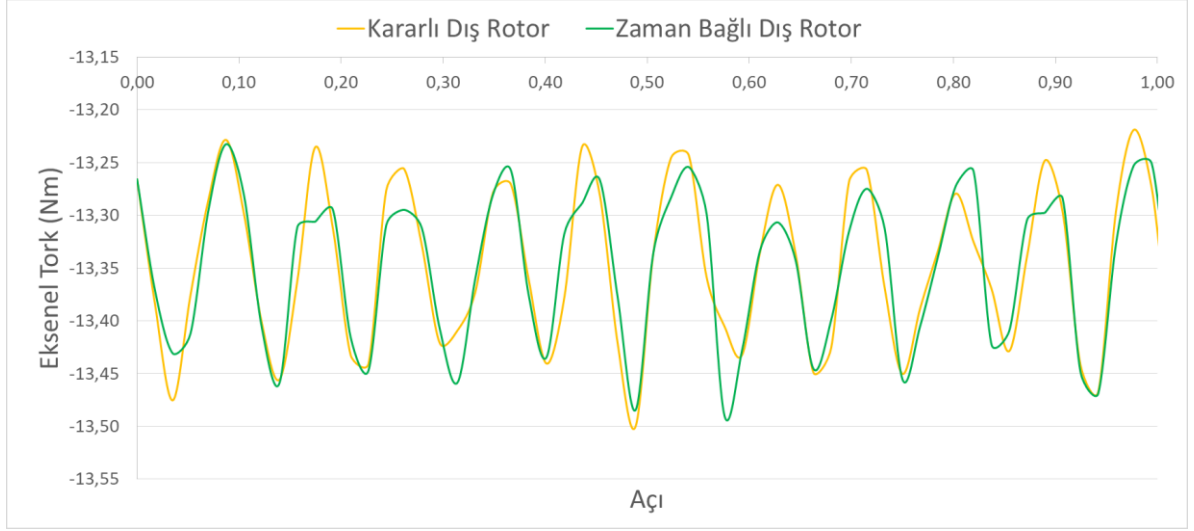


Şekil 3.2 Zamana bağlı çözü ile kararlı parametrik çözüm sonrası iç ve dış rotor için eksenel tork değerleri

Grafığın daha anlaşılır olması için yakınlaştırılmış ve 0 ile 1 radyan arası açı değişimi yaptığı bölüm incelenmiştir (Şekil 3.3 , 3.4).



Şekil 3.3. İç Rotor Üzerindeki Eksenel Tork Dağılımının Detaylı Gösterimi



Şekil 3.4. Dış Rotor Üzerindeki Eksenel Tork Dağılımının Detaylı Gösterimi

Manyetik dişlinin 1 tur dönmesi ile iç ve dış rotorlar üzerinde oluşan eksenel tork değerleri, zamana bağlı yapılan analiz 31 dakika 22 saniyede tamamlanırken, parametrik olarak kararlı çözdürülen model 17 dakika 45 saniyede sonuçlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda birbirine çok yakın eksenel tork değerleri görülmüştür. Bu yüzde çözüm süresini azaltmak için bazı analizler kararlı olarak çözdürülmüştür.

3.2 Kullanılan Malzeme Modellemeleri

Eş eksenli ve modülatörlü manyetik dişli analizinde, modülatörlerin manyetik geçirgenliği havadan fazla olduğu için ortamda oluşan manyetik alan çizgilerini yönlendirmektedir. Buradaki manyetik alan çizgilerinin yönelimi dişlinin performansını doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden yapılacak sonlu elemanlar analizinde modellenen modülatörler için girilen malzemenin geçirgenliğinin ve manyetik alan altındaki manyetik davranışının bilmesi önemlidir.

Malzemelerin atom ve moleküler düzeyde manyetik davranışı beş ana grupta sınıflandırılabilir:

- Diyamanyetizm,
- Paramanyetizm,
- Ferromanyetizm,
- Ferrimanyetizm,

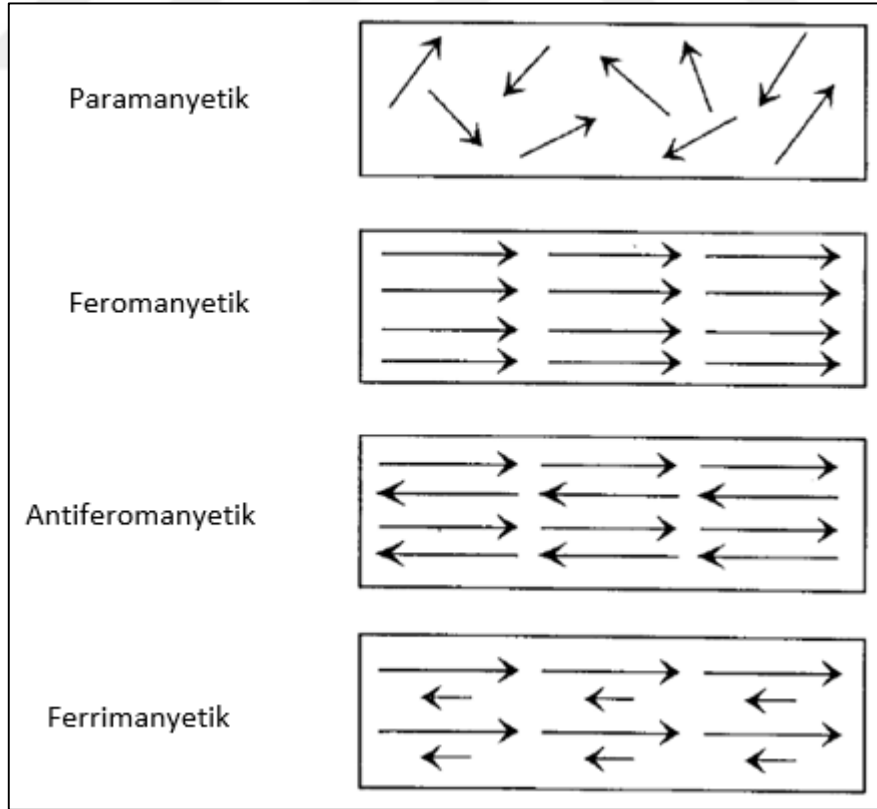
- Antiferromanyetizm.

Diyamanyetik malzemelerin atomik ya da moleküler bazda bir manyetik momenti yoktur. Bir manyetik alana maruz kaldıklarında da alana karşı atomik momentler oluştururlar. Bizzmut bu tarz malzemelere örnek olarak gösterilebilir.

Paramanyetik malzemelerin net bir manyetik moment değeri vardır. Ama diğer atomlar ile oluşturdukları bileşke momentleri zayıftır. Manyetik alana maruz kaldıklarında, atomik momentleri hizalanmaktadır fakat yüksek sıcaklıklarda bu hizalanma derecesi azalmaktadır.

Ferromanyetik malzemelerin de net bir manyetik moment değeri vardır. Ama paramanyetik malzemelerin aksine diğer atomlar ile birlikte yüksek bileşke moment oluştururlar. Manyetik alana maruz kaldığında atomları hizalanıp çok daha yüksek bileşke momentler oluştururlar.

Son olarak ferromanyetik ve antiferromanyetik malzemelerinin yönlendirilmiş ve hizalanmış manyetik momentleri vardır. Fakat bu malzemelerde momentler birbirine ters hizalanmaktadır (Şekil 3.5).

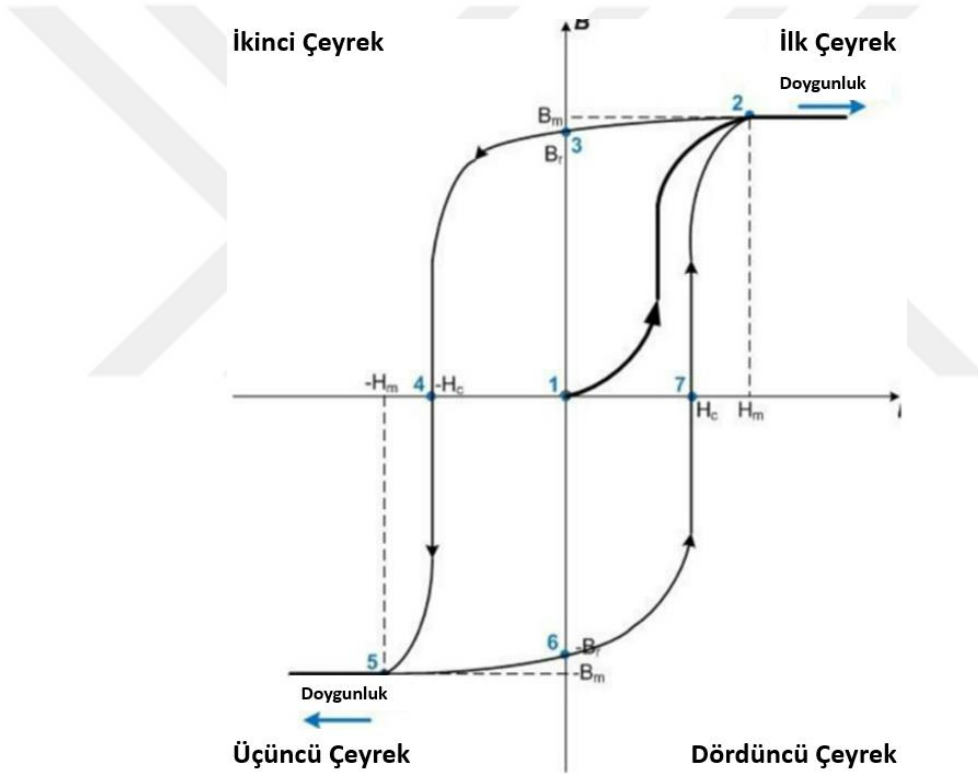


Şekil 3.5 Malzemelerin atom ve moleküler düzeyde manyetik davranışı

Malzemelerin manyetik geçirgenlikleri μ ne göre davranışları:

- $\mu < 0$: Diyamanyetizm, manyetik alanı azaltan bir etkisi olur ($\mu \sim -0,7$).
- $\mu > 0$: Paramanyetizm, manyetik alanı arttıran bir etkisi olur ($\mu \sim 50$).
- $\mu \gg 0$: Ferromanyetizm, manyetik alanı arttıran bir etkisi olur ($\mu \sim 1000 - 10000$).

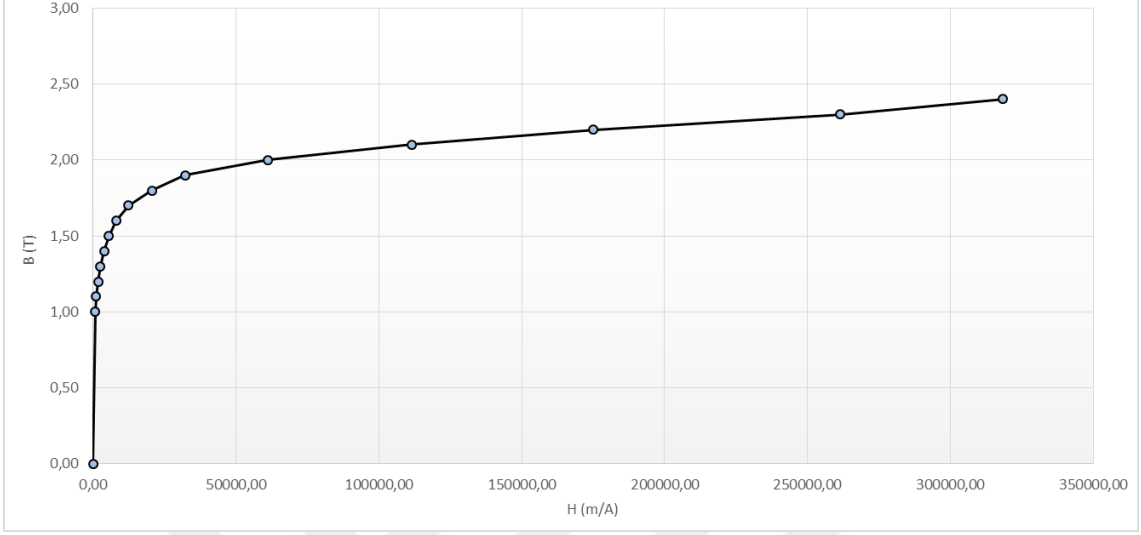
Malzemelerin manyetik geçirgenliği malzemenin oluşturabileceği manyetik alan yoğunluğunun üzerine etkileyen manyetik alan şiddetine bölünmesiyle bulunur[99]. Malzemenin manyetik alan yoğunluğunun üzerine etkileyen manyetik alan şiddetine göre değişiminin grafiği de Şekil 3.6 da verilmektedir.



Şekil 3.6 Malzemenin manyetik alan yoğunluğunun manyetik alan şiddetine göre değişiminin grafiği

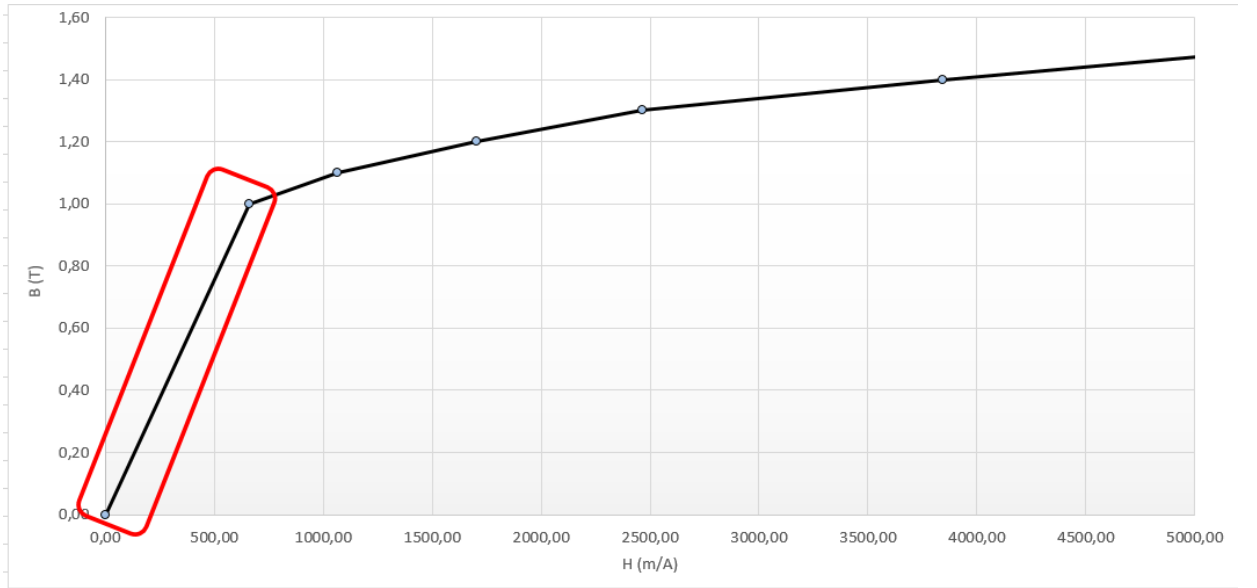
Hem incelenen malzemeye uygulanan maksimum alan şiddetidir ve düşey eksendeki B_m ise o malzemenin en fazla oluşturabileceği manyetik alanı belirtir ve bu iki değerin birbirleriyle kesiştiği noktaya doyum noktası denir. 3 bölge sadece manyetik dipollerin il bölgedekinin tersi olduğunu belirtir. Analizde modülatörlerin ileteceği manyetik alan değerinin B_m değerini geçmemelidir. Geçtiği durumda aynı davranışı sergileyeceği için bu değerün üstüne çıkmak için yapılan her çalışma boşa yapılmış olacaktır.

Yapılan analiz çalışmasında, modülör diskinin manyetik geçirgenlik özelliği lineer olarak ve lineer olmayan olarak 2 türlü incelenmiştir(Şekil 3.7). Elde edilen sonuçlar karşılaştırılıp, yapılacak optimizasyon analizindeki malzeme özelliği belirlenmiştir.



Şekil 3.7 Modülör Halkası İçin Tanımlanan B-H Eğrisi

Yapılan lineer malzeme modelinde, yukarıda tanımlanan yumuşak demirin B-H eğrisinin lineer davranış gösteren bölgesi alınmıştır (Şekil 3.8). Lineer kabul doğrultusunda bu bölgedeki manyetik alan geçirgenlik katsayısı 663,13 mur olarak alınmıştır. Yapılan analizlerde modülör halkası üzerindeki B ve H değerlerinin bu aralıkta kaldığına dikkat edilmiştir.



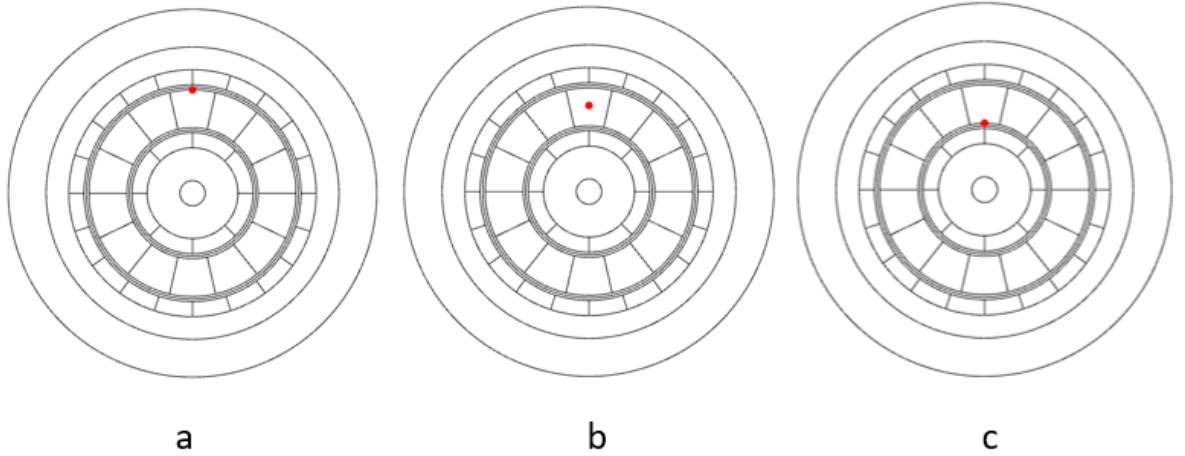
Şekil 3.8 B-H Eğrisinde Lineer Olarak Alınan Bölüm

Analizde mıknatıslar hava olarak tanımlanmıştır. Ama çalışmanın mantıklı ve gerçek hayatta uyumlu olması için Neodyum mıknatıslarının gerçek malzeme özellikleri alınarak modellenmiştir. Öncelikle mıknatıslara tanımlanacak manyetik alan yoğunluğu Mıknatıs Araştırma ve Geliştirme San. Tic. LTD. Şti firmasının Neodyum mıknatısları kataloğundan alınmıştır (Şekil 3.9)[100].

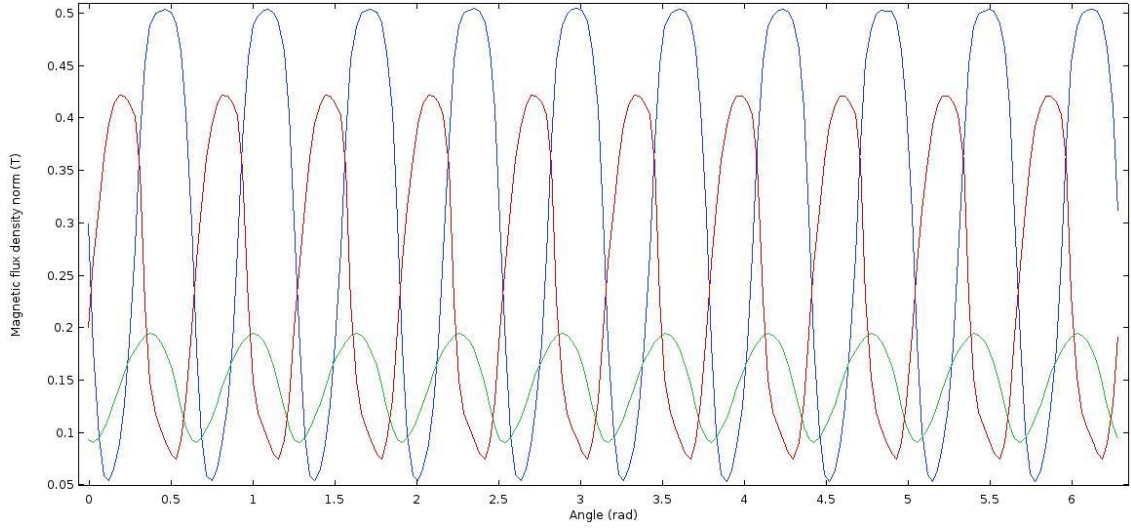
| (Derece) Grade | Max. working Temp. Maksimum Çalışma Sıcaklığı | Remanence (Artık Mıknatıslanma) Kalıcı indüksiyon | | | | Coercive Force Artık Mıknatıslanma Giderici Kuvvet (Zorlayıcı Kuvvet) | | | | Max. Energy Product (Ürettiği Maksimum Enerji) | |
|-------------------|--|---|------|----------|------|---|-------|------|-----|---|-------|
| | Tw | Br (T) | | Br (kGs) | | Hcb | | Hcj | | (BH)max | |
| | °C | Nom | Min | Nom | Min | kA/m | kOe | kA/m | kOe | kJ/m ³ | MGOe |
| N48 | 80 | 1.42 | 1.36 | 14.2 | 13.6 | ≥836 | ≥10.5 | ≥955 | ≥12 | 358-382 | 45-49 |
| N50 | 80 | 1.45 | 1.40 | 14.5 | 14.0 | ≥836 | ≥10.5 | ≥955 | ≥12 | 374-406 | 47-51 |
| N52 | 80 | 1.48 | 1.42 | 14.8 | 14.2 | ≥836 | ≥10.5 | ≥876 | ≥11 | 389-422 | 49-53 |

Şekil 3.9 Araştırma ve Geliştirme San. Tic. LTD. Şti firmasının Neodyum mıknatısları kataloğu

Analizde mıknatısların manyetik alan yoğunlukları 1,4 T olarak girilmiştir. Bu değerde eş eksenli manyetik dişlinin modülatörleri üzerindeki farklı noktalardan (Şekil 3.10), modülatör üzerinde oluşan manyetik alan yoğunluğu kontrol edilmiştir (Şekil 3.11).

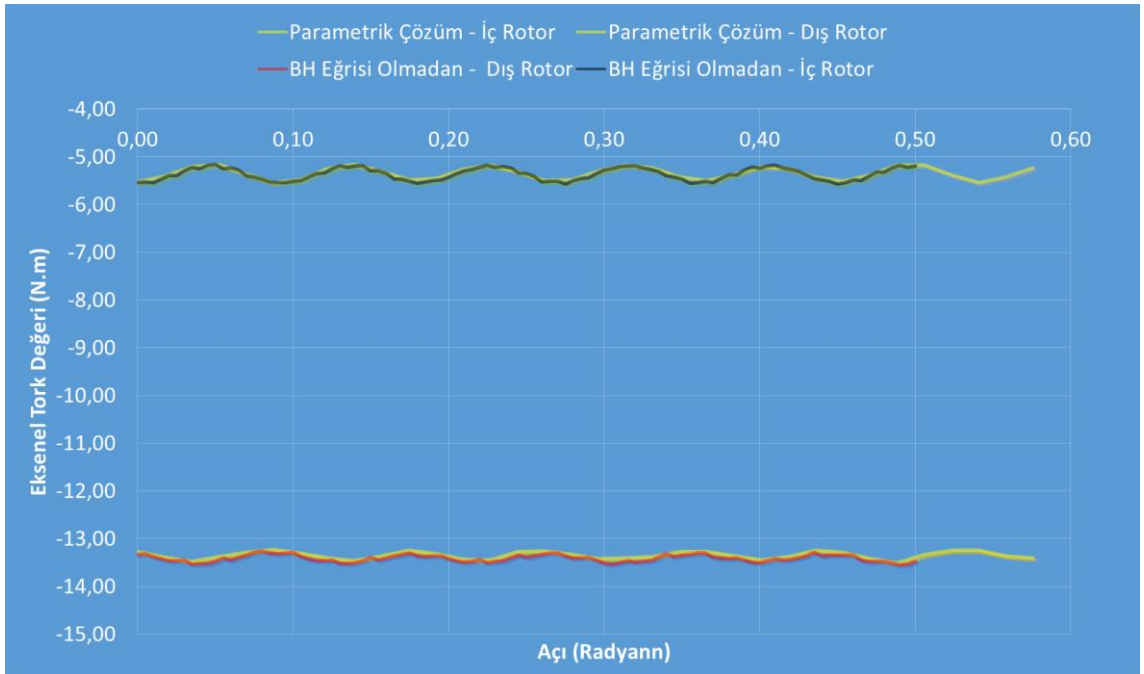


Şekil 3.10 Manyetik alan yoğunluğu kontrol edilen modülatör halkası üzerindeki noktalar



Şekil 3.11. Belirlenen modülör noktaları üzerinde oluşan manyetik alan yoğunluğu

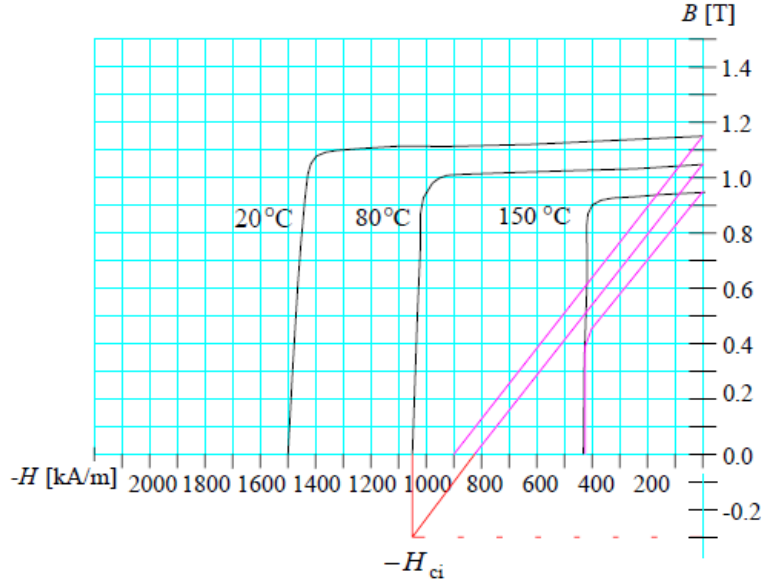
Yukarıdaki Şekil 3.11 den görülmüştür ki, modülör malzemesi olarak tanımladığımız yumuşak çelik daha önce belirlediğimiz lineer bölgede davranış göstermektedir. Bu yüzden manyetik alan geçirgenliği için bir katsayı tanımlamak doğru bir yaklaşımdır. Fakat yine de modülör malzemesi lineer ve lineer olmayarak tanımlanıp, bu tanımlamaların rotorlar üzerindeki aksel tork değerine etkisine bakılmıştır (Şekil 12).



Şekil 3.12. Lineer ve Lineer olmayan malzeme tanımlanan modellerin aksel tork değerleri

Şekil 3.12 de görüldüğü gibi ele alınan modellemede lineer ve lineer olmayan malzeme modellemesinin iç ve dış rotorları üzerindeki aksenal tork değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır.

Malzemelerin manyetik alan yoğunluğunun manyetik alan şiddetine göre değişiminin grafiği de her çevre koşulu için sabit bir grafik değildir. Bir manyetik alan çalışmasında, bu grafiğin en çok etkilen faktör sıcaklıktır. Aşağıdaki Şekil 3.13'te, bir mıknatısın daha yüksek sıcaklara maruz kaldıkça B-H eğrisindeki değişim gösterilmektedir.



Şekil 3.13 Nd-Fe-B Mıknatısının Sıcaklığa Bağlı B-H Eğrisi

Şekilden de görüleceği gibi sıcaklıkla beraber mıknatısın karakterizasyonu değişmektedir. Hatta yüksek sıcaklıklarda manyetik alan taşıma özelliğinin kaybedip demanyetize olmaktadır.

Fakat bu çalışmada modellenen malzemelerin ve mıknatısın sıcaklığa bağlı olarak manyetik alan davranışı incelenmemiştir.

3.3 2 Boyut ve 3 Boyutlu Analizlerin Karşılaştırılması

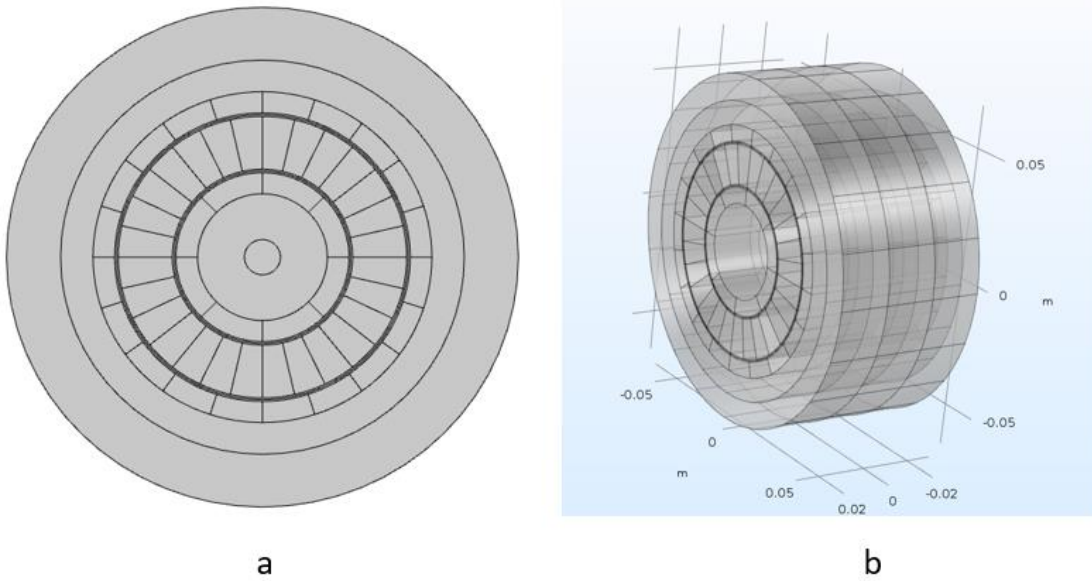
Bu çalışmada 2 boyutlu incelenen bir eş eksenli manyetik dişlinin 3 boyutlu manyetik dişli modeli ile arasındaki fark incelenmiştir. Aslında belirtmek gerekir ki önceki modelleme de 2 boyutta değildir. Dişliye derinlemesine bir boyut verilmektedir fakat 2 boyutlu bir yüzeyden sonuçlar alınıp fizik tanımlaması yapıldığı için bu şekilde ifade edilmiştir.

Bu analiz için manyetik dişli parametreleri Tablo 3.2 deki gibi girilmiştir.

Tablo 3-2 3 ve 2 boyutlu tanımlanan manyetik dişlinin modellemesi için girilen boyutları

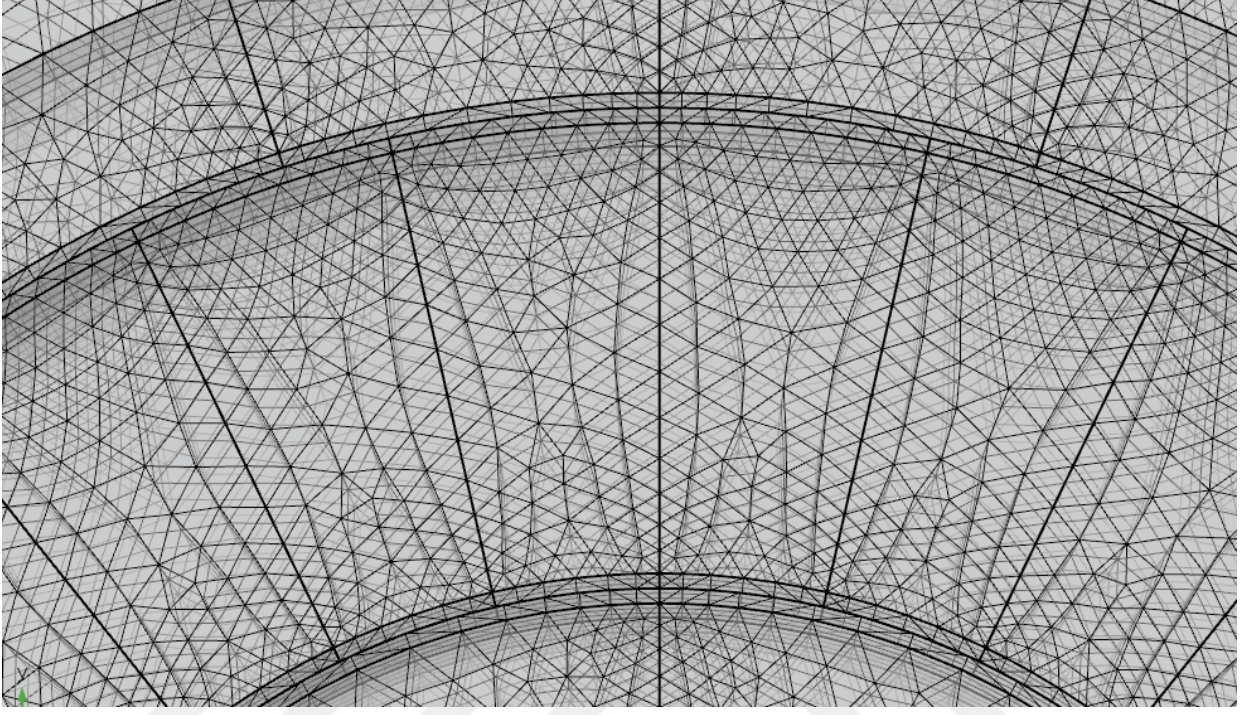
| Name | Değer | Birim |
|---------------------------------------|-------|-------|
| İç Rotorun Dış Yarıçapı | 24 | mm |
| Dış Rotorun İç Yarıçapı | 41 | mm |
| Modülatörün İç Yarıçapı | 25 | mm |
| Modülatörün Dış Yarıçapı | 40 | mm |
| Dış rotorun Dış Çapı | 56 | mm |
| Dış Rotor Demirinin Kalınlığı | 9 | mm |
| İç Miknatis Kalınlığı | 6 | mm |
| Dış Miknatis Kalınlığı | 6 | mm |
| İç Rotor Frekansı | 500 | rpm |
| İç Rotorun Şaft Yarıçapı | 5 | mm |
| Dış Rotor Frekansı | 200 | rpm |
| Rotorların Derinliği | 20 | mm |
| Çevrim Oranı | 2,5 | |
| Modülatör Kalınlığı | 15 | mm |
| Dış Hava Boşluğu | 15 | mm |
| İç Rotor Demirinin Kalınlığı | 13 | mm |
| İç Hava Boşluğu | 1 | mm |
| Dış Hava Boşluğu | 1 | mm |
| Miknatislerin Manyetik Alan Yoğunluğu | 1,4 | T |

COMSOL paket programı üzerinde 3 boyutlu ve 2 boyutlu olarak çizimleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14.Eş eksenli manyetik dişli modelleri a) 2 Boyutlu Model b) 3 Boyutlu model

3 boyutlu analizde, 2 boyutlu ile karşılaştırıldığında derinlik için ağı yapı çoğaldığı ve bunla birlikte node sayısı katlanarak arttığı için çözüm vakti çok uzamaktadır (Şekil 3.15). Sonuçların mesh tanımlamasına bağlı olarak değişimi incelenmek istenmiştir. Bu yüzden bu analiz için ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır (Tablo 3.3).



Şekil 3.15 3 Boyutlu analiz için yapılan bir ağ modellemesi

Tablo 3-3 Ağ yapısına ve eleman sayısına bağlı olarak çözüm süresindeki değişim

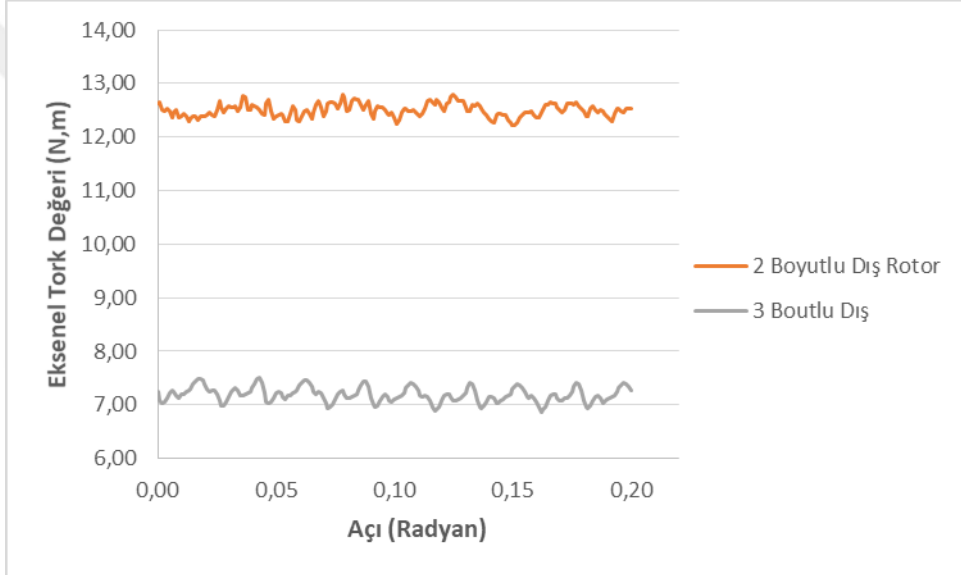
| Mesh Özellikleri | | | | |
|-------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------|
| | Elaman | Minimum Eleman | Ortalama Kalite | Çözüm Zamanı |
| Düşük | 116712 | 0,2405 | 0,8374 | 7 s 43 dak 40 sn |
| Orta | 252300 | 0,3478 | 0,8374 | 26 s 6 dak 35 sn |
| Yüksek | 392784 | 0,4633 | 0,8023 | 89 s 37 dak 22 sn |

Tablo 3.3 te görüldüğü gibi çözüm süresi çok uzamaktadır. Çözüm zamanıyla beraber bir de aksenal tork değerlerinde değişime bakılmıştır (Tablo 3.4).

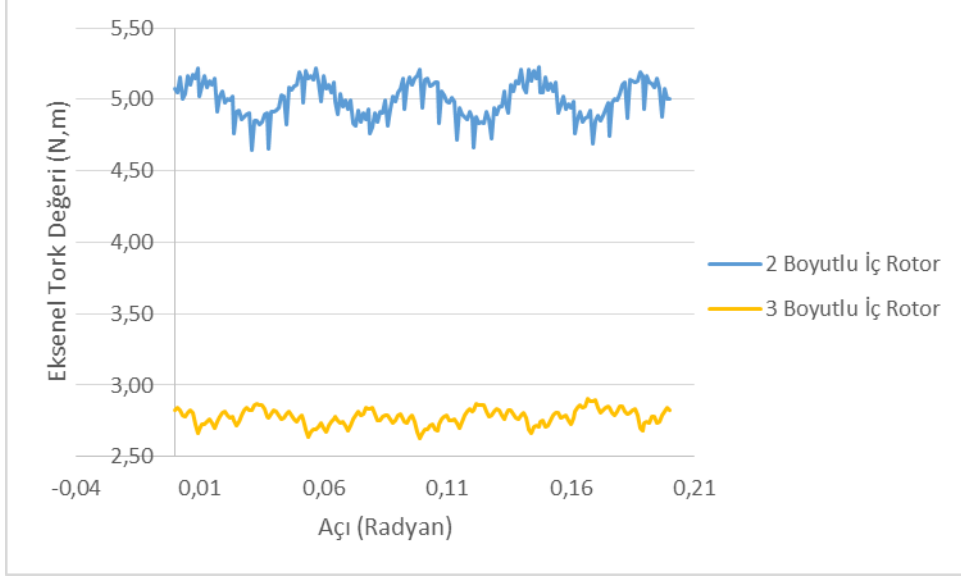
Tablo 3-4 Ağ yapısının rotorlar üzerindeki aksenal tork değerine etkisi

| Ortalama Aksenal Tork (N.m) | | | |
|------------------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| | iç Rotor (N,m) | Dış Rotor (N,m) | Sapma % |
| 3 Boyutlu Düşük Mesh | 2,79702345 | 7,231894277 | 3,42272 |
| 3 Boyutlu Orta Mesh | 2,857677106 | 6,939423027 | 2,86624 |
| 3 Boyutlu Yüksek Mesh | 2,98300554 | 6,702449677 | 10,1249 |

Tablo 3.4 te görüldüğü gibi ağ yapısında eleman sayısının artması ile giriş ve çıkış torkları arasındaki sapmaların azalması arasında bir bağlantı bulunamamıştır. Yapılan 2 boyutlu analiz ile iç ve dış rotordaki aksenal tork değeri grafik üzerinde karşılaştırılmıştır (Şekil 3.16, 3.17).



Şekil 3.16 Dış rotor üzerindeki aksenal tork değeri



Şekil 3.17 İç rotor üzerindeki aksenal tork değeri

Şekil 3.16 ve şekil 3.17 deki sonuçlara bakıldığında iki sonuçlar arasında %50 ye yakın değer farkları görülmesine rağmen aynı salınım hareketi yaptıkları görülmektedir. Değer farkının olmasının sebebi, COMSOL'un sonlu elemanlar modelinde 2 boyutlu analizlerde derinliklerin alt ve üst kısımlarının yalıtkan olarak tanımlanıyor olmasıdır. Şekil 3.14 te görüleceği üzere, 3 boyutlu analizlerde dişlinin etrafı hava ile çevrilmiştir. Optimizasyon çalışmasında manyetik dişlinin boyutları ve çevrim oranına göre manyetik davranışı inceleneceği için benzer davranış yakalanmış olan 2 boyutlu analiz ile devam edilebilir.

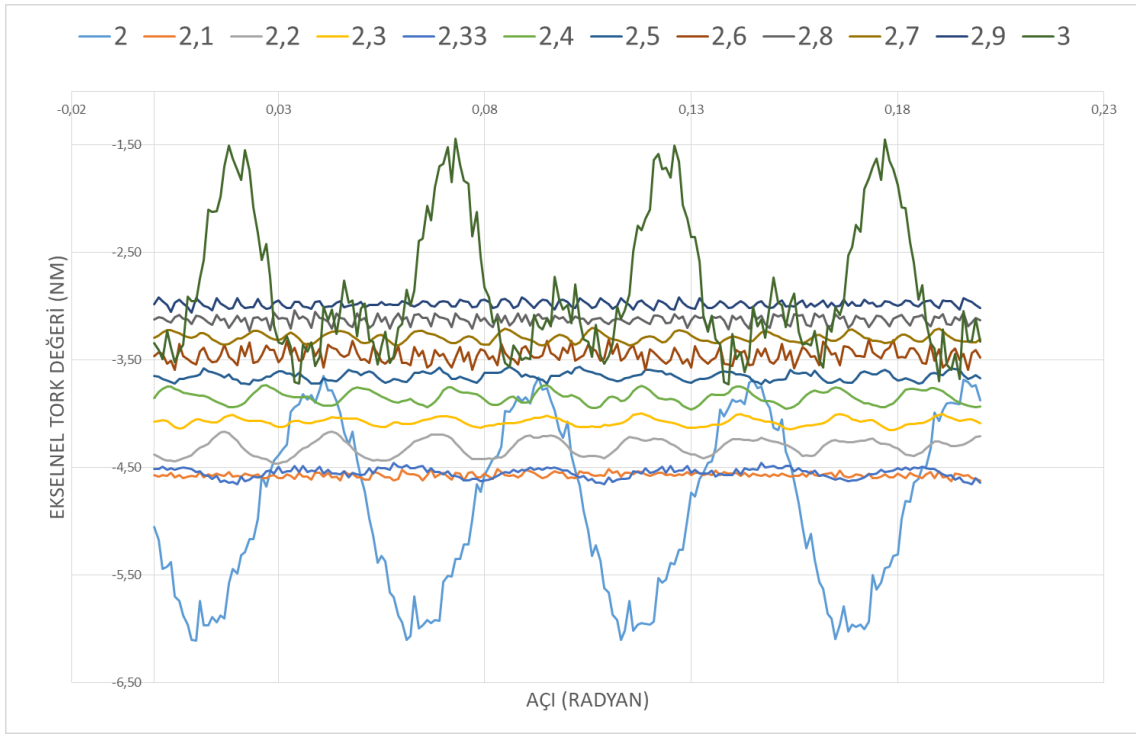
4 OPTİMİZASYON ÇALIŞMASI

Bu bölümde, eş eksenli bir manyetik dişlinin optimum tasarımını bulmak ve manyetik dişlinin teorik altyapısını oluşturmak için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Optimizasyon çalışması bilgisayar destekli sonlu elemanlar analizleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde bir önceki bölümde bahsedilen yaklaşımlar yapılmış yani eş eksenli manyetik dişli 2 boyutlu olarak modellenmiş, benzer mıknatıslar yoğunlukları girileceği için modülatörler için lineer malzeme modeli tanımlanmıştır ve model kararlı olarak ele alınıp parametrik olarak açısal döndürülüp çözdürülmüştür.

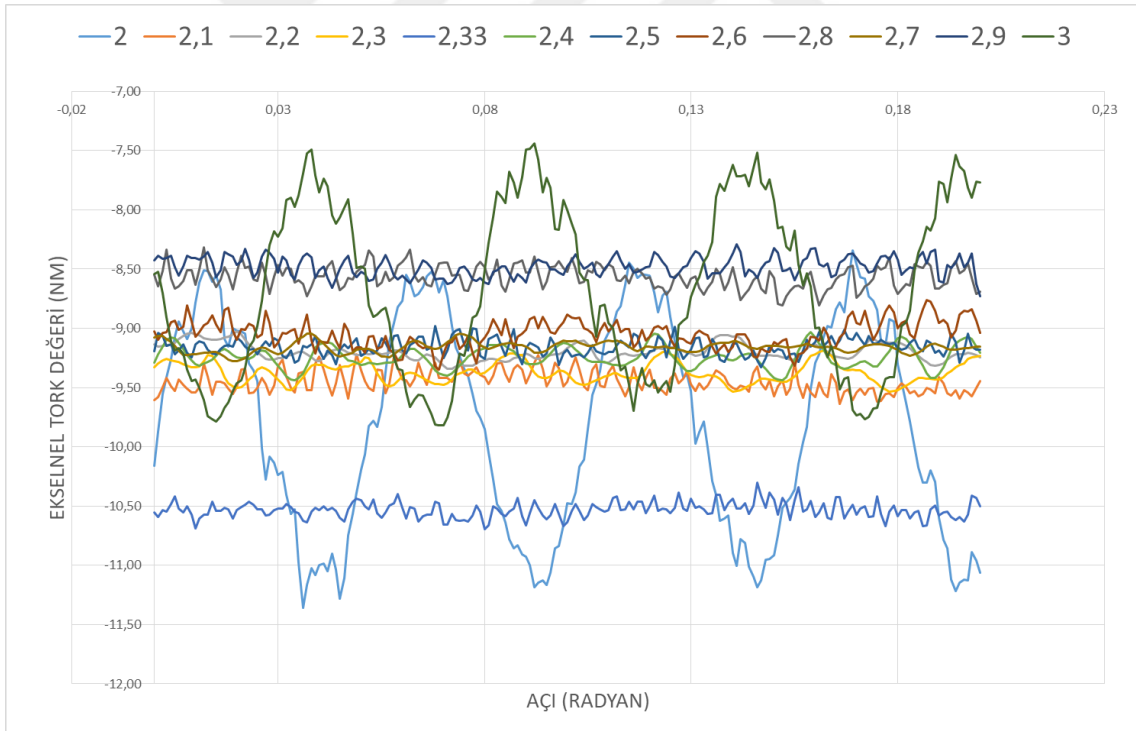
4.1 Magnet Sayısı ve Çevrim Oranı Optimizasyonu

Bir eş eksenli manyetik dişliyi ele aldığımızda, manyetik dişlinin performans kriterlerini en çok belirleyen etmenin iç ve dış rotorda bulunan mıknatıslar olduğunu söyleyebiliriz. Ayrıca incelenen dişlinin farklı çevrim oranlarındaki manyetik karakterizasyonunun bilinmesi de istenilmektedir.

Öncelikle yapılan çalışma daha önce denklem 11 'de bahsedildiği gibi modülatör halkasındaki demir sayısı iç ve dış mıknatısların toplamına eşit bir şekilde modellenmiştir. Daha sonra optimizasyon için incelenecek modellerde, iç rotor üzerindeki mıknatıs sayısı sabit kabul edilerek (10), dış rotor üzerindeki mıknatıs sayısı 20 den başlayarak 30 a kadar arttırılmıştır. Böylece tam sayı olmayan çevrim oranlarının (2, 2.1, 2.2, ..., 3'e kadar) incelenip, dişlinin performansına olan etkisi öğrenilmiştir (Şekil 4.1, 4.2) .

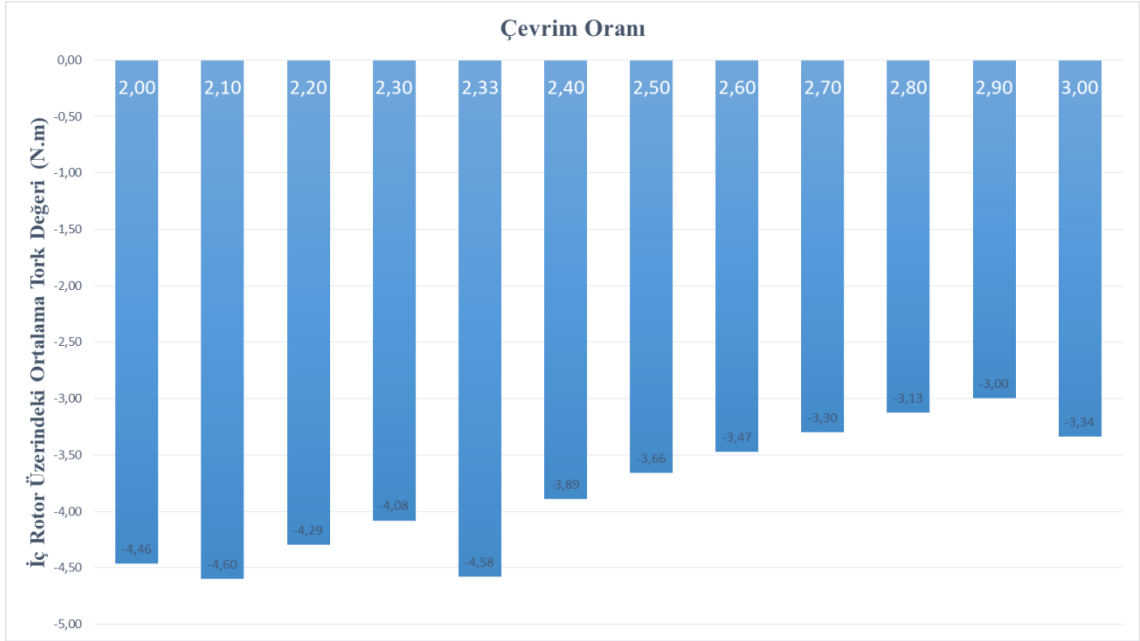


Şekil 4.1 Tam sayı olmayan çevrim oranlarının iç rotor üzerindeki aksel tork değerine etkisi

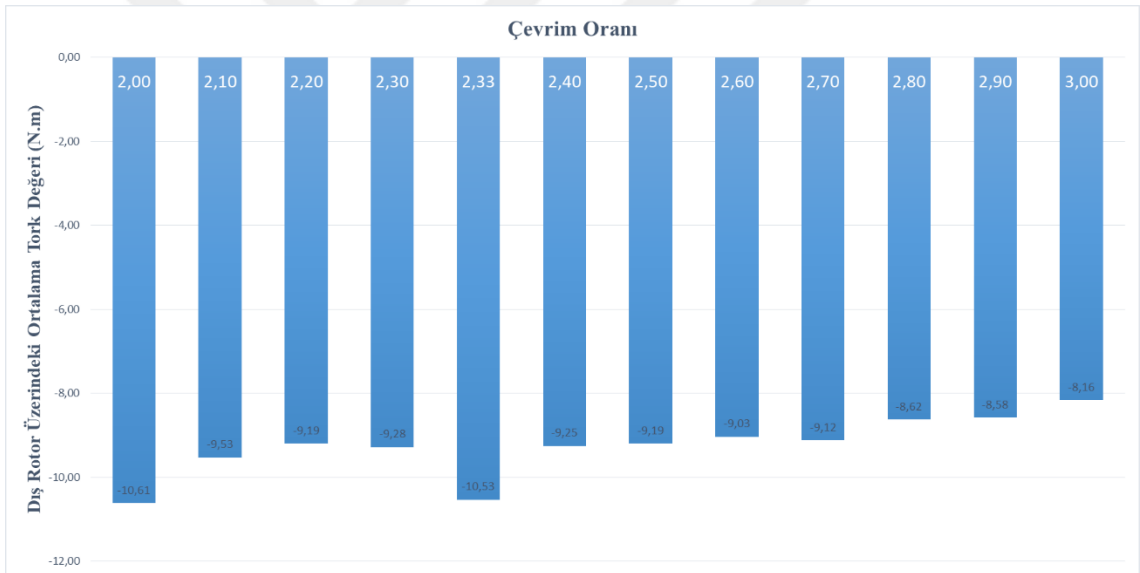


Şekil 4.2 Tam sayı olmayan çevrim oranlarının iç rotor üzerindeki aksel tork değerine etkisi

Yukarıdaki Şekil 4.1 ve 4.2 de görülmüştür ki, çevrim oranı tam sayı olduğunda, aksel tork değerlerinde ripple çok artmaktadır. Rotorlar üzerinde bulunan ortalama tork değerleri de Şekil 4.3 ve 4.4 verilmektedir.



Şekil 4.3 İç rotor üzerindeki ortalama aksenal tork değişimi



Şekil 4.4 Dış rotor üzerindeki ortalama aksenal tork değişimi

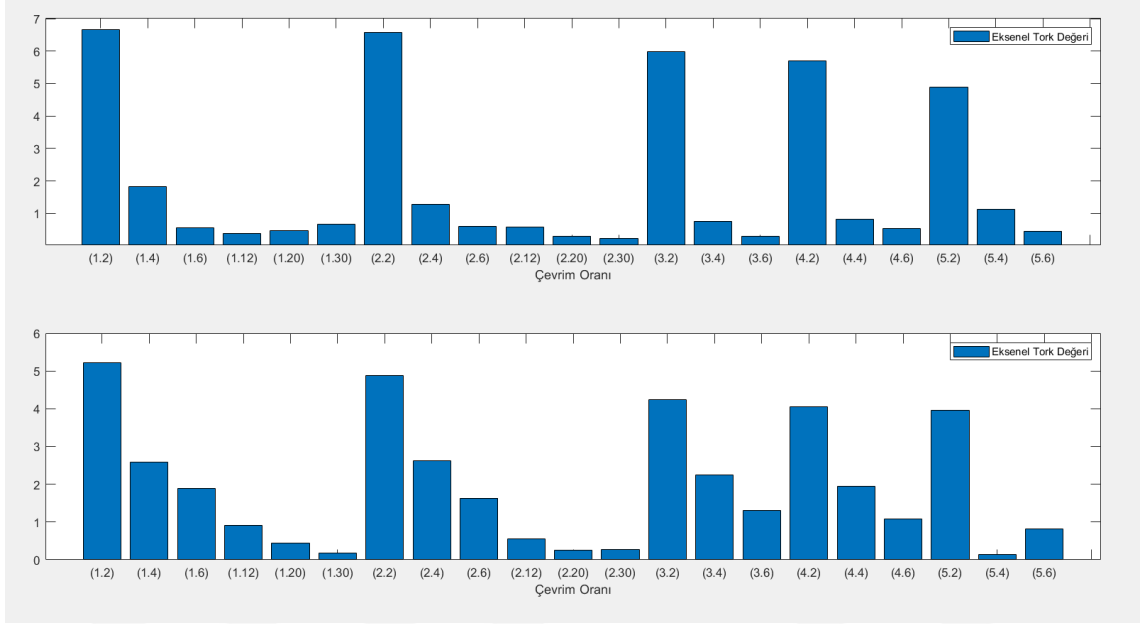
Yukarıdaki şekillerde çevrim oranının tam sayı ya da doğal sayı olmasının ripple etkisinin yanında, çevrim sayısı artışıyla ortalama aksenal tork değerlerinde de bir azalma görülmüştür.

Yapılan bir sonraki çalışmada iç rotor üzerinde bulunan mıknatıs sayısı parametre olarak girilmiş, çevrim oranları tam sayı kabul edilmiştir, dış rotor üzerindeki mıknatıs sayısı denklem 12 'ye uyularak belirlenmiş ve modülatör sayısı denklem 11'deki gibi hesaplanmıştır. Böylece farklı çevrim oranlarında rotorlar üzerinde aksenal tork değerindeki değişim incelenmiştir. Bu çalışmadan incelenen dişliler ;

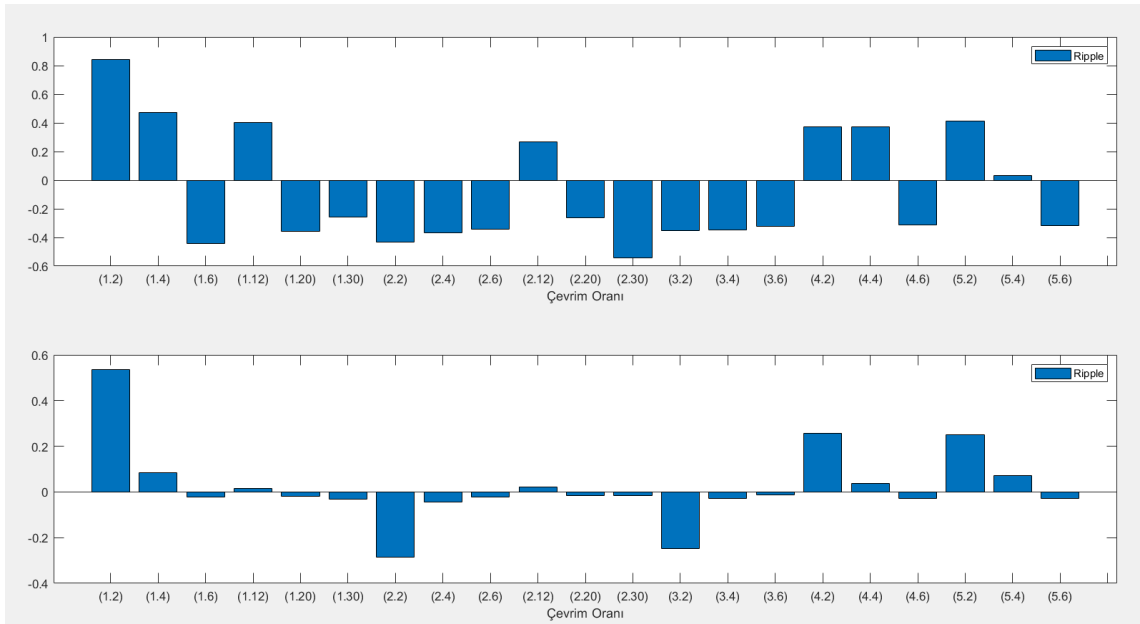
(İç rotor üzerinde bulunan mıknatıs sayısı, Çevrim oranı)

Notasyonuna göre isimlendirilip, çalışmaya böyle devam edilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda Şekil 4.5 ve 4.6 de verilmiştir.



Şekil 4.5 İç mıknatıs sayısı ve çevrim oranının eksenel tork değerine etkisi

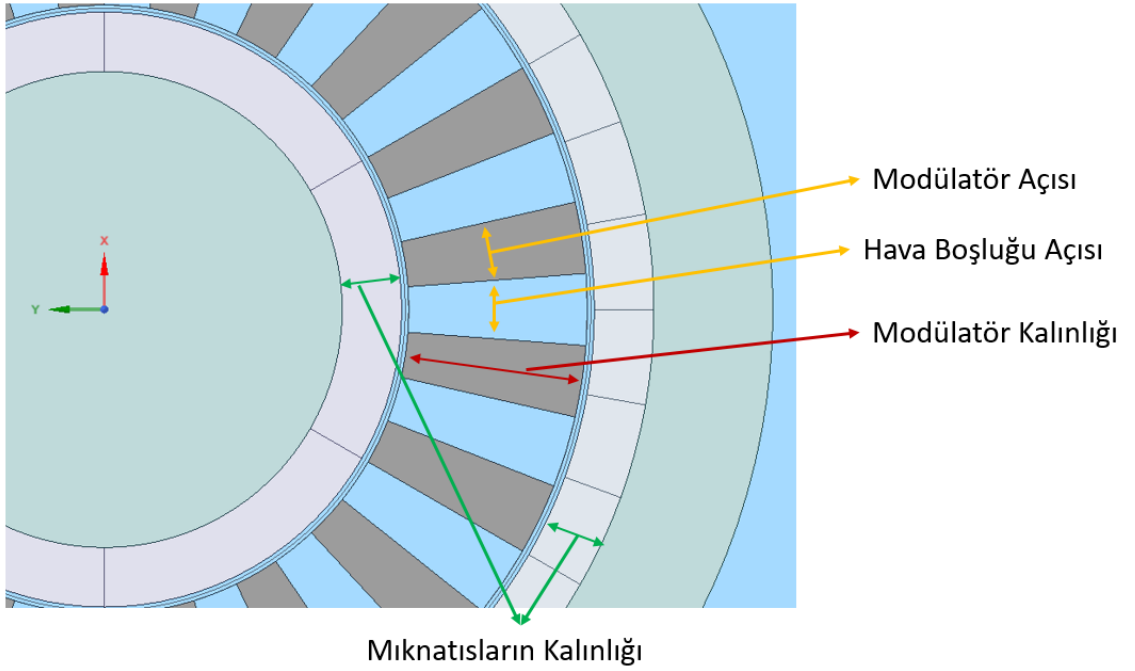


Şekil 4.6 İç mıknatıs sayısı ve çevrim oranının ripplede'a etkisi

Yapılan çalışma sonucunda iç rotor üzerindeki mıknatis sayısının artışı aksel tork değerini azaltırken, ripple a çok bir etkisi olmamaktadır. Benzer şekilde incelediğimizde, çevrim oranındaki artışın aksel tork değerine azaltıcı bir etkisi olurken ripple'a da azaltıcı bir etkisi olmaktadır.

4.2 Taguchi Metodu ile Boyutlandırma Optimizasyonu

Bu çalışmada iç ve dış rotordaki aksel torka, modülatörün genişlik/boşluk oranının, modülatörün uzunluğunun, iç rotor mıknatis çifti sayısının ve mıknatislerin uzunluğunun etkisi incelenmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Optimizasyon ile incelenecek parametreler

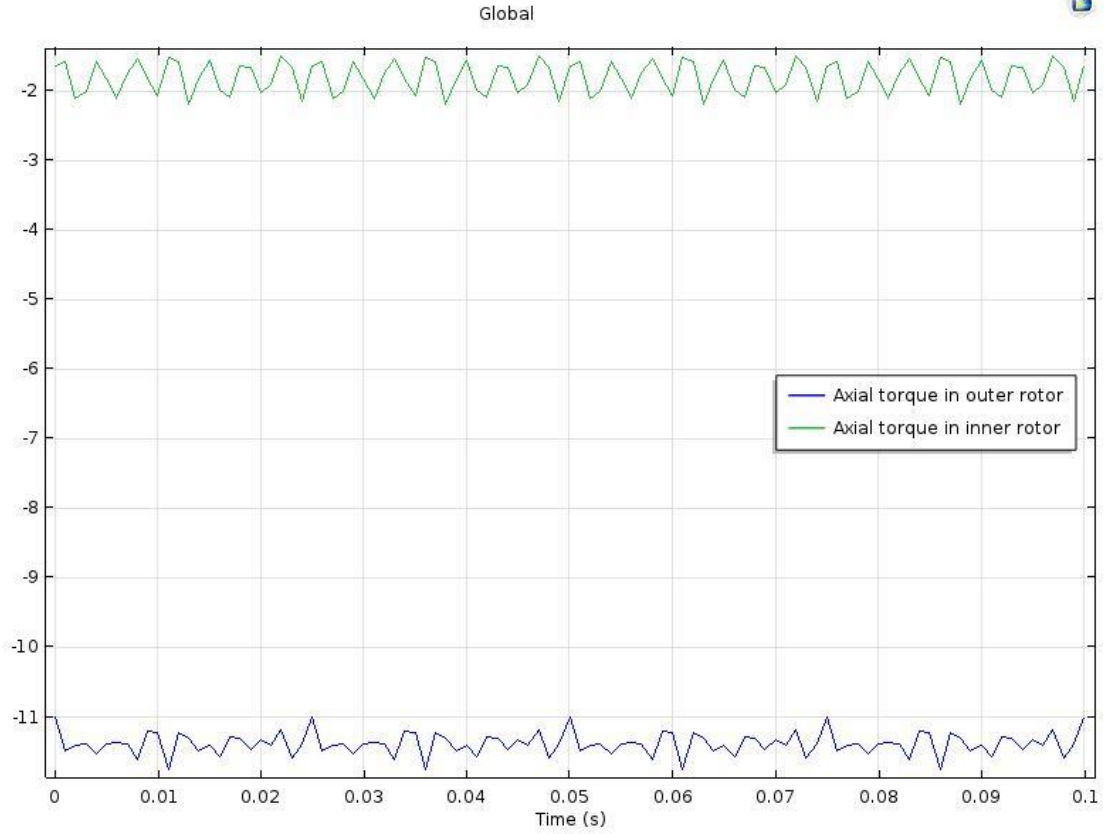
Çalışmada etkin analiz sayısı ve analiz sonuçlarının kendi içinde karşılaştırılabilmesi için taguchi metodu kullanılmıştır. Bunun için öncelikle aşağıdaki tablo oluşturulmuştur (Tablo 4.1).

Tablo 4-1 Taguchi optimizasyonu için oluşturulmuş sırasıyla analiz edilecek dişli parametreleri

| Deney No | İç Magnet Çifti Sayısı | Modülatör Kalınlığı (mm) | İç Rotordaki Mıknatıs Kalınlığı (mm) | Modülatörün/ Hava Boşluğa oranı |
|----------|------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 8 | 5 | 3 | 0,5 |
| 2 | 8 | 10 | 5 | 1 |
| 3 | 8 | 15 | 8 | 2 |
| 4 | 8 | 20 | 12 | 0,75 |
| 5 | 4 | 5 | 5 | 2 |
| 6 | 4 | 10 | 3 | 0,75 |
| 7 | 4 | 15 | 12 | 0,5 |
| 8 | 4 | 20 | 8 | 1 |
| 9 | 2 | 5 | 8 | 0,75 |
| 10 | 2 | 10 | 12 | 2 |
| 11 | 2 | 15 | 3 | 1 |
| 12 | 2 | 20 | 5 | 0,5 |
| 13 | 6 | 5 | 12 | 1 |
| 14 | 6 | 10 | 8 | 0,5 |
| 15 | 6 | 15 | 5 | 0,75 |
| 16 | 6 | 20 | 3 | 2 |

COMSOL programında 2 boyutlu Magnetic field (mf) modu kullanılarak, zaman bağılı bir sonucu elemanlar analizi yapılmıştır. Çevrim oranı 6 belirlenerek, dışarıdaki mıknatıs sayısı ve modülatör sayısı girilen iç mıknatıs sayısına göre bulunmuştur. Örneğin iç mıknatıs çifti sayısı 4 olan bir dişlinin dış rotordaki mıknatıs çifti sayısı 24, modülatör sayısı 28 olarak belirlenmiştir.

Analizin sonucunda iç ve dışarıdaki rotordaki eksenel tork değerleri bulunmuştur.



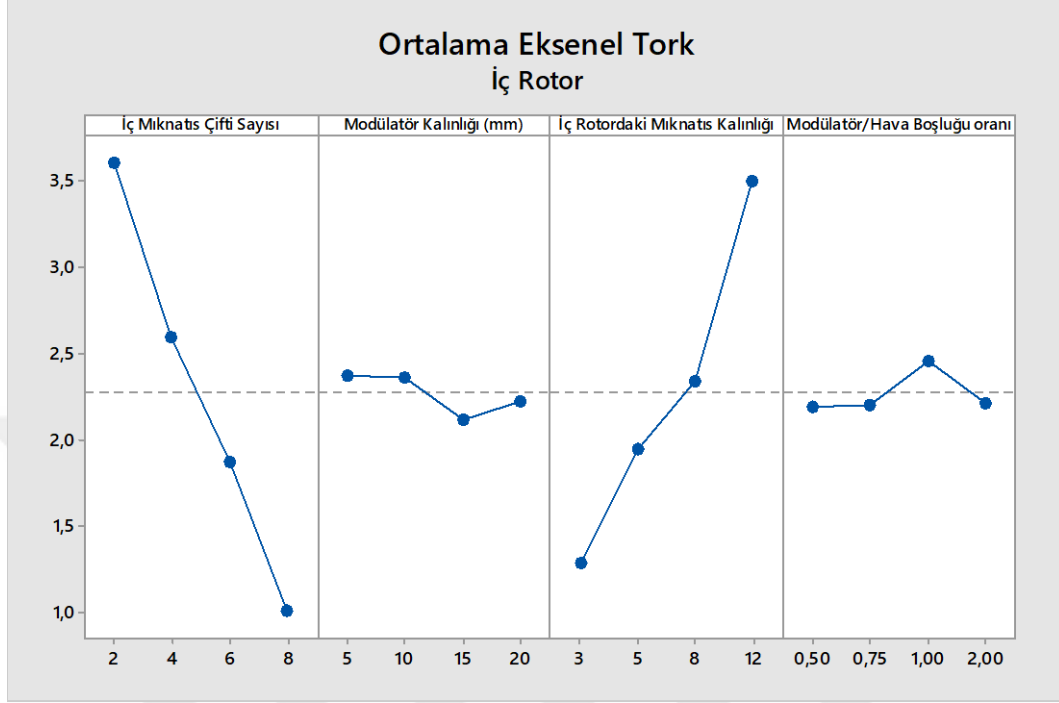
Şekil 4.8 Deney No 4 Sonucunda Bulunan Grafik

Analizlerden elde edilen iç rotor ve dış rotor için tork değerlerinin ortalaması ve tork dalgacığı (ripple) değerleri bulunmuştur (Tablo 4.2) .

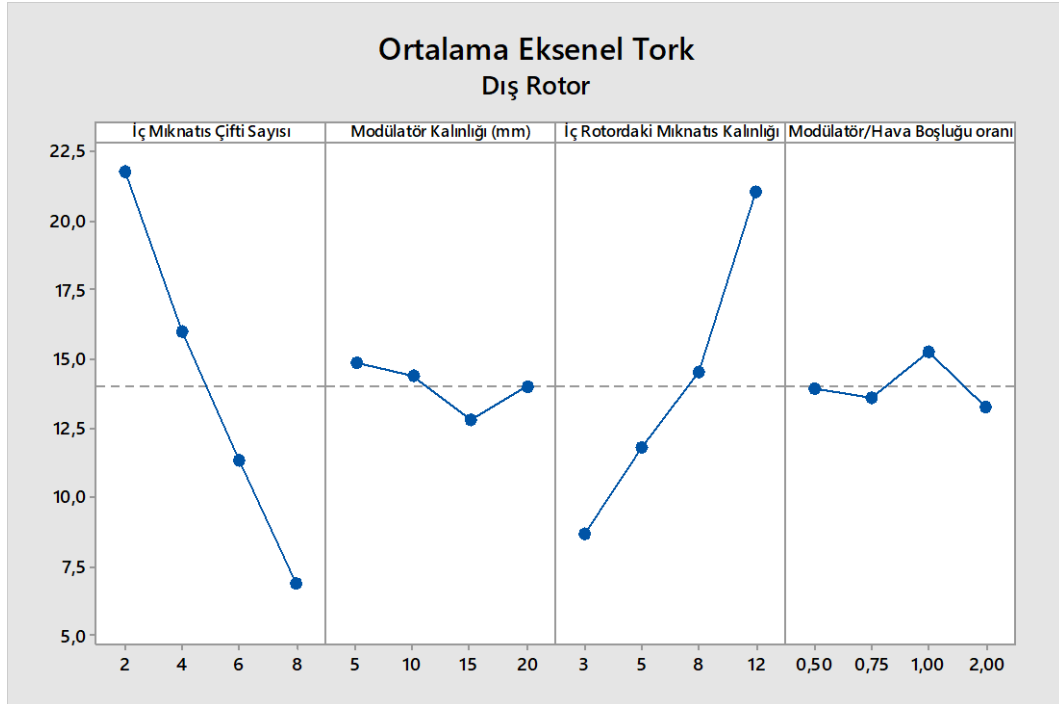
Tablo 4-2 Yapılan analiz sonucunda bulunan değerler

| Deney No | Eksenel Tork (iç rotor) | Eksenel Tork (Dış rotor) | Tork Dalgacığı (dış rotor) | Tork Dalgacığı (iç rotor) |
|----------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 1 | 0,22409 | 4,32215 | 0,959824 | 0,020542 |
| 2 | 1,01366 | 6,06686 | 0,314419 | 0,0705953 |
| 3 | 0,96703 | 5,69205 | 0,26638 | 0,0565746 |
| 4 | 1,81278 | 11,38947 | 0,383436 | 0,0670337 |
| 5 | 2,00201 | 11,75350 | 0,200144499 | 0,028924372 |
| 6 | 1,72221 | 10,95633 | 0,336502731 | 0,042768456 |
| 7 | 3,64368 | 21,56700 | 0,447971845 | 0,032349252 |
| 8 | 2,99527 | 19,74869 | 0,34584858 | 0,03163747 |
| 9 | 3,76930 | 22,53314 | 0,511834 | 0,0158288 |
| 10 | 5,05682 | 30,42248 | 0,189258 | 0,0146766 |
| 11 | 2,34001 | 14,42935 | 0,427677 | 0,025343 |
| 12 | 3,25603 | 19,70364 | 0,370286 | 0,0294804 |
| 13 | 3,48758 | 20,72635 | 0,312616674 | 0,013721259 |
| 14 | 1,64268 | 10,00020 | 0,384450757 | 0,047426987 |
| 15 | 1,51271 | 9,56942 | 0,300572381 | 0,048339194 |
| 16 | 0,83400 | 5,11072 | 0,274901969 | 0,056178796 |

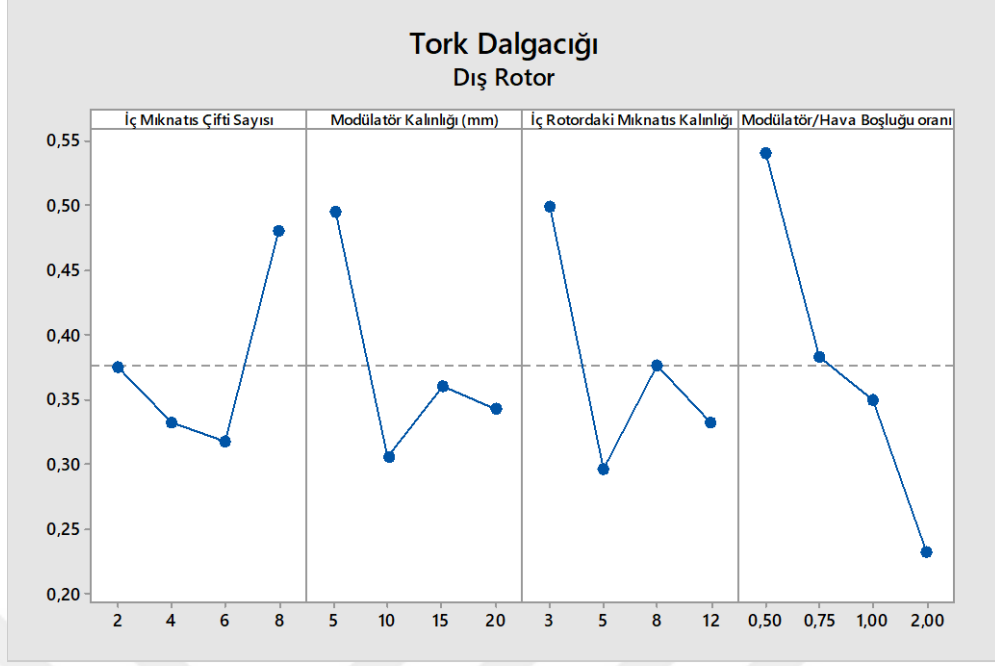
Değişkenlerin sonuca etkisini görmek için Minitab programı kullanılarak taguchi optimizasyon dizaynının ANOVA çözümü yapılmıştır. Taguchi çözümünden sonra aşağıdaki şekiller elde edilmiştir (Şekil 4.9 – 4.12).



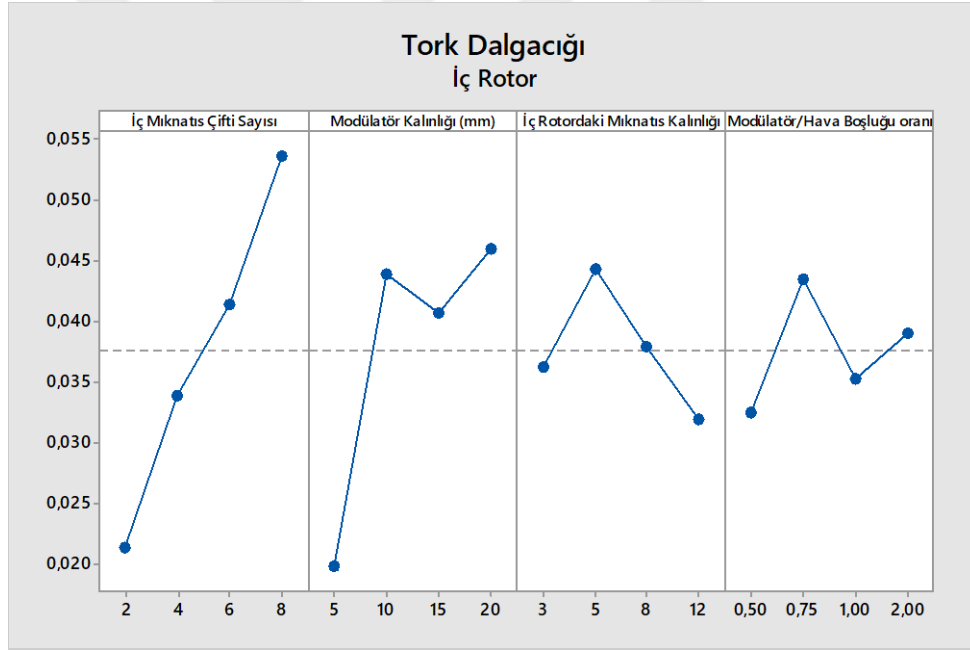
Şekil 4.9 Optimizasyon parametrelerinin ortalama iç rotor üzerindeki eksenel tork değerine etkileri



Şekil 4.10 Optimizasyon parametrelerinin ortalama dış rotor üzerindeki eksenel tork değerine etkileri



Şekil 4.11 Optimizasyon parametrelerinin ortalama iç rotor üzerindeki tork dalgacığına (ripple) etkileri



Şekil 4.12 Optimizasyon parametrelerinin ortalama dış rotor üzerindeki tork dalgacığına (ripple) etkileri

Yapılan topoloji optimizasyonu çalışmasında iç mıknatıs çiftinin sayısının ortalama aksenal tork değerini azaltan bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Önceki optimizasyon çalışması ile benzer bir sonuç bulunmuştur. Buda genel olarak taguchi dizaynının ANOVA ile çözümünde bir hata yapılmadığını göstermektedir. Ekstra olarak iç mıknatıs çifti sayısının dış rotor üzerindeki ripple 1 arttıracak bir etkiye sahip olduğu da görülmüştür.

Modülatör kalınlığının arttırılmasının aksel tork değerine pek bir etkisi olmadığı görülmüştür. Çalışma bölgesine göre boyutunun değiştirilebilir olduğu anlaşılabilir. Fakat modülatör kalınlığının ripple a etkisi ile ilgili bir yorum yapılamamaktadır. Deney yapılan parametrenin örnek sayısı arttırılıp tekrar kontrol edilebilir.

Mıknatıslara modellemede manyetik alan yoğunluğu tanımladığımız için beklenildiği gibi mıknatısların kalınlığının artması aksel tork değerini arttırırken bu parametrenin ripple etkisi ile ilgili bir yorum yapılamamaktadır.

Rotorlar ve modülatör arasında tanımlanan hava boşluğu kalınlığının aksel tork değerine bir etkisi görülmezken, iç rotorda oluşan tork dalgacığının (ripple) azaltan bir etki göstermektedir.



5 SONUÇLAR

Yapılan tez çalışmasında, eş eksenli bir manyetik dişlinin medikal bir uygulamada kullanılmak için dizayn edilmesi sırasında dikkat etmesi gereken parametreler incelenmiştir.

İnceleme, bilgisayar üzerinde modellenen eş eksenli manyetik dişlinin, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmesi ile yapılmıştır.

Çalışmada optimizasyon işlemine geçilmeden önce literatürde yapılan bir manyetik dişli çalışmasından yola çıkılarak modellemede bulunulmuş ve daha sonra optimizasyon sırasında çözücü zamanını azaltmak için yapılan yaklaşımların doğruluğu incelenmiştir.

Yapılan bu incelemeler sonucunda eş eksenli manyetik dişli 2 boyutu modellenmiş, modülatör halkasına lineer malzeme modeli uygulanmış ve rotor açıları parametrik olarak değiştirilip kararlı bir şekilde çözdürülmüştür.

Daha sonra yapılan ilk optimizasyon çalışmasında iç mıknatıs sayısı ve çevrim oranının, ikinci optimizasyon çalışmasında modülatörün genişlik/boşluk oranının, modülatörün uzunluğunun, iç rotor mıknatıs çifti sayısının ve mıknatısların uzunluğunun eksenel torca ve tork dalgacığına(ripple) etkisi incelenmiştir.

Yapılan ilk optimizasyon çalışmasında, çevrim oranının tam sayı ya da doğal sayı olmasının ripple a etkisinin yanında, çevrim sayısı artışıyla ortalama eksenel tork değerlerinde de bir azalma görülmüştür, iç rotor üzerindeki mıknatıs sayısının artışı eksenel tork değerini azaltırken, ripple a çok bir etkisi olmadığı bulunmuştur. Benzer şekilde incelediğimizde, çevrim oranındaki artışın eksenel tork değerine azaltıcı bir etkisi olurken ripple'a da azaltıcı bir etkisi olmaktadır.

Yapılan ikinci optimizasyon çalışmasında, iç mıknatıs çiftinin sayısının ortalama eksenel tork değerini azaltan bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Önceki optimizasyon çalışması ile benzer bir sonuç bulunmuştur. Buda genel olarak taguchi dizaynının ANOVA ile çözümünde bir hata yapılmadığını gösterilmiştir. Ekstra olarak iç mıknatıs çifti sayısının dış rotor üzerindeki ripple ı arttıracak bir etkiye sahip olduğu da görülmüştür. Modülatör kalınlığının arttırılmasının eksenel tork değerine pek bir etkisi olmadığı görülmüştür. Çalışma bölgesine göre boyutunun değiştirilebilir olduğu anlaşılabilir. Fakat modülatör kalınlığının ripple a etkisi ile ilgili bir yorum yapılamamıştır. Deney yapılan parametrenin örnek sayısı arttırılıp tekrar kontrol edilebilir. Mıknatıslara modellemede manyetik alan yoğunluğu tanımladığımız için beklenildiği gibi mıknatısların kalınlığının artması eksenel tork değerini arttırırken bu

parametrenin ripple etkisi ile ilgili bir yorum yapılamamıştır. Rotorlar ve modülatör arasında tanımlanan hava boşluğu kalınlığının aksel tork değerine bir etkisi görülmezken, iç rotorda oluşan tork dalgacığını (ripple) azaltan bir etki gösterilmiştir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Yawei Wang, Mattia Filippini, Nicola Bianchi, Piergiorgio Alotto** A Review on MagneticGears: Topologies,Computational Models and Design Aspects
- H. Neuland, 1916**, “Apparatus for transmitting power,” U.S. Patent 1 171 351.
- S. Niu, S. L. Ho, and W. N. Fu, 2011**, “Performance analysis of a novel magnetic-gearred tubular linear permanent magnet machine,” IEEETransactions on Magnetics, vol. 47, no. 10, pp. 3598-3601.
- L. Jian, and K. T. Chau, 2009**, “Analytical calculation of magnetic field distribution in coaxial magnetic gears,” Progress in ElectromagneticsResearch, vol. 92, pp. 1-16.
- T. Lubin, S. Mezani, and A. Rezzoug, 2010**, “Analytical Computation of the magnetic field distribution in a magnetic gear,” IEEE Transactions onMagnetics, vol. 46, no. 7, pp. 2611-2621.
- L. Jian, K. T. Chau, W. Li, and J. Li, 2010**, “A novel coaxial magnetic gear using bulk HTS for industrial application,” IEEE Transactions onApplied Superconductivity, vol. 20, no. 3, pp. 981-984.
- C. Liu, K. T. Chau, and Z. Zhang, 2012**, “Novel design of double-stator single-rotor magnetic-gearred machines,” IEEE Transactions onMagnetics, vol. 48, no. 11, pp. 4180-4183.
- J. Rens, K. Atallah, S. Calverley, and D. Howe, 2010**, “A novel magnetic harmonic gear,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, no. 1, pp. 206-212.
- P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Jorgensen, and O. Nielsen, 2005**, “Development of a high-performance magnetic gear,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 3, pp. 764-770.
- X. Liu, K. T. Chau, J. Z. Jiang, and C. Yu, 2009**,“Design and analysis of interior-magnet outer-rotor concentric magnetic gears,” Journal ofApplied Physics, vol. 105. pp. 07F101:1-4.
- L. Jian, and K. T. Chau, 2010**, “A coaxial magnetic gear with Halbach permanent magnet arrays,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no. 2, pp. 319-328.
- M. Okano, K. Tsurumoto, S. Togo, N. Tamada, and S. Fuchino, 2002**,“Characteristics of the magnetic gear using a bulk high-Tcsuperconductor,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 12, no. 1, pp. 979-983.

KAYNAK DİZİNİ (DEVAMI)

- S. Pakdelian, N. W. Frank, and H. A. Toliyat, 2014**, “Magnetic design aspects of the trans-rotary magnetic gear,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, no. 1, pp. 41-

50.

- W. Bomela, J. Z. Bird, and V. M. Acharya, 2014**, “The performance of a transverse flux magnetic gear,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 1, pp. 4000104:1-4.
- H. T., Faus, 1941**, “Magnet gearing,” U.S. Patent 2 24. 555.
- K. Tsurumoto, and S. Kikuchi, 1987**, “A new magnetic gear using permanentmagnet,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 23, no. 5, pp. 3622- 3624.
- S. Kikuchi, and K. Tsurumoto, 1993**, “Design and characteristics of a new magnetic worm gear using permanent magnet,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29, no. 6, pp. 2923-2925.
- K. Ikuta, S. Makita, and S. Arimoto, 1991**, “Non-contact magnetic gear for micro transmission mechanism,” *Proceedings of IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 125-130.
- K. Ikuta, S. Makita, and S. Arimoto, 1991**, “Non-contact magnetic gear for micro transmission mechanism,” *Proceedings of IEEE Conference onMicro Electro Mechanical Systems*, pp. 125-130.
- Y. D. Yao, D. R. Huang, C. M. Lee, S. J. Wang, D. Y. Chiang, and T. F. Ying, 1997**, “Magnetic coupling studies between radial magnetic gears,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 33, no. 5, pp. 4236-4238.
- Y. D. Yao, D. R. Huang, C. C. Hsieh, D. Y. Chiang, S. J. Wang, and T. F. Ying, 1996**, “The radial magnetic coupling studies of perpendicular magnetic gears,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 32, no. 5, pp. 5061-5063.
- C. C. Huang, M. C. Tsai, D. G. Dorrell, and B. J. Li, 2008**, “Development of a magnetic planetary gearbox,” *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 44, no. 3, pp. 403-412.
- L. Jian, K. T. Chau, W. Li, and J. Li, 2010**, “A novel coaxial magnetic gear using bulk HTS for industrial application,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 20, no. 3, pp. 981-984.
- L. Jian, and K. T. Chau, 2010**, “Design and analysis of a magnetic-gearred electronic-continuously variable transmission system using finite References 220 element method,” *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 107, pp. 47-61.
- W. Li, and K.T. Chau**, “Analytical field calculation for linear tubular magnetic gears using equivalent anisotropic magnetic permeability,”

KAYNAK DİZİNİ (DEVAMI)

- L. Jian, and K. T. Chau, 2009**, “A novel electronic-continuously variable transmission propulsion system using coaxial magnetic gearing forhybrid electric vehicles,” *Journal of*

Asian Electric Vehicles, vol. 7, no. 2, pp. 1291-1296.

L. Jian, and K. T. Chau, 2010, “A coaxial magnetic gear with Halbach permanent magnet arrays,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no. 2, pp. 319-328.

P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, 2005, F. T. Jorgensen, and O. Nielsen, “Development of a high-performance magnetic gear,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 3, pp. 764-770.

X. Liu, K. T. Chau, J. Z. Jiang, and C. Yu, 2009, “Design and analysis of interior-magnet outer-rotor concentric magnetic gears,” Journal of Applied Physics, vol. 105. pp. 07F101:1-4.

E. P. Furlani, 1993, “Formulas for the force and torque of axial couplings,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 29, no. 5, pp. 2295-2301.

R. M. Hornreich, and S. Shtrikman, 1978, “Optimal design of synchronous torque couplers,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 14, no. 5, pp. 800-802.

W. Wu, H. C. Lovatt, and J. B. Dunlop, 1997, “Analysis and design optimization of magnetic couplings using 3D finite element modeling,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, no. 5, pp. 4083-4085.

L. Jian, and K. T. Chau, 2009, “Design and analysis of an integrated Halbachmagnetic- geared permanent-magnet motor for electric vehicles,” Journal of Asian Electric Vehicles, vol. 7, no. 1, pp. 1213-1219.

W. Li, and K. T. Chau, 2010, “A linear magnetic-gear free-piston generator for range-extended electric vehicles,” Journal of Asian Electric Vehicles, vol. 8, no. 1, pp. 1345-1349.

J. Li, K. T. Chau, and W. Li, 2011, “Harmonic analysis and comparison of permanent magnet vernier and magnetic-gear machines,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 10, pp. 3649-3652.

Walzer, I., 2002, Design, Analysis and Application of Magnetic Variable Gears.

In Proceedings of International Conference on Electrical Machines, Technological Trends in Large Permanent Magnet Motor Applications. ICEM'02, Brygge, Belgium. On CD-ROM.

Campbell, P., 1994. Permanent Magnet Materials and their Applications. Cambridge: University Press, p. 207.

KAYNAK DİZİNİ (DEVAMI)

Atallah, K. & Howe, D. (2001). A novel high performance magnetic gear. IEEE Transactions on Magnetics, Vol:37 No:4 pp:2844-2846.

- Rasmussen, P. O., Andersen, T. O., Jorgensen, F. T., & Nielsen, O.** (2005). Development of a high-performance magnetic gear. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume:41, Issue:3 (pp. 764-770). IEEE.
- Atallah, K., Calverley, S. D., & Howe, D.** (2004). High-performance magnetic gears. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 272, E1727-E1729.
- Atallah, K., Wang, J., & Howe, D.** (2005). A high-performance linear magnetic gear. *Journal of Applied Physics, magnetism and magnetic materials*, 97(10), 10N516.
- Hafla, W., Buchau, A., Rucker, W. M., Weinlader, A., & Klotz, B.** (2007). Efficient design analysis of a novel magnetic gear on a high performance computer. *COMPEL-The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 26(3), 712-726.
- F. J. P.O. Rasmussen, T.O. Anderson and O. Nielsen**, 2003, "Development of a high performance magnetic gear," in *Conference Record of the 38th IAS Annual Meeting in Industry Applications*, vol. 3.
- A. B. W. Hafla and W. Rucker**, 2007, "Efficient design analysis of a novel magnetic gear on a high performance computer," *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 712–726.
- N. Frank and H. Toliyat**, 2009, "Gearing ratios of a magnetic gear for marine applications," in *IEEE Electric Ship Technologies Symposium, ESTS..*
- N. Frank and H. Toliyat**, 2009, "Gearing ratios of a magnetic gear for wind turbines," in *IEEE International Electrical Machines and Drives Conference, IEMDC'09..*
- S. C. J. Rens, K. Atallah and D. Howe**, 2007, "A novel magnetic harmonic gear," in *IEEE International Electric Machines & Drives Conference IEMDC '07*, 2007.
- G. Reese**, 1967, "Magnetic gearing arrangement," US Patent 3 301 091.
- A. Neuland**, 1916, "Apparatus for transmitting power," US Patent 117 1351.
- Araştırma ve Geliştirme San. Tic LTD. Şti**,
<http://www.miknatis.net/miknatis/tr/urunlerimiz/73/neodimyum-miknatislar>, (Erişim tarihi 26.07.2019)
- Armstrong Magnetics, Inc.**, "B-H Curves for Ceramic, Samarium Cobalt or Neodymium Magnets" <https://www.armsmag.com/news-B-H-curve-neodymium-magnets.html> (erişim tarihi 26.07.2019)

TEŐEKKÜR

Bu çalışmanın baőlangıcından sonuna kadar her aőamada beni destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Aysun Baltacı ve Dr. Öğr. Üyesi Oğuz Gürses'e, tezimin biçimlenmesinde katkılarından dolayı Akıllı Yapılar Laboratuvarında alıőan arkadaşlara ve öğretim hayatım boyunca beni bugünlere getirmek için her türlü zorluğa katlanan ve desteklerini bir an olsun bırakmayan annem ve babama sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

01 / 10 / 2019

Hasan Aykut AYDIN

ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Manisanın Akhisar ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğretimini tamamladıktan sonra liseyi Akhisar Anadolu Lisesinde tamamladı. 2010 yılında Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümüne başladı. 2015 yılında bu bölümden mezun olup 2016 yılı ocak ayında yüksek lisans eğitimine başladı. 2016 yılında Tübitak 1005 programı dahilindeki “Manyetoreolojik bir El Rehabilitasyon Geliştirilmesi” projesinde bursiyer olarak çalıştı. 2018 yılında proje tamamlandıktan sonra Bosch Termoteknik firmasında 1 yıl yarı zamanlı olarak çalıştı. 2019 yılından itibaren de BMC Otomotiv’de Arge Mühendisi olarak çalışmaktadır.

