



**OTOMATİK KAPISİSTEMLERİN YENİ
BİR DÖRNEĞİ OLARAK TASARIMI**

Yusuf AVAR

Yüksek Lisans

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ahmet FENERCİ OĞLU

2012

Her hakkı saklıdır.

T.C.
GAZ OSMANPA A ÜN VERS TES
FEN B L MLER ENST TÜSÜ
MEKATRON K MÜHEND SL ANAB L M DALI

YÜKSEK L SANS TEZ

OTOMAT K KAPI S STEMLER Ç N YEN B R DO RUSAL
EYLEY C TASARIMI

YUSUF AV AR

TOKAT
2012

Her hakkı saklıdır

Yrd. Doç. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU danışmanlığında, Yusuf AVŞAR tarafından hazırlanan bu çalışma 02/10/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU

İmza:



Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKAR

İmza :

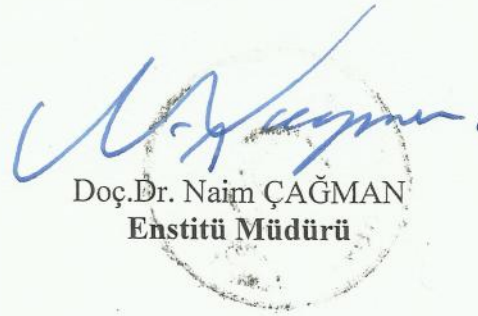


Üye : Yrd. Doç. Dr. A. Hakan YAVUZ

İmza :



Yukarıdaki Sonucu Onaylarım



Doç. Dr. Naim ÇAĞMAN
Enstitü Müdürü

19./10./2012

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, kaynaklarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Yusuf AVAR

ÖZET

Y. Lisans Tezi

OTOMATİK KAPI SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR DOĞRUSAL EYLEYİCİ TASARIMI

Yusuf AVŞAR

Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU

Bu çalışmada; klasik otomatik kapı sistemlerinde döner motorun hareketinin doğrusal harekete dönüştürülmesinde kullanılan dişli, zincir, halat, kayış ve kasnak gibi kayıplara ve arızaya neden olan ve bakım gerektiren mekanizmaların dezavantajlarını ortadan kaldırmak amacıyla hareketi bir mekanizma kullanmadan doğrudan tahrik yöntemiyle manyetik olarak kapıya aktarabilen yeni bir doğrusal eyleyicinin tasarımını yapmak ve uygulamaktır. Bu amaç doğrultusunda otomatik kayar kapı sistemlerinde kullanılmak üzere enine manyetik akılı, EI nüvelerin kullanıldığı, modüler kutup yapısına sahip 6/4 kutup oranında 3 fazlı bir doğrusal anahtarlama relüktans motor (DARM) tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Öngörülen tasarım aktif stator, pasif translatörden oluşmaktadır. Modüler yapıya sahip oldukları için bakım ve arıza durumunda bu parçalar kolaylıkla düzeltilebilir ve düşük maliyet sağlar. Ayrıca doğrusal hareket mesafesi, tasarımı değiştirmeden yeni translatör kutupları ekleyerek uzatılabilir. Hareket doğrudan tahrikle manyetik olarak kapıya aktarıldığı için bu sistemlerde kayıplar düşüktür ve periyodik bakım gerektirmez. Tez içerisinde genel ARM ve doğrusal ARM lerin yapıları ve teorisi hakkında genel bilgiler verilmiştir. Öngörülen tasarım sonlu elemanlar yöntemi ile statik manyetik ve yapısal analizleri yapılarak, kuvvet, endüktas, manyetik akı, deformasyon, esneme gibi parametrelerin simülasyonları yapılmıştır. Elde edilen veriler analitik olarak hesaplanarak analiz sonuçları ile doğrulanmıştır. Tasarımı öngörülen eyleyici bir prototip olarak imal edilerek otomatik kapı sistemine uygulanmıştır. Sistemi denetleyecek bir sürücü devresi tasarımı ile eyleyicinin kontrolü sağlanmıştır. Uygulama üzerinde deneyler yapılarak sistemin performansı elde edilmiştir.

2012, 87 sayfa

Anahtar kelimeler: Anahtarlama Relüktans Motorlar, Doğrusal Anahtarlama Relüktans Motorlar, Otomatik Kapı Sistemleri, Sonlu Elemanlar Analizi.

ABSTRACT

Ms Thesis

DESIGN OF A NOVEL LINEAR ACTUATOR FOR AUTOMATIC DOOR SYSTEMS

Yusuf AVŞAR

Gaziosmanpasa University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechatronics Engineering

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Ahmet FENERCİOĞLU

In this study, in order to eliminate the disadvantages of the gear, chain, rope, belt and pulley used to convert rotary movement of the motor to linear movement in the conventional automatic door systems, a new linear actuator that can transfer the movement to door directly and magnetically without using a mechanism, has been designed and implemented. For this purpose, a linear switched reluctance motor (LSRM) that has got modular structure of a 6/4 pole with 3-phase and used EI cores that can be used in automatic sliding door systems, designed and implementation was done. The projected design consists of active stator and passive translator. These components can be easily repaired in the failure and maintenance cases and has got low cost because of their modular structure. In addition, linear movement distance can be extended by adding new translator poles without changing design. In this system losses are lower and it doesn't required periodic maintenance because the movement is transmitted directly to the door. In this thesis, general informatons are given about general SRM and linear SRM's structures and theory. The static, magnetic and structural analyses were done with finite element analysis and such force, enductance, magnetic flux, deformation, yawning parameters were simulated. The obtained data were confirmed with the analytical results. The foreseen actuator was applied to automatic door system that manufactured as a prototype. The actuator's control was provided with a driver circuit that will check it. The system performance was obtained with experiments on the application.

2012, 87 pages

Keywords: Switched Reluctance Motors, Linear Switched Reluctance Motors, Automatic Door Systems, Finite Element Analysis.

ÖNSÖZ

Tez konumun belirlenmesi a amasından savunma a amasına kadar her a amada bilgi, görgü ve deneyimini her zaman yanımda hissetti im danı manım Yrd. Doç. Dr. Ahmet FENERC O LU'na sonsuz te ekkür ederek ba lamak istiyorum. Bu uzun çalı ma da tüm laboratuar i lerimde bana herhangi bir kar ılık beklemeden destek olan Mekatronik Mühendisli i bölüm hocalarıma, tez yazımında bana destek olan Ar . Gör. Mücahit SOYASLAN'a, Ar . Gör. Cemil KÖZKURT'a ve Ar . Gör. Mustafa EKER'e, mekanik tasarımda bana destek olan teknisyen Gökhan GÜLHAN'a ve kontrol kartının tasarımında bana destek olan Ö r. Gör. Ebubekir YA AR'a minnettarlı ımı belirtmek isterim.

Hayatımın her döneminde öncelikleri ben oldu um için bu günlere gelmeme neden olan sevgili babam Ömer AV AR'a ve annem Fadime AV AR'a karde lerim Derya AV AR ve S. Emre AV AR'a minnettarlı ımı belirtmek isterim. Gerek lisans ve gerekse yüksek lisans e itimim esnasında deste ini ve samimiyetini her zaman yanımda hissettiren Eda ÇAKIR'a da sonsuz te ekkür ederim.

Yusuf AV AR

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM).....	4
2.1.1. Anahtarlamalı Relüktans Motorların Temelleri.....	5
2.1.2. Anahtarlamalı Relüktans Motorların Yapısı ve Çalışması	6
2.1.3. İndüktans ve Torkun Rotor Konumu ile İlişkisi	8
2.1.4. Anahtarlamalı Relüktans Motorların Enerji Dönüşümü Prensipleri.....	12
2.1.5. Anahtarlamalı Relüktans Motorların Eşdeğer Devresi	14
2.1.6. Anahtarlamalı Relüktans Motorlar için Sürücü Seçimi	16
2.2. Doğrusal Anahtarlamalı Relüktans Motorlar.....	18
2.2.1. Doğrusal Anahtarlamalı Relüktans Motorların Temelleri	19
2.2.2. Doğrusal Anahtarlamalı Relüktans Motorların Yapısı ve Çalışması.....	20
3. MATERYAL VE YÖNTEM	23
3.1. 3D Tasarım ve Simülasyonlar.....	23
3.2. Sonlu Elemanlar Analizi.....	24
3.2.1. Dört yüzlü Eleman (tetrahedra)	26
3.2.2. Ağ Artırımı (Mesh Refinement)	27
3.3. Ansoft Maxwell 3D Alan Simülatörü.....	28
3.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapısal Analiz.....	29
3.4.1. Yapısal Analiz Simülatörü.....	29
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	32
4.1. Doğrusal Eyleyicinin Bilgisayar Destekli Tasarımı	32
4.1.1. Stator, Translatör ve Bobinin 3D Tasarımları	32

4.1.2. Doğrusal Eyleyicinin Tasarımı	35
4.1.3. Kapı Tasarımı	41
4.1.4. Montaj.....	42
4.2. Öngörülen Doğrusal Eyleyicinin Statik Manyetik Analizi.....	43
4.2.1. Malzeme Tanımlamaları	44
4.2.2. Terminal Tanımlamaları ve Akım Yoğunluğu	45
4.2.3. Çözüm Parametrelerinin Tanımlanması	46
4.2.4. Çözüm Süreci.....	47
4.2.5. Statik Manyetik Analiz Sonuçları.....	48
4.2.6. Statik Manyetik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	56
4.3. Doğrusal Eyleyicinin Yapısal Analizi	57
4.3.1. Translatör Kutbunun Yapısal Analizleri.....	58
4.3.2. Otomatik Kapının Eyleyicisinin Yapısal Analizleri	67
4.4. Doğrusal Eyleyicinin Sürücü Tasarımı	70
4.4.1. Mikrodenetleyici Tabanlı Kontrol	72
4.4.2. PWM ile Anahtarlama	73
4.4.3. Klasik Köprü Tipi Konvertör.....	74
4.4.4. MOSFET Konvertör Tasarımı	75
4.4.5. Akım- Zaman Diyagramı.....	76
4.5. Öngörülen Sistemin Prototip Olarak İmalatı	77
4.5.1. Doğrusal Motorun Gerçekleştirilmesi	78
4.5.2. Kontrol Kartının Gerçekleştirilmesi	80
4.5.3 Doğrusal Eyleyicinin Faz İndüktans Karakteristiği.....	81
5. SONUÇ	82
ÖZGEÇMİŞ	87

SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
E	Elektrik alanı (V/m)
e	Emk (V)
i	Akım (ani değer) (A)
L	İndüktans (H)
L_a	Düz ARM örtüsen, maksimum indüktans (H)
L_u	Düz ARM örtüsmeyen, minumum indüktans (H)
μ	Manyetik geçirgenlik (H/m)
P_g	Hava aralığı gücü (W)
P_i	Giris gücü (W)
R	Faz direnci (ohm)
t	Zaman(s)
v	Sargıda düşen gerilim (V)
W	Enerji (J)
λ	Sargı bağ (halka) akısı (wb)
θ	Rotorun açısai pozisyonu (radyan, derece)
l_{sp}	Stator kutup uzunluğu
l_{sy1}	Stator bacak eni 1
l_{sy2}	Stator bacak eni 2
l_{tp}	Translatör kutup uzunluğu
h_{sp}	Stator kutup yüksekliği
h_{sy}	Stator bacak yüksekliği
h_{tp}	Translatör kutup yüksekliği
l_g	Hava aralığı
w_{sp}	Stator kutup boşluğu
w_{tp}	Translatör kutup genişliği
w_{tg}	Translatör kutup boşluğu
m	Faz sayısı
n_{sp}	Stator kutup sayısı
n_{tp}	Translatör kutup sayısı

l_s	Stator uzunluğu
R_{s1}	1. bacak E stator nüvenin manyetik direnci
R_{s2}	2. bacak E stator nüvenin manyetik direnci
R_{sj}	Ortak stator E nüvenin manyetik direnci
R_{gl}	Hava aralığı manyetik direnci
R_{gj}	Ortak hava aralığı manyetik direnci
R_{tl}	I translötör nüvenin manyetik direnci
F	Manyetomotor kuvvet
ϕ	Toplam manyetik akı
N	Bir bobinin tur sayısı

Kısaltmalar

Açıklama

ARM	Anahtarlamaalı Relüktans Motor
SRM	Switched Reluctance Motor
LSRM	Lineer Switched Reluctance Motor
DARM	Doğrusal Anahtarlamaalı Relüktans Motor
VRM	Variable Reluctance Motors
AA	Alternatif Akım
DA	Doğru Akım
AC	Alternative Current
DC	Direct Current
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
PWM	Pulse Width Modulation
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
3D	3 Dimension
CAD	Computer Aided Design
MAGLEV	Magnetic Levitation
NASTRAN	National Aeronautics and Space Administration Structural Analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. 6/4 ARM'nin Üç Boyutlu Görünümü.....	6
Şekil 2.2. Stator kutup ve rotor kutup sayısına göre ARM çeşitleri	7
Şekil 2.3. Anahtarlama relüktans motorun çalışması	8
Şekil 2.4. Sargı akımı ve rotor konumlarına göre bir faz indüktansını.....	9
Şekil.2.5. Çakışık (aligned) Pozisyon.....	10
Şekil 2.6. Rotorun ortalanmış (unaligned) konumu.....	10
Şekil 2.7. Mıknatıslanma Eğrileri	11
Şekil 2.8. Rotor pozisyonuna karşı indüktansın değişim eğrisi.....	12
Şekil 2.9. Çift çıkıntılı ARM'nin enerji dengesi modeli	12
Şekil 2.10. ARM'nin bir faz eşdeğer devresi	15
Şekil 2.11. Üç Fazlı Bir ARM için 2n Tipi Klasik Köprü Sürücü Devresi.	18
Şekil 2.12. 6/4 Kutuplu DARM ve ARM	19
Şekil 2.13. Üç Faz, Tek Yanlı DARM için Hizalanmış Konumda Akı Dağılımı.	20
Şekil 2.14. Üç Faz, Çift Yanlı DARM için Hizalanmış Konumda Akı Dağılımı	21
Şekil 2.15. Yüksek Kuvvet Değerleri Üretebilen DARM	22
Şekil 2.16. Düzlemsel Hareket Gerçekleştiren DARM	22
Şekil 3.1. Sonlu Elemanlar yöntemiyle çözülmüş bir 6/4 ARM ağ görünüşü.....	25
Şekil 3.2. Dörtüzlü eleman (tetrahedra).....	26
Şekil 3.3. Dörtüzlü elemanlardan oluşan ağ artırımı	28
Şekil 4.1. Stator, translatör ve bobinlerin farklı şekillerde 3D tasarımları	33
Şekil 4. 2. Tasarlanan doğrusal eyleyicinin ölçeklendirilmesi	34
Şekil 4. 3. Tasarlanan eyleyicinin yapısı	35
Şekil 4.4. Çift yanlı (double sided) stator ile tasarlanmış eyleyici	36
Şekil 4.5. Yatay translatörlerle ile dışarıdan raylı tasarlanmış eyleyici	38
Şekil 4.6. Yatay translatörlerle ile tasarlanmış eyleyici;	40
Şekil 4.7. Kapı tasarımı	41
Şekil 4.8. Otomatik kapı sisteminin tasarımı.....	42
Şekil 4.9. Çelik 1010 BH eğrisi	44
Şekil 4.10. Malzeme tanımlama menüsü.....	44
Şekil 4.11. Terminaller ve akım yönleri	45

Şekil 4.12 Translatör bölgesine kuvvet tanımlanması	46
Şekil 4.13. İndüktans matrisinin tanımlanması.....	47
Şekil 4.14. EI nüvenin manyetik devresi	48
Şekil 4. 15. Hava aralığında ve manyetik alanda manyetik akı yoğunluğu.....	50
Şekil 4.16. Manyetik akı yoğunluğuna göre dağılımı.....	51
Şekil 4.17. Doğrusal eyleyici EI nüvenin indüktans profili.....	53
Şekil 4.18. Doğrusal eyleyici EI nüvenin bağ akısı karakteristiği.....	54
Şekil 4.19. Eyleyicinin kuvvet bileşenleri	54
Şekil 4.20. Eyleyicinin F_x kuvveti ve Eyleyicinin F_y kuvveti	56
Şekil 4.21. Translatör kutbunun sabitleme noktaları ve kuvvet değerleri	60
Şekil 4.22. ANSYS ile translatör kutbunun sabitleme noktaları ve kuvvet değerleri	60
Şekil 4.23. Translatör kutbunun ağılı gösterimi	61
Şekil 4.24. ANSYS translatör kutbunun ağılı gösterimi.....	62
Şekil 4.25. Esneme miktarlarının gösterimi	63
Şekil 4.26. ANSYS’de toplam deformasyon oranı.....	64
Şekil 4.27. Eşdeğer gerilme (Equivelent (Von-Mises) Stress)	65
Şekil 4.28. Translatör üzerinde gerilmenin yaşandığı bölgeler	65
Şekil 4.29. ANSYS ile Eşdeğer gerilme (Equivelent (Von-Mises) Stress).....	66
Şekil 4.30. ANSYS ile Translatör üzerinde en yüksek gerilmenin yaşandığı bölgeler ..	66
Şekil 4.31. ANSYS eyleyicinin sabitleme noktaları ve kuvvet değerleri.....	68
Şekil 4.32. ANSYS eyleyicinin ağılı gösterimi	68
Şekil 4.33. ANSYS’de en yüksek gerilim noktası.....	69
Şekil 4.34. Sürücü devresi	71
Şekil 4.35. PIC16F877 mikrodenetleyicisinin genel özellikleri ve bacak bağlantıları... 72	
Şekil 4.36. Mikrodenetleyicinin çıkış sinyalleri	73
Şekil 4.37. Mikrodenetleyicinin çıkış ile PWM sinyallerinin eklenmesi	74
Şekil 4.38. Üç fazlı 2n tipi mosfetli klasik köprü konvertör devresi	75
Şekil 4.39. MOSFET konverter sürücü tasarımı	75
Şekil 4.40. Zaman diyagramı.....	76
Şekil 4.42. Doğrusal eyleyici;.....	79
Şekil 4.43. Kontrol Kartı	80
Şekil 4.44. Sistemin faz indüktans eğrisi.....	81

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. ARM'nin diğer motorlarla karşılaştırılması	5
Çizelge 2.2. Çift çıkıntılı ARM'nin enerji değişkenlerinin anlamları	13
Çizelge 4.1. Eyleyicinin geometriksel özellikleri	34
Çizelge 4.2. EI de kullanılan parametreler	48

1. GİRİŞ

Günümüzde en yaygın başlıca elektrik motorları senkron motor, asenkron motor ve doğru akım motorlarıdır. Bu motorların hepsinin elektronik devrelerle kontrolü ile mekanik çıkışları iyileştirilebilir. Doğru akım motoru kontrolü en basit motor olmasına rağmen bakım gerektirmesi, patlayıcı ortamlarda kullanılamaması, boyutunun diğer motorlardan büyük olması, fırça ve kollektörlerinin zamanla aşınması ve yüksek maliyeti nedeniyle yavaş, yavaş yerini senkron ve asenkron motorlara bırakmaktadır. Bu iki motor türüne genelde alternatif akım motorları denir. Elektronik kontrol devreleriyle alternatif akım motorlarının çalışmaları iyileştirilebilmesine rağmen, bunların pahalı ve karmaşık yapıda olması nedeniyle birçok elektrik motoru uygulamalarında kullanılmamaktadır (Rasmussen, 2002).

Temeli 1824 yılına dayanan Anahtarlama Relüktans Motor (ARM) ilk olarak 1838 yılında İskoçya'da Davidson tarafından bir lokomotifin tahrikinde kullanılırken 1972 yılında patenti alınmış olmasına rağmen araştırma ve geliştirme ortamına 1980 yılından sonra girmiş ve günümüzde endüksiyon motorları kadar yoğun ilgiye sahip olmasa da ticari alanda gittikçe artan uygulamalar yer almaktadır. Performansı ve çalışma karakteristikleri hakkında öngörülen iddialar o zamanlarda inanılması oldukça zor gözüküyordu. Tasarım işlemlerini herkes tarafından gerçekleştirilemiyordu. Bu nedenle prototiplerinin satın alınabilmesi veya testler sonucu fabrikasyonunun yapılabilmesinin de yavaş ilerleme kaydetmiştir (Miller, 2001; Gürdal, 2001).

ARM'lerin yapısal olarak sağladıkları en önemli avantajlar şu şekildedir:

- Statorlarında yer alan sargıların oldukça basit yapıda olması,
- Stator sargılarının yarı iletken anahtarlama elemanlarına seri bağlı olması sebebiyle anahtarlama anlarında anahtarlama elemanlarında problem meydana gelme ihtimalinin düşük olması,
- Rotorun fırçasız ve sargısız yapıya sahip olması sebebiyle motorun çok yüksek hızlarda işletilebilmesi için mekanik bir engelin içermemesi,

- Rotorlarında herhangi bir sargı veya mıknatıs bulunmaması sebebiyle maliyetlerinin düşük olması,
- Motora ait stator fazlarının birbirinden bağımsız çalışabilmelerinden dolayı herhangi bir fazın arızalanması durumunda bile motorun çalışmasını sürdürebilmesi ve dolayısıyla da hata toleranslarının fazla olmasıdır (Bal, 2004).

Kullanılan güç devresi yapısının avantajları ve basit yapıları ve sayesinde endüstride kendine yer bulmaya başlayan ARM'ler ile ilgili olarak yakın zaman içerisinde oldukça fazla sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen bu motorların doğrusal versiyonlarını içeren çalışmalar sınırlı sayıda kalmıştır. Genel olarak döner motorların doğrusal motorlara kıyasla çok daha geniş bir kullanım alanına sahip olduğu görülebilir. Bu sadece ARM'ler ile sınırlı olmayıp diğer elektrik motor çeşitleri için de geçerlidir. Ancak yakın zaman içerisinde doğrudan sürücülü sistemlerin kazanmaya başladığı önem den dolayı, bu durumu değiştirebilecek önemli bir kriter olarak gözükmektedir (Üstkoyuncu, 2010).

ARM'lere ait temel avantajları üzerinde bulunduran Doğrusal Anahtarlamalı relüktans motorlar (DARM) diğer doğrusal motorlar ile karşılaştırıldığında maliyet, sağlamlık, kontrol kolaylığı ve düşük arızalanma olasılığı bakımından daha üstün özelliklere sahiptirler. Özellikle yapılarının basitliği ve motor faz sargılarının sadece stator ya da rotor üzerinde yer alması nedeniyle ilgili sargıların dağıtılmış yapıda olmaması, doğrusal motorlar arasında DARM'lara büyük avantajlar kazandırmaktadır (Üstkoyuncu, 2010).

Genel olarak incelendiğinde diğer doğrusal motorlara göre oldukça daha avantajlı olan DARM'lar (McLean, 1998), hala ciddi bir uygulamada kullanıma şansı bulamamıştır. Bunun en önemli nedenleri, alışılmış ARM'ler için de geçerli olan uygun yarı iletken anahtarlama elemanları ve kontrol işlemcilerinin yakın geçmişte üretilmesi ile ilgili olarak motorların çalışma prensipleri gereğince meydana gelen kuvvet/moment çökmeleri gösterilebilir. Buna karşın özellikle sahip oldukları maliyet avantajı ile birlikte, geniş bir hız sahası içerisinde yüksek güç ve moment/kuvvet değerlerini

verebilen ARM/DARM sürücü sistemleri yakın gelecekte diğer motor sürücülerine ciddi bir alternatif olma fırsatına sahiptir (Krishnan, 2001).

DARM yarıiletken teknolojisinin hızlı gelişimi ile birlikte oldukça hızlı bir ilerleme kaydetmişlerdir. Hız kontrol aralığı oldukça geniş olması nedeniyle bu motorlar son yıllarda yaygın kullanım alanı bulmaktadırlar. Yapılarının basit, bakım ve üretim maliyetlerinin düşük olması nedeniyle tüketiciye ve endüstriye yönelik uygulamalarda gittikçe artan bir ilgiye sahiptirler (Dursun ve Saygın, 2005). Önemli avantajlarından dolayı hareket kontrol sistemlerinde diğer AC ve DC motorlara alternatif olarak birçok uygulama alanı bulmuştur (Dursun ve Özden, 2008). Uygun bir konvertör devresi ve kontrol sistemi ile sürülen DARM'de diğer elektrik motorlarına göre daha yüksek verimli olduğu düşünülmektedir (Dursun ve Saygın, 2006).

Otomatik kapı sistemlerindeki hareket; dairesel hareketi sağlayan bir motor ve bu motorun hareket ettirdiği kayış sistemi ile kurulan bir mekanizma ile gerçekleştirilmektedir. Bu sistemlerde hareketi sağlayan kayış ve dişli sistemleri zamanla arıza vermekte ve periyodik bakım gerektirmektedir. Bunun yanı sıra motorların dairesel hareketinden dolayı sistemde titreşim oluşmaktadır. Oysa bu sistemlerde işin hızlı ve tam doğru, kullanılan cihazların uzun ömürlü, hareketli parçaların ve kullanılan eleman sayılarının az ve sistemin bakım gereksiniminin çok az olması gerekir. (Dursun ark, 2010; Fenercioglu ve Dursun, 2010).

Uygun bir konverter devresi ve kontrol sistemi ile sürülen DARM'de diğer elektrik motorlarına göre daha yüksek verimli olduğu düşünülmektedir (Dursun ve Saygın, 2006).

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM)

Değişken relüktanslı motor kavramı uzun zamandır bilinmesine karşın ancak 1980'li yıllardan itibaren değişken veya ayarlı hız uygulaması için kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde bu motorların mühendislik uygulamalarında yaygınlaştığı görülmektedir. Ucuz ve yüksek güçlü anahtarlama elemanlarının getirdiği avantajlar bu motorun yeniden keşfine olanak sağlamıştır. ARM yapı olarak çok basittir, ancak denetimi karmaşıktır. Örneğin, tork üretimi için faz sargılarının uygun sırada tetiklenmesi işlemi rotorun konum bilgisinin bilinmesi gerektirmektedir. Son yıllarda, yaygın ve düşük maliyetli mikroişlemci ve güç elektroniği elemanlarının elde edilebilmesiyle, ARM'lerin diğer DA ve AA motorları ile rekabet edebilmesi sağlanmıştır (Gürdal, 2001; Bal, 2004; Fenercioğlu, 2006).

Değişken relüktanslı motorlar (Variable Reluctance Motors, VRM) adını rotor konumuna göre hava aralığının değişmesi nedeniyle relüktansın değişmesinden almaktadır. Doğrudan bir kaynağa bağlanarak çalışmadıkları için bu motorlarda bir sürme (anahtarlama) devresinin kullanılması gerekmektedir. Hem değişken relüktanslı motoru hem de sürücü devresi ile birlikte ifade etmek için ARM adı kullanılmaktadır (Bal, 2004). ARM'ların diğer motorlarla kıyaslanması çizelge 2.1'de görülmektedir (Fenercioğlu, 2006).

Çizelge 2.1. ARM'nin diğer motorlarla karşılaştırılması (Fenercioğlu, 2006)

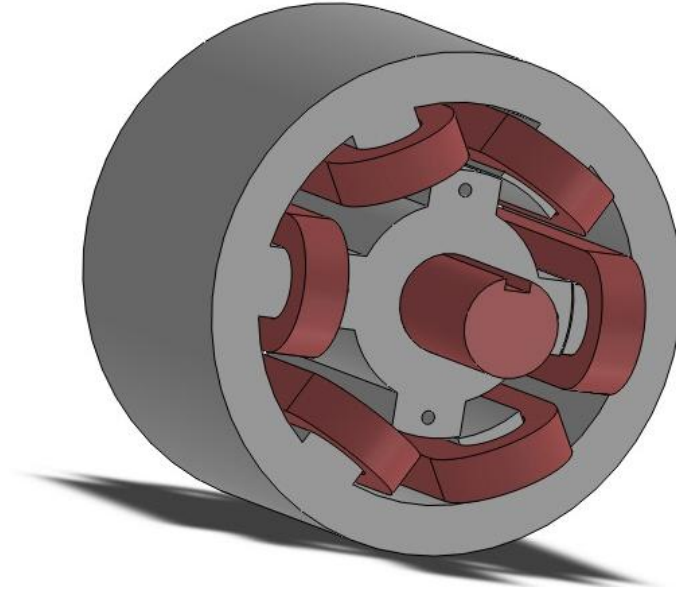
	Asenkron Motor	Senkron Motor	D.A. Motoru	Fırçasız D.A.Motoru	Adım Motoru	A.R.M Motor
Besleme Şekli	Alternatif gerilim	Alternatif gerilim	Doğru gerilim	Doğru gerilim	Doğru gerilim	Doğru gerilim
Uyarma Durumu	Uyarma gerekmez	Doğru gerilimle uyarılır.	Doğru gerilimle uyarılır.	Uyarma gerekmez	Uyarma gerekmez	Uyarma gerekmez
Konverter	Değişken hız uygul. Gerekir	Değişken hız uygul. Gerekir	Değişken hız uygul. Gerekir	Daima gerekir	Daima gerekir	Daima gerekir
İşletme ve Bakım Masraf	Yok denebilir	Kısmen bakım gerekir	Bakım gerekir	Yok denebilir	Yok denebilir	Yok denebilir
Motor Maliyeti	Ucuz	Pahalı	Pahalı	Orta	Orta	Ucuz
Konverter Maliyeti	Pahalı	Pahalı	Orta	Orta	Orta	Orta
Verim	İyi	iyi	Orta	Orta	Orta	iyi
Çalışma Ortamı	Her ortamda çalışır	Her ortamda çalışır	Patlayıcı Ortamlarda Kullanılmaz	Her ortamda çalışır	Her ortamda çalışır	Her ortamda çalışır
Stabilite	İyi	iyi	iyi	iyi	iyi	iyi

2.1.1. Anahtarlamalı Relüktans Motorların Temelleri

ARM, yapı olarak en basit döner elektrik motoru olarak görülebilir. ARM'lar tek kutuplu ve çift kutuplu olmak üzere, iki tip yapı olarak sınıflandırılabilir. Her iki tipte de rotor üzerinde herhangi bir sargı veya mıknatısın bulunmaması önemlidir. Bu sayede maliyetleri oldukça azdır. ARM'lar için sadece bir uyarım kaynağı vardır. Bu kaynak stator sargılarını uyardır. Bu çok önemli özelliğin anlamı, bir ARM'da sadece stator üzerindeki sargıların bir direnç kaybının olması demektir. Statorun soğutulması rotora göre daha kolaydır. Diğer motorların boyutlarına göre aynı güç motorlar için ARM'ler daha küçük yapıdadır. ARM'larda stator kutup sayısının (m), rotor kutup sayısına (n) oranı (m/n), motor temsilinde önemli bir veridir ve motor özellikleri belirlenirken n_s/n_r oranı da ifade edilebilir (Bal, 2004).

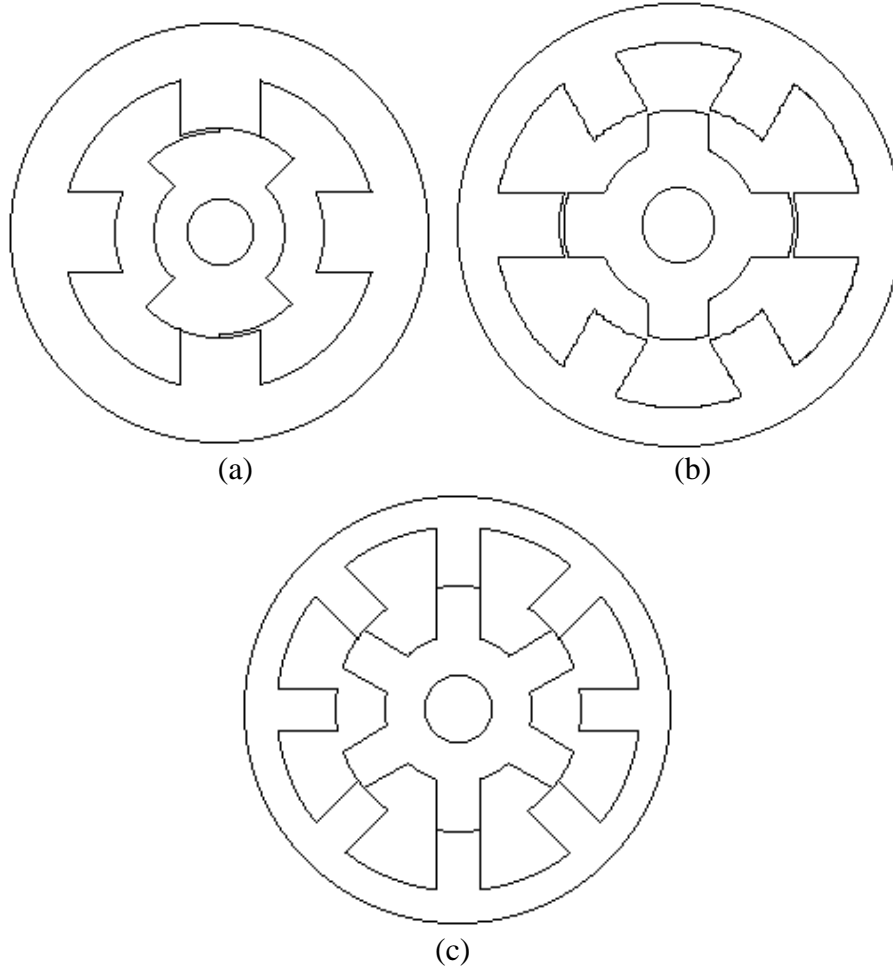
2.1.2. Anahtarlamalı Relüktans Motorların Yapısı ve Çalışması

Aslında bir çeşit senkron motor olan ARM'ların rotorlarında herhangi bir mıknatıs, sargı ya da kısa devre halkası bulunmayıp rotor sadece saç plakalardan oluşmaktadır. Stator ise DA motorların sargılarına benzeyen şekilde ince telli ve basit yapıli sarımlardan oluşan yoğun sargılar bulunmaktadır. Adım motorlarına benzeyen şekilde ARM'larda da karşılıklı iki stator kutbu bir faz oluşturmaktadır. Rotor ve stator nüvelerinin her biri, demir kayıplarını düşürmek açısından ince lamine saçlardan imal edilmektedir. Stator ve rotor kutup genişliklerinin belirlenmesi, tahrik sisteminin özelliklerine bağlı olmakla birlikte genel olarak ARM'larda stator kutupları rotor kutuplarına göre daha yakın tutulmaktadır. Bunun nedeni, statordaki herhangi bir faz uyarıldığında oluşan manyetik alandan daha fazla yararlanabilmek ve sargılara daha çok yer sağlamaktır. Bununla birlikte negatif moment üretiminden kurtulmak ve her fazın pozitif ve negatif moment üretme bölgelerini ayırabilmek için rotor kutuplarının genişliği, stator kutuplarının genişliğinden daha büyük seçilmektedir (Özoğlu, 1999; Üstkoşuncu, 2010). Şekil 2.1'de 6 kutuplu stator ve 4 kutuplu rotor 6/4 yapıdaki bir ARM'ye ait üç boyutlu görünüm gösterilmiştir.



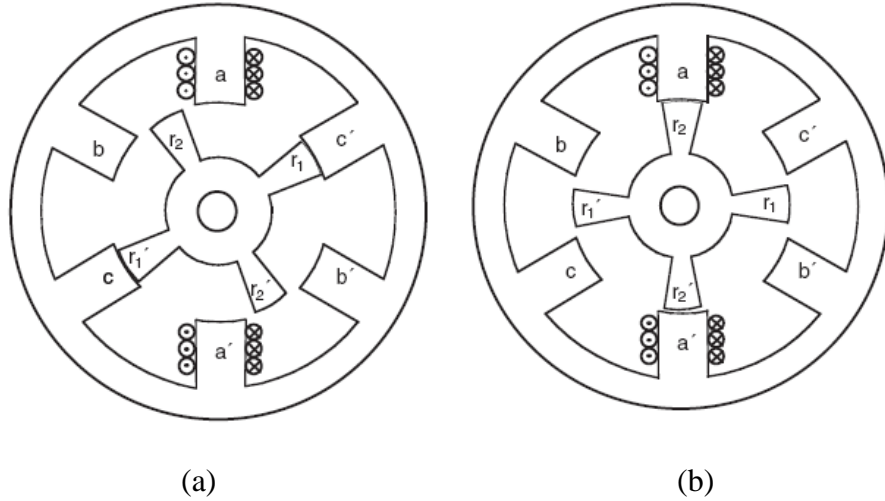
Şekil 2.1. 6/4 ARM'nin Üç Boyutlu Görünümü

Genelde stator ve rotor kutup sayılarına göre isimlendirilen ARM'lerde, yüksek moment gerektiren uygulamalarda ise rotor kutup sayısı stator kutup sayısına oldukça yakın seçilirken, yüksek hız gerektiren uygulamalarda rotor kutup sayısı stator kutup sayısına göre küçük seçilmektedir. ARM'lar bir fazdan başlar ve değişik faz sayılarında üretilebilirler. Buna rağmen ticari amaçla yaygın olarak 3 ve 4 fazlı ARM'ler üretilmektedir. Şekil 2.2.'de iki, üç ve dört fazlı ARM çeşitleri gösterilmiştir. Bir fazlı ARM'ların yapıları çok basittir, sürücü devresi ile motor arasında en az bağlantısı olan makinedir. Çok yüksek hızlı uygulamalar da cazip olmasına karşın bu motorlar kendiliğinden yol alamazlar ve girdap kayıpları fazladır. Çeşitli tiplerde ARM'lerin kesit görüntüleri Şekil 2.2'de verilmiştir (Mutlu, 2006).



Şekil 2.2. Stator kutup ve rotor kutup sayısına göre ARM çeşitleri
a) İki fazlı 4/2 kutuplu ARM, b) Üç fazlı 6/4 kutuplu ARM,
c) Dört fazlı 8/6 kutuplu ARM.

Şekil 2.3' de görülen sembolik gösterimden hareketle başlangıç durumunda r_1 ve r_1' rotor kutuplarının c ve c' stator kutupları altında hizalanmış bir şekilde bulunduğunu varsayalım. (a') da gösterilen yöne sahip bir akımı statorun a fazına uygulayalım. Bunun neticesinde stator kutupları a a' ve rotor kutupları r_2 r_2' arasında bir manyetik akı oluşur. Bu akı r_2 r_2' rotor kutuplarını a a' stator kutuplarına doğru çeker. Bunlar hizalı konuma geldiğinde a fazının enerjisi kesilir ve yeni durum (b)'deki gibi olur. Bu noktada b fazı enerjilendirilerek r_1 r_1' rotor kutbunun b b' stator fazına doğru hareketlenmesi sağlanır. Benzeri şekilde c fazı da r_2 r_2' rotor kutuplarıyla hizalanacak şekilde enerjilendirilir (Bal, 2004).



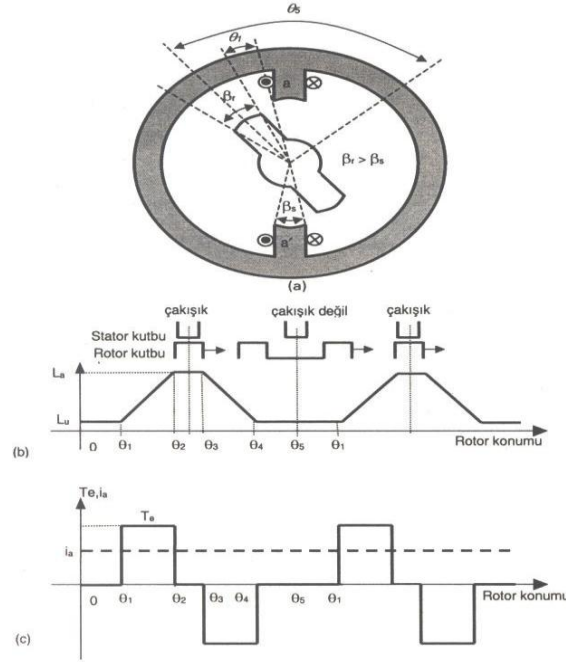
Şekil 2.3. Anahtarlamalı relüktans motorun çalışması
a) r_1 r_1' kutbu hızı b) r_2 r_2' kutbu hızı

Algoritmadan anlaşılacağı üzere rotorun 90 derecelik dönüşü için her bir stator fazının sırayla tetiklenmesi gerekmektedir. Bağımsız üç faz birer kez tetiklendiğinde rotor 90 derece hareket edecektir. Bundan dolayı rotorun bir tam tur dönebilmesi için rotor kutup sayısı x stator faz sayısı kadar faz anahtarlama yapılmalıdır (Karagöz, 2009).

2.1.3. İndüktans ve Torkun Rotor Konumu ile İlişkisi

Tork karakteristikleri, sargı akıları ve motor konumu arasındaki ilişkiye bağlıdır ve akımın bir fonksiyonudur. Şekil 2.4'de sabit bir faz akımına göre faz indüktansının rotor konumu ile değişimi verilmiştir. İndüktans ARM statorundaki bir faz sargısı içindir ve

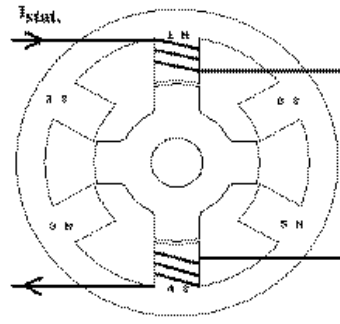
saçaklanma ile doyum etkileri yok sayılmıştır. İndüktans eğrisindeki önemli değişiklikler, stator ve rotor kutup yayları ve rotor kutup sayısı terimleri ile tanımlanır. Rotor kutup yayı, bu gösterim amacıyla, stator kutup yayından daha geniş olarak kabul edilmiştir ve bu genel bir durumdur. Şekil 2.4 (a) ve (b)'de gösterilen değişik açılar aşağıdaki gibi tanımlanır (Bal, 2004; Fenercioğlu, 2006).



Şekil 2.4. Sargı akımı ve rotor konumlarına göre bir faz indüktansını; (a) 2/2 ARM kesit görünüşü, (b) İndüktans değişimi, (c) Torkun değişimi

Çakışık pozisyon

Rotor kutuplarından birisi stator kutuplarından bir tanesiyle tam olarak karşı karşıya geldiğinde bu durum ilgili faz için çakışık konum olarak tanımlanır. Şekil 2.5.'te rotor bu konumdayken çakışık stator kutup sargılarından akım geçmesi halinde bir moment üretilmez. (Bal, 2004).

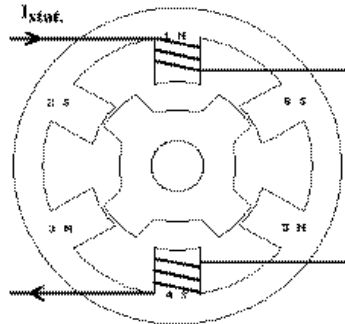


Şekil.2.5. Çakışık (aligned) Pozisyon

Rotorun çakışık konumda bulunduğu stator kutbunun sargılarından akım akarken rotor döndürülerek çakışık konumdan uzaklaştırılırsa, tekrar bu konuma döndürücü yönde bir moment meydana gelecektir. Çakışık konumda manyetik relüktansın en küçük değerinde olması nedeniyle relüktans ile ters orantılı olan faz indüktansı en büyük değerini alır. Düşük akı seviyelerinde relüktansın nerede ise tamamı hava aralığında ortaya çıkar. Ancak karşılıklı iki kutbu birbirine bağlayan stator boyunduruğunun oluşturduğu uzun manyetik yolda da önemli ölçüde magneto motor kuvvet tüketilir. Bu da çakışık konumdaki indüktansı azaltıcı bir etki yapar (Bal, 2004).

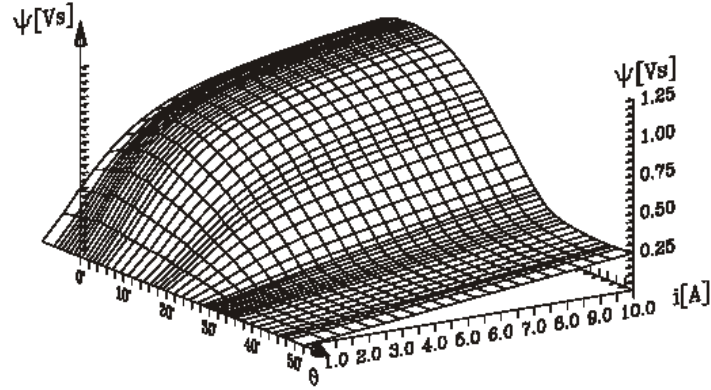
Ortalanmış Pozisyon

Şekil 2.6'de gösterilen konuma ortalanmış konum adı verilir. Rotorun bu konumunda da moment üretilmez. Eğer rotor ortalanmış konumdan bir miktar uzaklaştırılırsa rotoru çakışık konuma getirmek üzere bir moment meydana gelecektir. Bu konumda faz indüktansı en küçük değerini almaktadır. Bunun sebebi rotor ve stator arasındaki büyük hava aralığından dolayı relüktansın en büyük değerinde olmasıdır. Hava aralığının relüktansı, çelik malzemeninkine göre çok büyüktür (Bal, 2004).



Şekil 2.6. Rotorun ortalanmış (unaligned) konumu

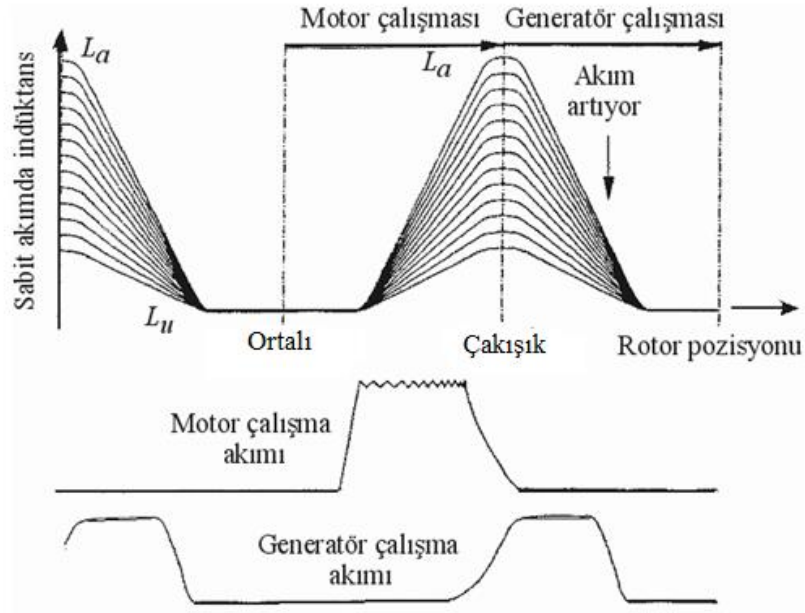
Ortalanmış konumdaki mıknatıslanma eğrisinde çakışık konumdakinin aksine belirgin bir doyma etkisi görülmez. Bunun sebebi ortalanmış konumda büyük miktarda kaçak akıların meydana çıkmasıdır. Şekil 2.7. da gösterilen ortalanmış ve çakışık konumlara ait mıknatıslanma eğrileri yüksek akı seviyelerinde birbirlerine yakınsarlar ancak asla kesişmezler (Bal, 2004).



Şekil 2.7. Mıknatıslanma Eğrileri

Ara rotor pozisyonları

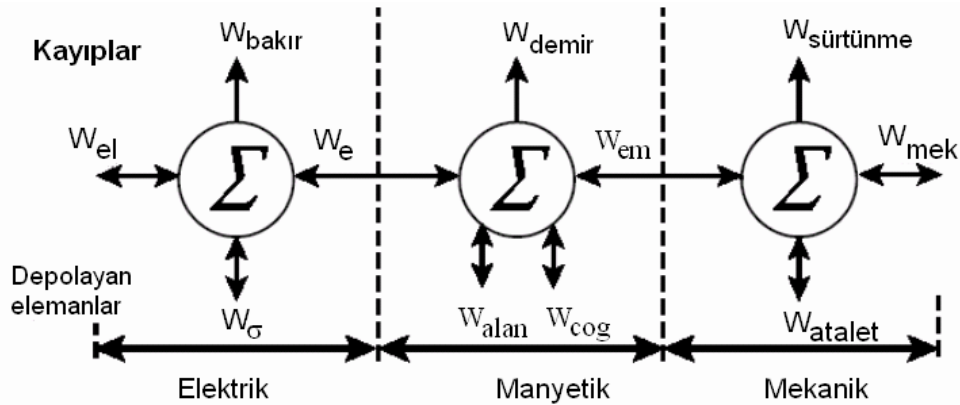
Ortalanmış ve çakışık konumlar arasındaki konumları için ortaya çıkan mıknatıslanma eğrileri çakışık ve ortalanmış konumların mıknatıslanma eğrilerinin arasında yer alır. Mıknatıslanma eğrileri ARM'nin momentinin hesaplanmasında, sargı ve saç paketlerinin boyutlandırılmasında kullanılan önemli bir faktördür. Faz indüktansının değeri rotor konumu ve faz akımına bağlı olarak büyük miktarda değişim göstermektedir. Anahtarlamalı relüktans motorunun teorisinde yer alan en anlamlı iki indüktans değeri, doymasız durumda çakışık konumdaki faz indüktansı değeri (L_{a0}) ve yine doymasız halde ortalanmış konumdaki faz indüktans (L_{a0}) değeridir. Eğer (ψ , gerçek akı değeri olmak üzere) faz indüktansı ψ/i şeklinde tanımlanırsa, rotor konumuna bağlı olarak değişim gösteren bir indüktans eğrisi elde edilir. Şekil 2.8'de akım indüktansı seçilerek elde edilen eğri gösterilmiştir (Bal, 2004).



Şekil 2.8. Rotor pozisyonuna karşı indüktansın değişim eğrisi

2.1.4. Anahtarlama Relüktans Motorların Enerji Dönüşümü Prensibi

Statik manyetik bir cihazla elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümünün genel çevrimi Şekil 2.9’de verilmiştir (Rasmussen, 2002).



Şekil 2.9. Çift çıkıntılı ARM'nin enerji dengesi modeli

Şekil 2.9’de gösterilen manyetik sistem elektrik ve mekanik sistem arasında bir kuplaj görevi yapar. Bu elemanlar elektrik enerjisini, kayıp elemanlarını, mekanik enerjiyi, sonunda elektrik ve mekanik sistem ve depolama elemanları arasındaki enerji transferini sağlar (Rasmussen, 2002).

Bu enerjiler ile ilgili eşitlikler Eşitlik 2.1’de verilmiştir. Şekil 2.9’deki ifadelerin anlamları (Rasmussen, 2002) Çizelge 2.2’de verilmiştir.

$$W_e = W_{el} - W_{bakır} - W_{demir} - W_{\sigma} \quad (2.1)$$

$$W_{em} = W_e - W_{alan} - W_{cog}$$

$$W_{mek} = W_{em} - W_{sürtünme} - W_{atalet}$$

Çizelge 2.2. Çift çıkıntılı ARM’nin enerji değişkenlerinin anlamları

W_e	Bu elektrik sisteminden manyetik sisteme transfer edilen enerjidir.
W_{el}	Bir güç konvektöründen bu makine türü için elektrik enerjisini sağlar. Enerji motor, generatör çalışma durumuna göre her iki yönde olabilir.
$W_{bakır}$	Sargılardaki enerji kaybıdır. Modeli sadeleştirmek için direnç sadece sıcaklığa bağlı olarak değişir. Bunun anlamı iletkenlerde deri olayı ve eddy akımlarının dikkatte alınmamasıdır.
W_{demir}	Demir kayıplarıdır. Bu motor demirinin manyetize ve demanyetizesi için enerji tüketir. Modeli sadeleştirmek için demir kayıpları ilk aşamada ihmal edilecektir ($W=0$). Statik manyetik cihazlarda dinamik olarak demir kaybının dahil edilmesi özellikle sinüsoydal olmayan dalgalarının kullanıldığı durumlarda büyük araştırmalar gerektirir.
W_{σ}	Kaçak akılarda depo edilen enerjidir. Bu enerji rotor pozisyonundan bağımsızdır. Örneğin oyuk parçalarında ARM’nin kaçak akıları örtüşmeyen pozisyonda maksimumdur. Örtüşen pozisyonda ise minimumdur hemen, hemen sıfırdır.
W_{em}	Manyetik sistemden mekanik sisteme transfer edilen enerjidir.
W_{alan}	Manyetik alanda depo edilen enerjidir.
W_{cog}	Sabit mıknatıslarda depo edilen enerjidir. Bu içerisinde sabit mıknatıs olan ARM’lerde geçerli olan bir enerjidir.
W_{mek}	Mekanik enerjidir.
$W_{sürtünme}$	Yataklardan ve rüzgârlardan kaynaklanan sürtünmenin sebep olduğu enerji kayıplarıdır.
W_{atalet}	Rotor dönerken kütlelerinde depo edilen enerjidir (atalet).

2.1.5. Anahtarlamalı Relüktans Motorların Eşdeğer Devresi

ARM için bir temel eşdeğer devre, fazlar arasındaki ortak indüktans ihmal edilerek şöyle elde edilebilir. Bir faza uygulanan gerilim; sargı direncinde düşen gerilim ile sargı akısının değişiminin toplamına eşittir ve Eşitlik 2.2 ile

$$v = R \cdot i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (2.2)$$

verilir. Burada R bir faz direnci, λ faz başına sargı halkalanma akısı, i faz sargısı üzerinden geçen akımdır ve Eşitlik 2.3' da verilmiştir.

$$\lambda = L(\theta, i)i \quad (2.3)$$

Burada L indüktans olup rotor konumuna ve faz akımına bağlıdır. Faz gerilimi denklemini, Eşitlik 2.4'de verilmiştir (Bal, 2004; Fenercioğlu, 2006).

$$v = R \cdot i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} = R \cdot i + \lambda = L(\theta, i)i \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.4)$$

$$v = R \cdot i + L(\theta, i)i \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m i \quad (2.5)$$

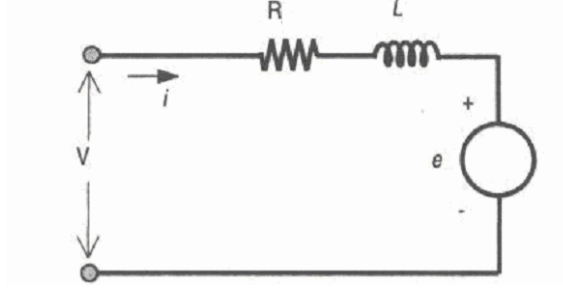
Bu Eşitlik 2.5'deki denklemin sağ tarafındaki üç terim sırayla omik gerilim düşümü, endüktif gerilim düşümü ve endüklenen emk'i temsil etmektedir ayrıca, Eşitlik 2.5 DA seri motor gerilim denklemine çok benzerdir. Endüklenen emk, Eşitlik 2.6'de

$$e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m i = K_b \omega_m i \quad (2.6)$$

olarak tanımlanır. Burada K_b seri uyarımlı DA makinesinin emk sabitine benzer olarak düşünülebilir, ve Eşitlik 2.7'de

$$K_b = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.7)$$

olarak tanımlanır. Emk sabiti çalışma noktasına bağlıdır ve o noktada sabit akımda elde edilir. Gerilim denklemi ve endüklenen emk ifadelerinden elde edilen ARM'nin bir faz eşdeğer devresi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. ARM'nin bir faz eşdeğer devresi

Sargı akısı, gerilim denkleminde yerine konular ve denklem akım ile çarpılırsa ani giriş gücü Eşitlik 2.8'de

$$P_i = vi = R \cdot i^2 + i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} + L(\theta, i)i \frac{di}{dt} \quad (2.8)$$

olarak yazılır.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) = L(\theta, i) i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.9)$$

Bu Eşitlik 2.9, Eşitlik 2.8'de yerine konulursa ani giriş gücü (P_i) Eşitlik 2.10 ile

$$P_i = vi = R \cdot i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.10)$$

verilir. Burada $R \cdot i^2$ sargı omik kayıpları, $\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right)$ alan enerjisindeki değişim oranı, $\frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt}$ ise hava aralığı gücüdür (P_g). Hava aralığı gücünde yer alan rotor konumu ve hız terimlerindeki t yerine Eşitlik 2.11, Eşitlik 2.12 de $\frac{\theta}{\omega_m}$ konular.

$$t = \frac{\theta}{\omega_m} \quad (2.11)$$

$$P_g = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m \quad (2.12)$$

Hava aralığı gücü, statik manyetik tork ile rotor hızının çarpımına eşittir. Bu ifade Eşitlik 2.13’de verilmiştir.

$$P_g = \omega_m T_e \quad (2.13)$$

$$T_e = \frac{P_g}{\omega_m} = \frac{\frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m}{\omega_m} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.14)$$

Şimdiye kadar elde edilen denklemler eşdeğer devrenin tanımlanmasını sağlarken aynı zamanda statik manyetik torkun, hava aralığı gücünün ve ARM’ye giriş gücünün hem dinamik hem de kararlı durum çalışmalarında değerlendirilebilmesi için yeterlidir (Bal, 2004).

2.1.6. Anahtarlamalı Relüktans Motorlar için Sürücü Seçimi

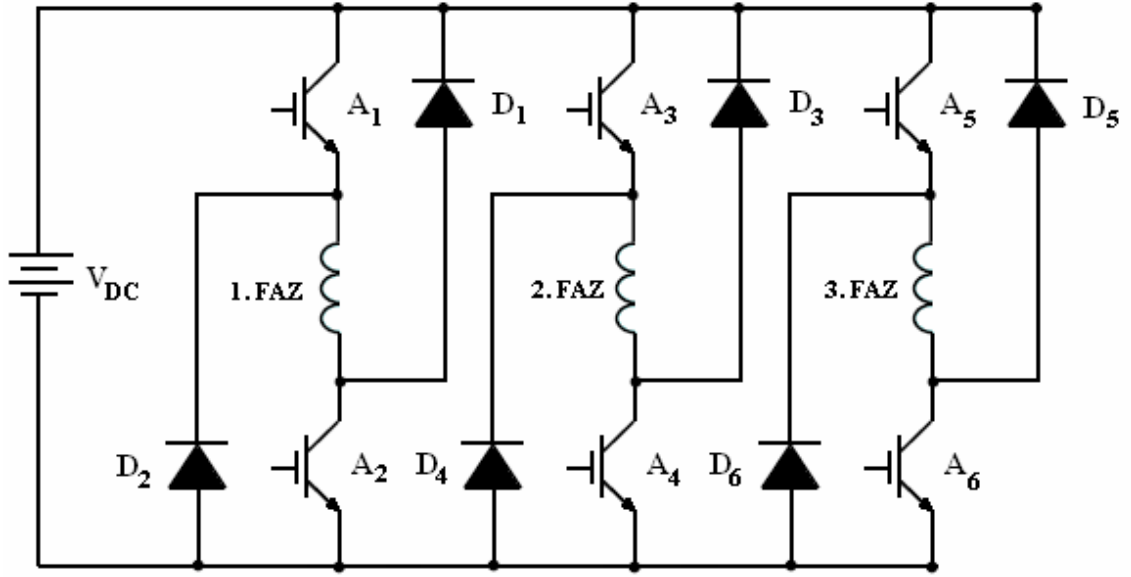
Her dönüştürücü devre topolojisinin, ebadı ve devre maliyetine karşılık sağladığı kontrol kabiliyetine göre diğerlerinden farklılıkları vardır. Genel olarak bütün ARM dönüştürücüleri, rotor konumunun izlenmesiyle elde edilen konum bilgilerine bağlı olarak motordan istenen hız ve tork performansına göre fazlara uygulanan akımın dalga şeklini ve genliğini biçimlendirerek, bu akımların fazlara seri olarak bağlanmış yarı iletken anahtarlar ile kontrol edilmesi ile çalışır. Dönüştürücü devreler bunun yanında komütasyon esnasında, bir önceki enerjili olan faza ait stator sargıları üzerinde depolanan enerjinin motor üzerinde negatif tork etkisi oluşturmaması ve bu depolanan enerjinin kaynağa dönüşümünün hızlı bir şekilde sağlanabilmesi için hızlı geri dönüşüm diyotlarına sahip olmalıdır (Mutlu, 2006).

ARM’lerde üretilen tork, akımın yönünden bağımsız olduğundan ARM sürücüleri diğer motorlar için kullanılan sürücülere göre birtakım avantajlara sahiptir (Yadlapalli, 1999). Bunlar bazıları şu şekilde sıralanabilir:

- Her bir faz için sadece tek bir yarı iletken anahtar elemanı kullanılmasının yeterli olabilmesi,
- Motor fazlarının birbirinden bağımsız olması nedeni ile herhangi bir fazın devre dışı kalması durumunda, diğer fazların bu durumdan bağımsız olarak çalışmalarına devam edebilmesi.
- ARM'nin sıfır kısa devre akımı ve sıfır açık devre voltajına sahip olması sebebiyle herhangi bir hata karşısında aşırı voltaj ve ısınma problemlerine sahip olmaması,

Klasik Köprü Tipi Dönüştürücü

Dönüştürücüde stator faz sayısının iki katı kadar güç anahtarı ve güç diyotu kullanılmaktadır. Her faz için kullanılan anahtarlardan biri istenilen fazın enerjilendirilmesinde, diğeri ise faza uygulanacak akımın kontrol edilmesinde kullanılmaktadır. Fazlar birbiriyle bağımsız olduğu için her fazın ayrı kontrol edilebilmesi mümkündür. Bu özellikleriyle ARM dönüştürücü devreleri AA eviricilerinden ayrılırlar. Çünkü AA eviricilerinde faz sargıları invertör ayaklarının ortasından beslenmektedir. ARM dönüştürücülerinde ise sargılar güç anahtarları ile birbirlerine seri bağlıdır. AA eviricilerde sargıların alt ve üst uçlarındaki anahtarların aynı anda açılmamalıdır. Aksi halde DA kaynakta kısa devre meydana gelmektedir. Bu durumu önlemek için ayrıca denetim devreleri eklemek gerekmektedir. ARM denetiminde böyle bir duruma gerek yoktur. Şekil 2.11'de klasik köprü tipi dönüştürücü devresi gösterilmiştir (Omaç ve ark., 2007). Klasik köprü tipi dönüştürücü diğer dönüştürücülere göre yüksek verimlilik, kontrol esnekliği ve güvenilirlik bakımından öne çıkmış bir tasarım şeklindedir.



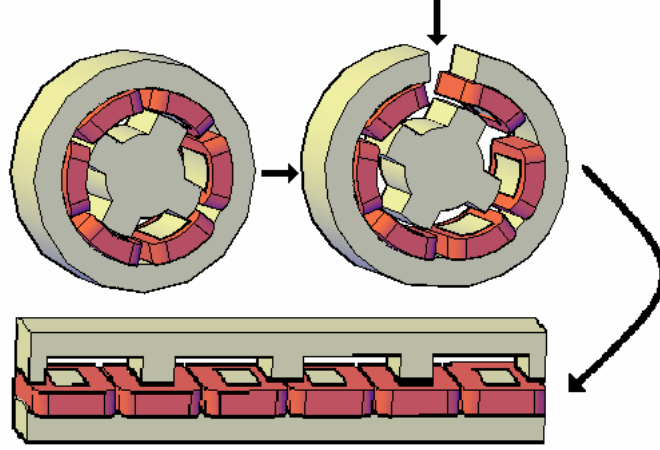
Şekil 2.11. Üç fazlı bir ARM için 2n tipi klasik (asimetrik) köprü sürücü devresi.

2.2. Doğrusal Anahtarlama Relüktans Motorlar

Özellikle raylı taşımacılık sistemleri ve dokuma tezgâhları gibi doğrusal hareketin gerekli olduğu yerlerde kullanılmaları, alışlagelmiş döner sistemlere göre çok daha büyük avantajlar sağlayan DARM'ler alışlagelmiş ARM'ler ile kıyaslandıklarında literatürde çok daha az yer almıştır. Diğer doğrusal motorlar ile kıyaslandıklarında ARM'lerin sahip oldukları avantajlara sahip olan DARM'ler çok daha etkili çözümler sunabilecek potansiyelindedir (Üstkoyuncu, 2010).

DARM'lar yarıiletken teknolojisinin gelişimi ile birlikte oldukça hızlı bir gelişme kaydetmişlerdir. Hız kontrol aralığının çok geniş olması nedeniyle bu motorlar son yıllarda yaygın bir kullanım alanı bulmaktadırlar. Yapılarının basit, bakım ve üretim maliyetlerinin düşük olmasından dolayı tüketiciye ve endüstriye yönelik uygulamalarda gittikçe artan bir ilgiye sahiptirler (Dursun ve Saygın, 2005). Sağladığı avantajlar nedeniyle hareket kontrol sistemlerinde diğer AC ve DC motorlara alternatif olarak birçok uygulama alanı vardır (Dursun ve Özden, 2008). Uygun bir konvertör devresi ve sürme sistemi ile kontrol edilen DARM'de diğer elektrik motorlarından daha yüksek verim elde edilebilir (Dursun ve Saygın, 2006). Bu motorlar yapı bakımından stator kutup sayısı rotor kutup sayısından farklı ve rotorlarında herhangi bir sargı bulunmayan fırçasız DC motorlardır. (Dursun ve ark., 2010).

Şekil 2.12’de 6/4’luk bir ARM’nın Doğrusal bir motora basit olarak dönüşümü gösterilmektedir.



Şekil 2.12. 6/4 Kutuplu DARM ve ARM

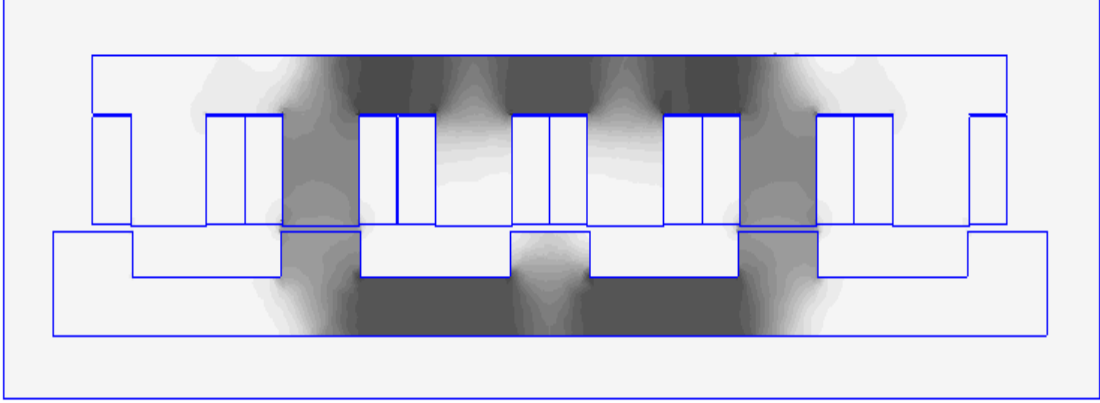
2.2.1. Doğrusal Anahtarlama Relüktans Motorların Temelleri

Doğrusal motorlar, döner hareketten doğrusal harekete dönüşümü gerçekleştiren ek mekanizmalara olan ihtiyacı ortadan kaldırmalarından dolayı giderek artan bir ilgiye sahiptir. Aynı zamanda doğrusal motorlar, doğrudan sürücülü sistemler olarak değişken hızlı uygulamalar ve özellikle de yüksek hızlı taşımacılık uygulamaları için iyi birer alternatif olmaktadır (Üstkoyuncu, 2010).

Doğrusal motorlar içerisinde iyi bir seçim olarak karşımıza gelen DARM’ler de ARM’lere duyulan ilgiye doğrusal olarak günümüzde giderek artan önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Temel olarak incelendiğinde DARM’leri sahip oldukları manyetik özelliklere göre iki kısımda sınıflandırabilmek mümkündür. Bunlar enine akı dağılımına ve uzunlamasına akı dağılımına sahip yapılardır. Yine yapılan çalışmalarda alışılmış DARM’ler tek ve çift yanlı yapı olmak üzere iki farklı şekilde sunulmaktadır (Üstkoyuncu, 2010).

2.2.2. Doğrusal Anahtarlama Relüktans Motorların Yapısı ve Çalışması

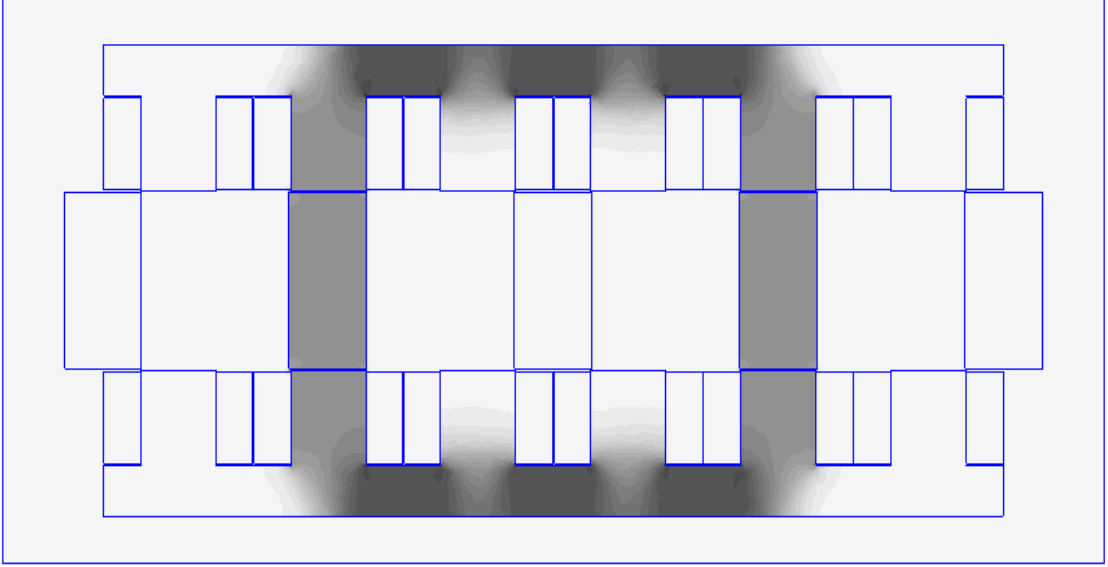
Şekil 2.13’de uzunlamasına akı dağılımına ve tek yanlı yapıya sahip olan üç fazlı alışılmış bir DARM’nin çakışık konumunda sahip olduğu akı dağılımı gösterilmiştir (Üstkoyuncu, 2010).



Şekil 2.13. Üç Faz, Tek Yanlı DARM için Hizalanmış Konumda Akı Dağılımı.

Çift Yanlı DARM’ler incelendiğinde ise hava aralığı, tek yanlı DARM’lere kıyasla çok daha hassas bir şekilde ayarlanmalıdır. Bu da yapının pratikte gerçekleştirilmesini zorlaştıran bir dezavantajdır. Çift yanlı DARM’lerin en büyük avantajı yüksek kuvvet üretebilme kabiliyetleridir (Krishnan, 2011).

Şekil 2.14’de çift yanlı bir DARM’nin hizalanmış konumunda sahip olduğu akı dağılımı gösterilmiştir (Üstkoyuncu, 2010).

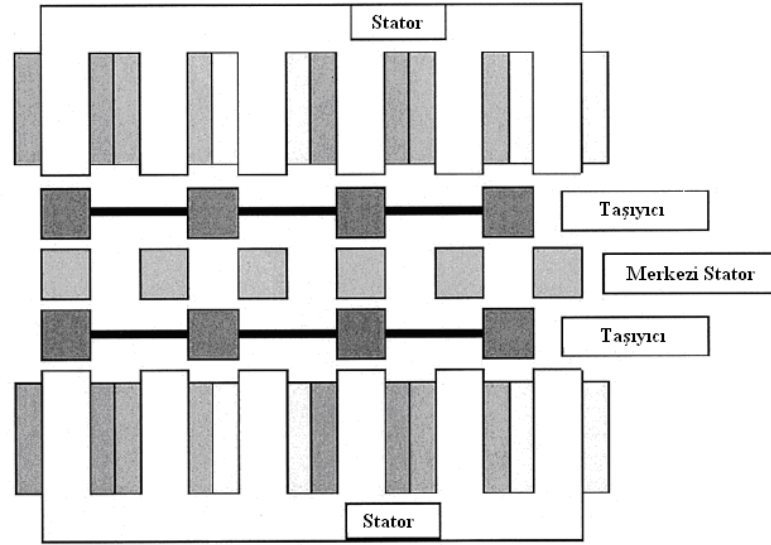


Şekil 2.14. Üç Faz, Çift Yanlı DARM için Hizalanmış Konumda Akı Dağılımı

Alışlagelmiş yapılara ilgili olarak literatürde özellikle yüksek kuvvet değerleri elde edilmek için tasarlanan ve çift yanlı yapıya sahip olan DARM'lere de rastlamak mümkündür(Üstkoyuncu, 2010).

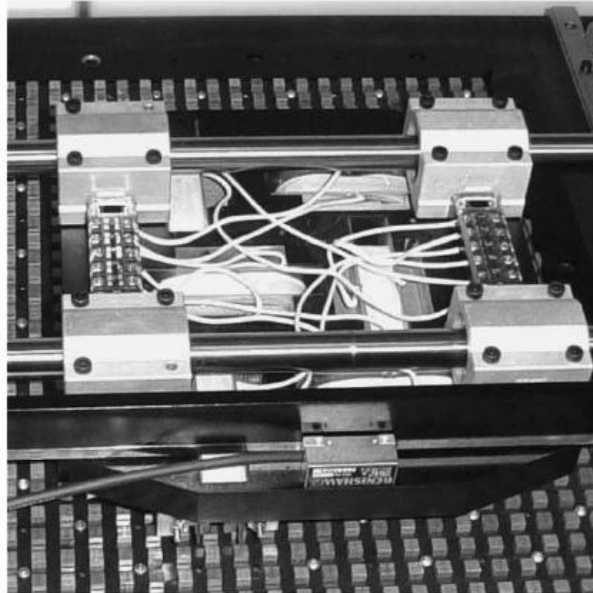
(Deshpande ve ark., 1995; Deshpande, 2000) tarafından önerilen motor yapısında, uyarı sargılarını da üzerinde barındıran sabit kısım ile taşıyıcı kısım olan stator arasındaki akı dağılımını daha etkili kılabilmek için merkezi stator parçaları yer almaktadır. Budan dolayı istenilen akı dağılımı sağlanarak kuvvet değerlerinin artması sağlanmaktadır. Bu DARM'nin en büyük dezavantajı sahip olduğu hava aralığı sayısının fazlalığından dolayı özellikle uzun bir mesafe için pratik olarak gerçekleştirilmesinin bir hayli zor olmasıdır (Üstkoyuncu, 2010).

Şekil 2.15'te Deshpande tarafından önerilmiş olan yüksek kuvvet değerleri üretebilme kabiliyetine sahip çift yanlı DARM gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Yüksek Kuvvet Değerleri Üretebilen DARM

Şekil 2.13 ve 2.14’de gösterilen alışlagelmiş DARM yapılarının yanında farklı uygulamalar için tasarlanmış olan ve literatüre sunulan değişik DARM yapılarına rastlamak da mümkündür. Şekil 2.16’te (Pan ve ark., 2005) tarafından önerilmiş olan ve düzlemsel hareket gerçekleştiren bir DARM yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Düzlemsel Hareket Gerçekleştiren DARM

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. 3D Tasarım ve Simülasyonlar

3D tasarım her türlü makine, tesis, ürün tasarımında kullanıcıya kolaylıkla hızlı bir şekilde çizim yapmasını sağlar. 3D tasarım parasolid prensibinde çalıştığı için kullanıcıya, tasarımın her aşamasında müdahale şansı vererek, modelin boyutlarının, ölçülerinin ve ayrıntılarının istenilen şekilde değiştirilmesi imkânı vardır, saniyelerle ölçülebilecek zaman dilimlerinde teknik resim ve montajların yapılmasını sağlar. (Anonim, 2010) 3D tasarım tasarımda sağladığı avantajlar;

- Katı modellerin avantajlarını kullanarak kolayca ve hızlı şekilde tasarım yapabilme imkânı sağlar.
- İstenildiği anda ölçü değiştirerek tasarımı kolayca düzeltebilme imkânı sağlar.
- Parça tasarımında diğer parçalara bağlı ölçü verebilme imkânı sağlar.
- Nesne kütüphanesi ile sıkça kullanılan unsurları tekrar, tekrar kullanabilme imkânı sağlar.
- Bir parçadan değişik boyutlardaki konfigürasyonlarını Excel’de bir tablo oluşturarak otomatik olarak oluşturabilme imkânı sağlar.
- Sürükle-bırak tarzı ile tasarımın imalata hazır teknik resimlerini otomatik olarak oluşturabilme imkânı sağlar.
- Tasarımın herhangi bir anında yapılan değişikliklerde, teknik resimlerin otomatik olarak güncelleşmesi, istenirse teknik resimde yapılan değişikliklerde parçanın veya montajın güncelleşmesi imkânı vardır.
- Karmaşık sac parçaların açılımlarını elde eder. Saclar ister düz ister konik olsun 3D tasarım’da açılımlarını elde edebilme, otomatik olarak teknik resmini çıkarabilme imkânı sağlar.
- Binlerce parçadan oluşan montajlar yapabilme imkânı sağlar.
- Montaj parçalarını, dinamik hareket mekanizmalarının çalışıp çalışmadığını kontrol eder (Anonim, 2010).

3.2. Sonlu Elemanlar Analizi

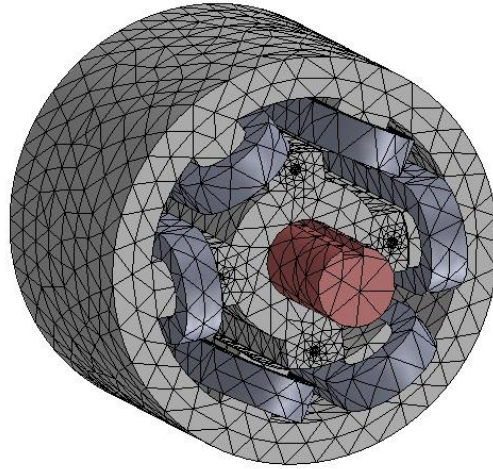
Sonlu elemanlar metodu, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılmasını sağlayan bir sayısal metodudur. İlk olarak 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiş olan bu metodun, daha sonraki yıllar içerisinde mühendislik problemlerinin çözümünde ve uygulamalı bilimler de başarı ile kullanılabileceği anlaşılmıştır. Daha sonraki yıllarda ise sonlu elemanlar metodu ve çözüm teknikleri hızlı gelişmeler kaydetmiş ve günümüzde birçok problemin çözümü için kullanılan en iyi metotlardan birisi olmuştur. Metodun değişik mühendislik alanları için bu kadar yaygın olmasının nedenlerinden birisi genel giriş verilerini değiştirerek herhangi bir özel problemin çözümü için kullanılabilmesidir (Arkan, 1991).

Sonlu elemanlar metodundaki temel mantık, karmaşık bir probleme, problemi basite indirgeyerek bir çözüm bulmaktır. Temel problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmekte olup, ancak bu sonucun çözüm için daha fazla çaba harcayarak iyileştirilmesi ve kesin sonuca çok yaklaşılmaması, hatta kesin sonuca ulaşılması mümkün olmaktadır. Elde bulunan konvansiyonel matematiksel araçlarının kesin sonucu, hatta yaklaşık bir sonucu dahi bulmakta yetersiz kalması durumunda ise sonlu elemanlar metodu kullanılabilecek tek metottur (Arkan, 1991).

Sonlu elemanlar metodunda katı, sıvı veya gaz gibi gerçek cisimler ve kontinyum, birbirine bağlanmış, sonlu eleman adı verilen alt bölümler ile ifade edilmektedir. Bu elemanlar birbirlerine düğüm noktası adı verilen özel noktalardan bağlanmışlardır. Düğüm noktaları genellikle elemanların birbirine bağlandıkları yerler olan eleman sınırlarında bulunmaktadır. Kontinyumun içerisindeki gerilme, deplasman, basınç, sıcaklık, hız vs. gibi değişkenlerin gerçekte nasıl değiştiği bilinemediğinden, bunların basit fonksiyonlar ile yaklaşık olarak ifade edilebildikleri varsayılmaktadır. Bu yaklaşık fonksiyonlar, değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri cinsinden ifade edilmektedir. Sistem için denge denklemleri vs. gibi yeni denklemler yazıldığı zaman, bilinmeyenleri değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri olan ve ortak çözümleri gereken yeni denklemler ortaya çıkmaktadır. Genellikle matris denklemleri şeklinde

olan bu denklemlerin çözülmesi ile de değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri elde edilmektedir. Yaklaşık fonksiyonların, değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri cinsinden ifade edilmiş olmaları nedeni ile de, bu fonksiyonların eleman içerisindeki ve sonuç olarak ta bütün kontinyum içerisindeki değerleri bulunmakta ve istenilen sonuçlar elde edilmiş olmaktadır (Arkan, 1991).

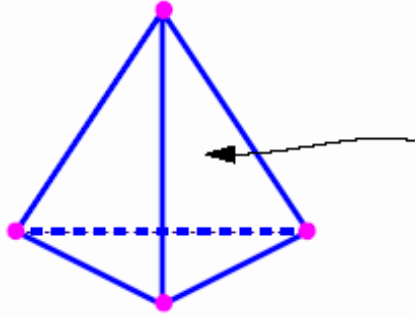
Özel problemlerin çözümü için genel bir programın kullanılabilmesi, sonlu elemanlar metodunun güçlü ve çok amaçlı bir araç olmasına neden olmuş ve çok sayıda genel amaçlı sonlu elemanlar program paketi geliştirilmiştir. Bu paketlerden bazıları oldukça genel amaçlı olup, değişik mühendislik alanlarındaki problemlerin çözümü için çok az veya hiçbir değişikliğe gerek duyulmadan kullanılabilir. Bu paketlerden birisi olan NASTRAN ("National Aeronautics and Space Administration Structural Analysis"), yaklaşık 150 000 satırdan oluşmakta ve bir uçak veya otomobil gövdesinin komple çözümü için kolaylıkla kullanılabilir (Arkan, 1991). Şekil 3.1'de sonlu elemanlar yöntemiyle çözülmüş bir ARM'nin ağ görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.1. Sonlu Elemanlar yöntemiyle çözülmüş bir 6/4 ARM'nin ağ görüntüsü

3.2.1. Dörtüzlü Eleman (tetrahedra)

Bir tetrahedra Şekil 3.2’de verilmiştir. Alanın tam bir çözümünü elde etmek için sistem alan için yeterli küçük değerlere göre boyutlandırılmış dörtüzlü elemanlardan oluşur (Fenercioglu ve Tarimer, 2007, Schlensok ve ark., 2003).



Şekil 3.2. Dörtüzlü eleman (tetrahedra)

Elektrostatik alan çözücü her dörtüzlü eleman düğümünde ve tüm kenarların orta noktalarındaki elektrik potansiyel değerini saklar. Her dörtüzlü elemandaki potansiyel 2. Dereceden bir polinom yaklaşım fonksiyonunun kullanılmasıyla bu düğümlerdeki değerlerden bulunur (Fenercioglu ve Tarimer,2007).

Manyetostatik alan çözücü homojen ve özel bir çözüm içinde H alanlarına böler. H' nin bu homojen çözümü için sistem her düğümde bir skaler potansiyel tutar. Özel çözüm için sistem dörtüzlü eleman kenarlarında teğet H' nin bileşenlerini saklar (Fenercioglu ve Tarimer, 2007).

Eddy akımı alan çözücüsü çözümü gerçek ve sanal olarak iki parçaya böler. Eddy akımlarının bulunduğu objeler için sistem direk olarak kaynak akımlarından ve uygulanan her düğümde depo edilen manyetik alandan $H(t)$ yi hesaplar. Diğer objeler için sistem her düğümde depolanan manyetik potansiyelden $H(t)$ yi hesaplar.

Çözümün doğruluğu dörtüzlü elemanların (tetrahedra) her birinin ne kadar küçük olduğuna bağlıdır. Elemanların binlercesinin kullanılmasıyla oluşturulan ağlarla çözümler yapılır. Problem uzayında en büyük alan-gradyan bölgelerindeki alan

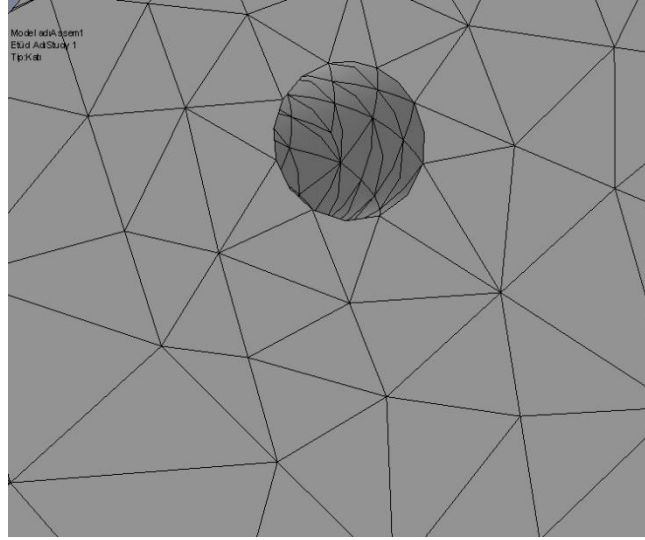
miktarının tam değerini belirlemek için her eleman, alan çözümü için yeterli küçük bir bölgeye ayrılır (Fenercioğlu ve Tarımer, 2007).

Bir alan çözümünün üretimi dörtyüzlü eleman düğümlerinin bulunduğu çok elemanlı bir ters matrisi içerir. Büyük miktarda elemanlı ağlar için güçlü bir hesaplamaya ve belleğe gerek vardır. Bu yüzden doğru bir alan çözümü elde etmek için yeterli miktarda ağ kullanmak arzu edilir. Ama bunun için işlem gücü ve bellek miktarı yeterli bir bilgisayar olmalıdır.

Optimal ağ üretmek için Maxwell 3D bir iterasyon süreci kullanır. Burada kritik bölgedeki ağlar otomatik olarak artırılır. İlk olarak kaba başlangıç ağına göre bir çözüm üretilir. Sonra hata yoğunluğunun yüksek olduğu alanlarda ağ sayısı artırılır ve yeni bir çözüm üretilir. Seçilen parametrelerle istenilen sınır aynı değere ulaştığı zaman çözüm adaptif dögünün dışına çıkar ve sona erer (Fenercioğlu ve Tarımer, 2007).

3.2.2. Ağ Artırımı (Mesh Refinement)

Bir yapı için optimal ağ doğru bir alan çözümü için yeteri kadar dörtyüzlü elemanı içerir. Ama bulunan hesaplama kaynakları gereğinden fazla ise ağ miktarı daha da artırılabilir. Bir yapı için üretilen başlangıç ağ miktarı genelde optimal değildir. Başlangıç çözümünden sonra iterasyonlarda ağ miktarı artırılarak doğru çözüme yaklaşılr. Bununla birlikte mevcut bilgisayar kaynaklarını daha iyi kullanmak için ağ artırımı akıllıca yapılmalıdır. Örneğin statik manyetik problem çözümü esnasında bir ağ 5000 ayrı elemanın kuvvetlerini içerir. Sistem yaklaşık olarak 12-18 Mbyte bellek kullanır. Bu yüzden dörtyüzlü elemanları akıllıca yerleştirmekten emin olmak önemlidir. Bunun da iki yolu vardır (McFee ve Giannacopoulos, 1992; Fenercioğlu ve Tarımer, 2007; Hamayer ve ark., 1999; Schlensok ve ark., 2003). Şekil 3.3'de ağ artırımına örnek bir ağ yapısı görölmektedir.



Şekil 3.3. Dörtüzlü elemanlardan oluşan ağ artırımını

Adaptif ağ artımı: Çözüm süreci esnasında enerji hatasının yüksek olduğu bölgelerde iterasyonlar halinde ağ artırımını yapar. Bu gereken alanlarda hedef değerlere göre ağ artımı için simülatöre izin verir. Bu da bilgisayar kaynaklarının optimal kullanılmasını sağlar (Fenercioğlu ve Tarımer, 2007).

Manuel ağ artımı: Ağ artımı özelleştirilebilir. Bu yapıya yeni ağ noktaları ekleyerek ağ artırılabilir. Ya da var olan bir ağa belirgin dörtüzlü elemanlar eklenir. Bu nüvenin devam etmediği veya hava aralığı gibi yüksek hata bölgeleri biliniyorsa manuel ağ artımını kullanmak faydalıdır. Düşük alan-gradyan bölgeleri varsa manuel ağ kullanımı elverişlidir (Fenercioğlu ve Tarımer, 2007).

3.3. Ansoft Maxwell 3D Alan Simülâtörü

Maxwell 3D alan simülâtörü programı etkileşimli bir yazılım paketidir. 3 boyutlu elektrostatik, statik manyetik ve eddy akımları problemlerini, SEY kullanarak çözer (Fenercioğlu ve Tarımer, 2007). Maxwell 3D alan simülâtörü;

- Statik elektrik alanları, kuvvet, tork ve gerilim dağılımlarının ve yüklerin sebep olduğu kapasitansların hesaplanmasında,
- Statik manyetik alanların, kuvvet, tork ve statik harici manyetik alanların ve sabit mıknatısların oluşturduğu indüktansların hesaplanmasında,

- Doğrusal ve doğrusal olmayan malzemelerin kullanıldığı yapılardaki alanların simülasyonlarının yapılmasında,
- Sıcaklık ve ısı akışı gibi termal büyüklüklerin hesaplanmasında kullanılmaktadır (Fenercioğlu ve Tarımer, 2007).

3.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapısal Analiz

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapısal Analiz modelleme, ağ oluşturma (mesh) simülasyon ve iyileştirme işlemlerinin ürünle sıkı etkileşimi sayesinde baştan sona çözüm imkanı sunar. Bu da daha kısa zamanda çözüm ve daha az maliyeti demektir (Kibar ve Öztürk 2012).

3.4.1. Yapısal Analiz Simülatörü

Piyasada yaygın olarak kullanılan analiz programlarındanır. Sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı programda ileri düzey çözüm seçeneklerini, kontak algoritmalarını içermesinin yanı sıra, program oldukça geniş non-linear malzeme modelleri, dinamik yükleme seçenekleri (geçici, harmonik, şekilsel, spektrum vs.), belirli ve belirsiz çözüm seçenekleri ile kırılma ve düşme testlerin bilgisayar ortamında simülasyonuna da olanak sağlar. Yapısal analiz programlarını üç kısma ayırabiliriz (Kibar ve Öztürk 2012).

- 1- Ön işlem
- 2- Çözüm
- 3- Son işlem

Ön işlem: Bu kısımda modelin oluşturulması veya hazır modelin yüklenmesi ile başlar. Ardından modele malzeme atanması yapılır. Burada doğrusal analizlerde sadece malzemeye ait elastisite modülü ve de poisson oranını girmek yeterli iken doğrusal olmayan analizlerde malzemeye ait diğer katsayı veya logaritmik germe-gerilme diyagramının da girilmesi gerekmektedir (Kibar ve Öztürk 2012).

Daha sonra model sonlu elemanlara bölünerek ağ örgüsü (mesh) yapılır. Burada önemli olan analiz biçimine ve geometriye göre doğru eleman tipinin belirlenmesidir. Bir elemanı tanımlayan belli başlı özellikleri;

1. Eleman serbestlik derecesine: Bir termal eleman için 1 serbestlik derecesi, bir yapısal eleman için 6 serbestlik derecesine kadar çıkmaktadır. (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)
2. Eleman şekline: tuğla şekli, düzgün dört yüzlü, kare, üçgen
3. Boyutuna: 2-Boyutlu (X-Y düzlemi sadece) ya da 3-Boyutlu
4. Varsayılan deformasyon biçimine: doğrusal, quadratik, vb. göre ayarlayabiliriz (Kibar ve Öztürk 2012).

Eleman seçimi ilk aşamada gerçekte modelimizi en iyi temsil edecek eleman tipini seçmek ile başlar. Eğer modelimiz de çubuk şeklinde elemanlar var ise bunları doğrusal elemanlar (direk, boru, halka) gibi, eğimli yüzeylerimiz var ise bunları kabuk elemanlar ile, bu kategorilere girmeyenleri de katı elemanlar ile modellememiz gerekir. Çünkü bu yapılardan her birinin yükleme altında kendine göre bazı farklı davranış karakteristikleri vardır. Modelimizin simülasyon ortamında tanımlanması yapıldıktan sonra geometrinin karmaşıklığına ve istediğimiz sonucun doğruluğuna göre doğrusal veya kareli eleman tipini seçmemiz lazım. Eğer model yuvarlak hatlar içeriyorsa ve buradaki gerilme dağılımını iyi yakalamak isteniyorsa, ya çok sayıda doğrusal eleman kullanmamız ya da az sayıda kareli eleman kullanmamız gerekiyor. Aynı zamanda gerilme dağılımını da parabolik olarak gözlemlene şansı bulabiliriz (Kibar ve Öztürk 2012). Ayrıca malzeme tanımlanmasında bu kısımda yapılır ve modelimizi oluşturan bütün parçalara malzeme atanır.

Çözüm: Yapısal analizler de hangi analizin yapılması isteniyorsa bu analiz tipi seçilir. Ardından model üzerinde sınır koşulları ve yükleme tanımlanır. Program genel olarak bütün sınır koşullarını ve yüklemelerini doğrudan düğümlere dağıtarak hesaplamalarını yapar. Aslında bu sonlu elemanlar mantığından kaynaklanmaktadır. Çünkü normalde sonsuz düğümünden oluşan gerçek yapıyı sonlu düğümlere bölüyoruz. Ve tüm dış hacim artık bu düğümler ile tanımlanıyor. Program da, noktasal yükleme(kuvvet) ve

basınç şeklinde yükleme uygulanabilir. Bu işlemler bittikten sonra çözüme başlanır (Kibar ve Öztürk 2012).

Son işlem: Bu aşama da elde edilen sonuçlar gözlemlenir. Sonuçların gözlemlenmesi birçok şekilde yapılabilir. Her düğümde meydana gelen gerilme ve deformasyon miktarlarına görebildiğiniz gibi, gerilmenin bir yol boyunca takip edilen değerlerini de gözlemleyebilirsiniz (Kibar ve Öztürk 2012). Bütün bir modelde genel olarak ortalama gerilme dağılımını da gözlemlenerek istenilen yorumlar daha kolay bir şekilde yapılabilir.

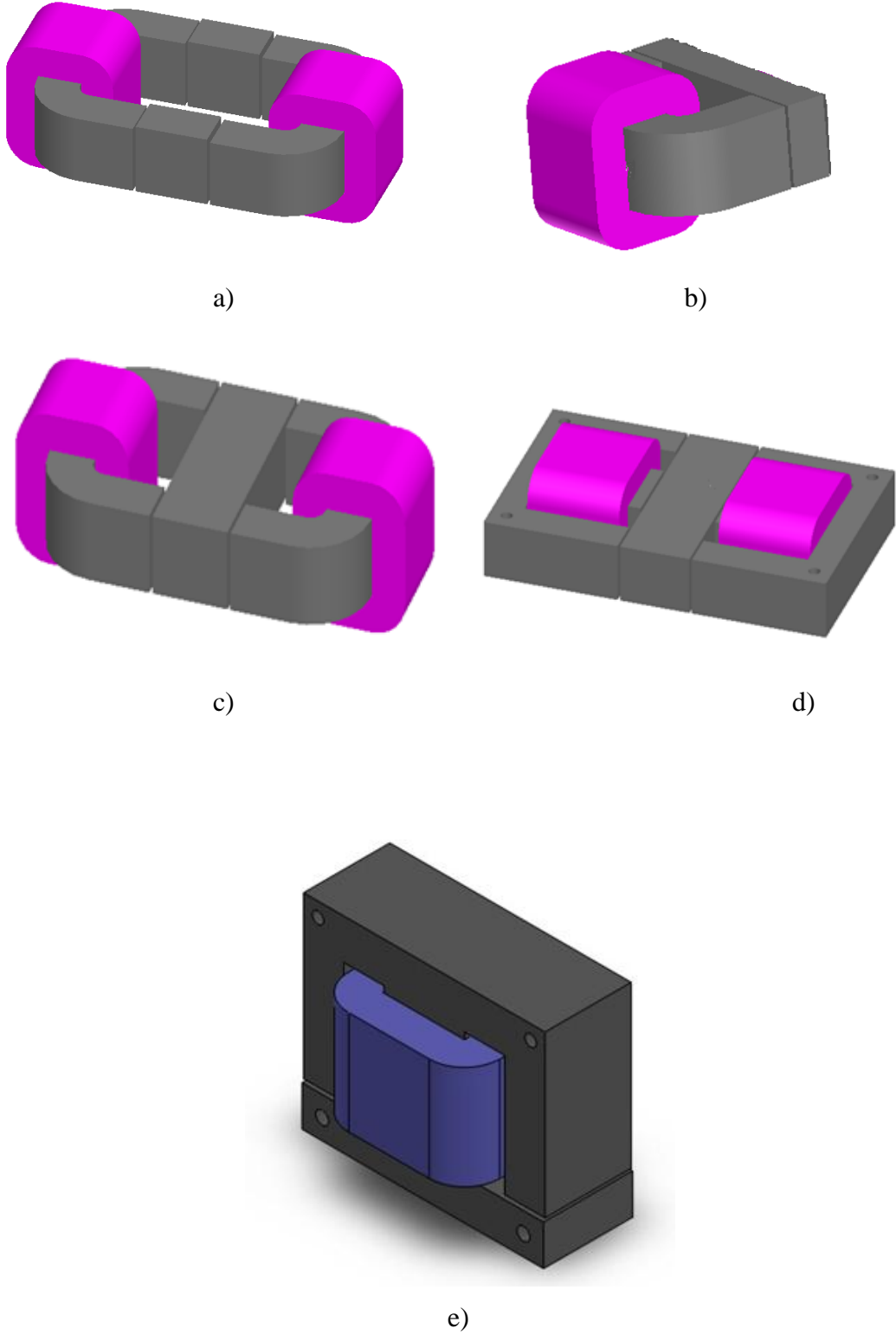
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Doğrusal Eyleyicinin Bilgisayar Destekli Tasarımı

Otomatik kapı sistemleri için kullanılacak doğrusal eyleyicinin bilgisayar destekli tasarımı kullanılacak eyleyicinin en verimli şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu doğrultuda eyleyici için öncelikle anahtarlama mantığı ile çalışacak bir translatör-stator yapısı tasarlanmıştır. Farklı translatör-stator yapılarına göre en uygun yapı statik manyetik ve yapısal analizler sonucunda EI nüveler seçilmiştir. Seçilen EI nüvelere 1 mm hava aralığına ve uygun ölçülere göre yataklamalar tasarlanmıştır. Eyleyici kısmı oluştuktan sonra kapı tasarımı montaj işlemleri bilgisayar destekli tasarım ortamında hazırlanmıştır.

4.1.1. Stator, Translatör ve Bobinin 3D Tasarımları

Otomatik kapı sistemleri için kullanılacak stator, translatör ve bobin yapıları statik manyetik analizler için farklı birçok tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarımda öncelikle yüksek kuvvet üretebilen, toplam enerjisi düşük, malzemeleri piyasada kolay bulunan ve ucuz olan EI ve CI nüveler farklı şekillerde tasarlanmıştır. Bu tasarımlar da statik manyetik analizleri kullanarak en uygun yapı seçilmiştir. Şekil 4.1' de farklı stator, translatör ve bobin sarımlarının gösterimi verilmiştir.



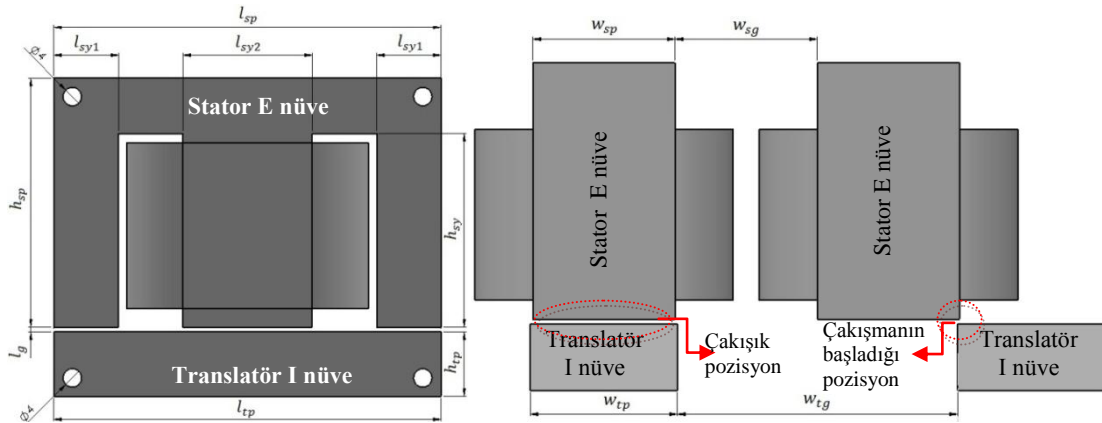
Şekil 4.1. Stator, translator ve bobinlerin farklı şekillerde 3D tasarımları
a) İki parçalı translator ile çift yanlı CI nüve b) Tek yanlı CI nüve
c) Çift yanlı CI nüve d) Çift yanlı EI nüve e) Tek yanlı EI nüve

Öngörülen Eyleyici için Stator ve Translatörün Seçimi

Uygun tasarım statik manyetik analizler sonucunda tek yanlı EI nüve şekli seçilmiştir. EI nüveler transformatör yapımında yaygın olarak kullanılması ve maliyetinin ucuz olmasından dolayı önemli avantaj sağlamıştır. Tasarımda E nüvelere 30 mm genişliğinde 6 kutuplu stator kutuplar 1 mm çaplı bobin telleri ile 256 tur sarılmış ve I nüveler ile 32 mm genişliğinde 12 kutuplu translatör kutuplar tasarlanmıştır. Çekme kuvvetine karşılık 1 mm hava aralığında translatör kısmı tasarlanmıştır. Çizelge 4.1’de eyleyicinin geometrik isimleri ve ölçüleri verilmiştir. Şekil 4.2’de eyleyicinin geometrik şekli verilmektedir.

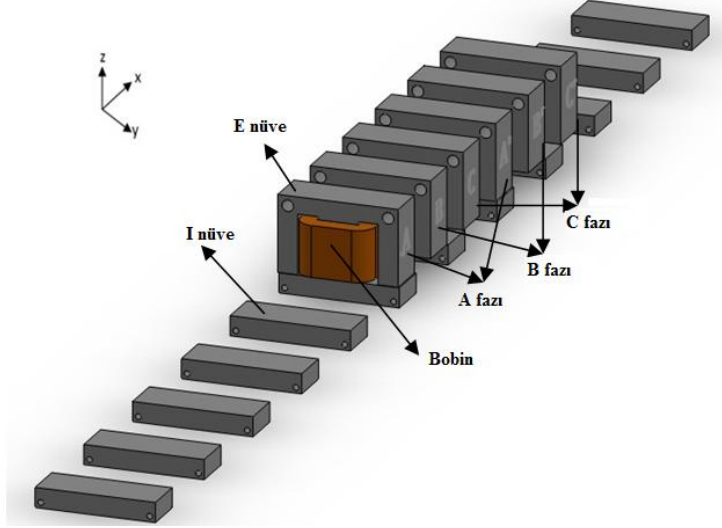
Çizelge 4.1. Eyleyicinin geometriksel özellikleri

Sembol	Açıklama	Boyut	Sembol	Açıklama	Boyut
l_{sp}	Stator kutup uzunluğu	0,084 m	w_{sp}	Stator kutup genişliği	0,030 m
l_{sy1}	Stator bacak eni 1	0,014 m	w_{sg}	Stator kutup boşluğu	0,030 m
l_{sy2}	Stator bacak eni 2	0,028 m	w_{tp}	Translatör kutup genişliği	0,031 m
l_{tp}	Translatör kutup uzunluğu	0,084 m	w_{tg}	Translatör kutup boşluğu	0,059 m
h_{sp}	Stator kutup yüksekliği	0,056 m	m	Faz sayısı	3
h_{sy}	Stator bacak yüksekliği	0,042 m	n_{sp}	Stator kutup sayısı	6
h_{tp}	Translatör kutup yüksekliği	0,014 m	n_{tp}	Translatör kutup sayısı	12
l_g	Hava aralığı	0,001 m	l_s	Stator uzunluğu	0,33 m



Şekil 4.2. Tasarlanan doğrusal eyleyicinin boyutları

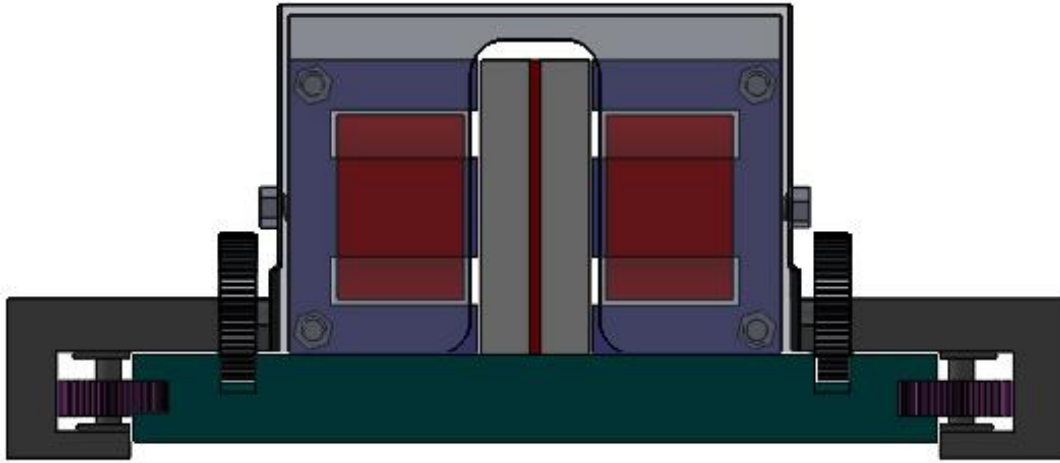
Şekil 4.3’de kullanılacak EI nüveli eyleyicinin geometrik olarak kutup sayıları ve sade şekli tasarlanmıştır.



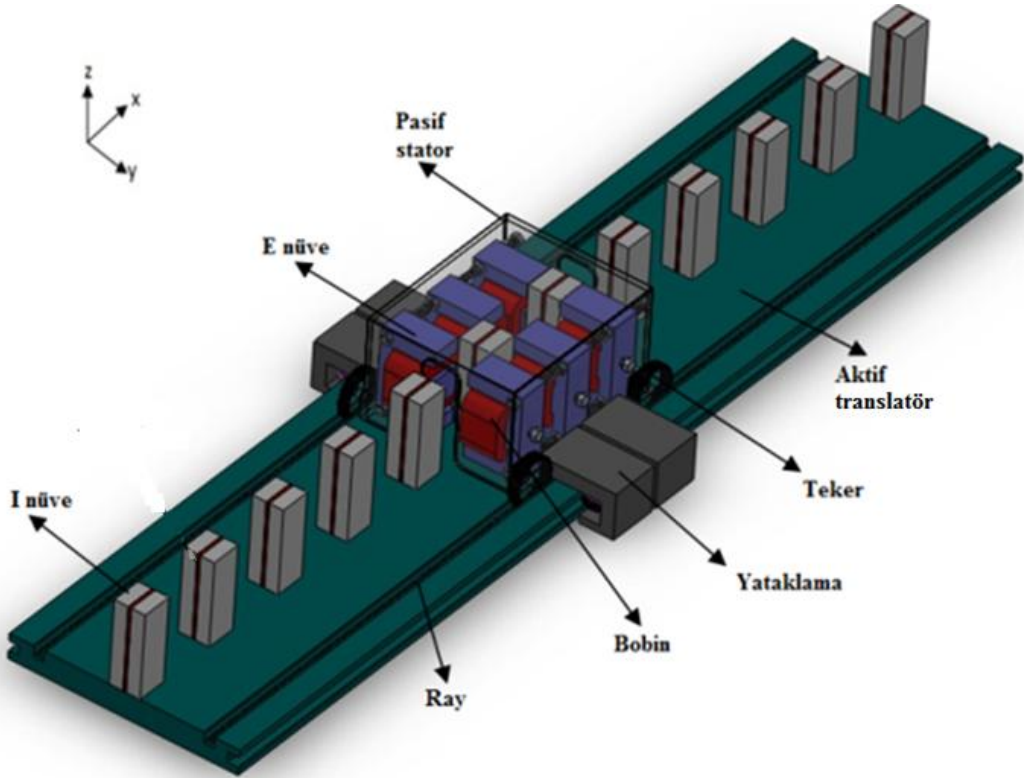
Şekil 4. 3. Tasarlanan eyleyicinin yapısı

4.1.2. Doğrusal Eyleyicinin Tasarımı

Uygun translatör-stator yapısı seçildikten sonra nüveleri yataklamak ve sürtünme kaybını en aza indirmek için farklı tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4. de yapılan tasarımda sac malzemeden oluşan translatörler dik şekilde konumlanmıştır. Stator kısmı her faz birbirleri ile karşılıklı gelecek şekilde tasarlanmıştır. Buradaki amaç y ekseninde her nüvenin kendisine doğru oluşacağı istenmeyen kuvveti karşılıklı olarak sıfırlamaktır. Stator ve translatör arasındaki 1 mm hava aralığını sağlamak için yanlardan ve üstten raylar açılarak serbest tekerler ile 1 mm hava aralığında aktif translatör ileri-geri ekseninde doğrusal hareketi gerçekleştirmektedir. Ancak yataklama için kullanılan malzemelerin fazlalığı tezi amacından saptırılmış ve ilerde uygulamada çıkabilecek aksaklıklar nedeni ile bu tasarımda düzeltmeye gidilmiştir.



(a)

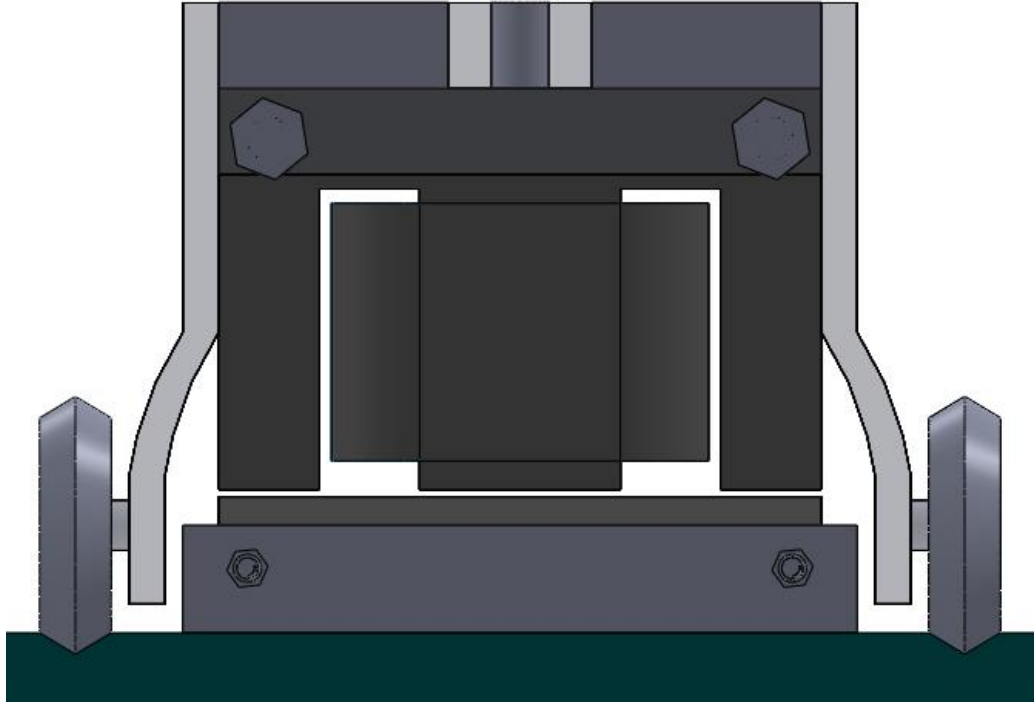


(b)

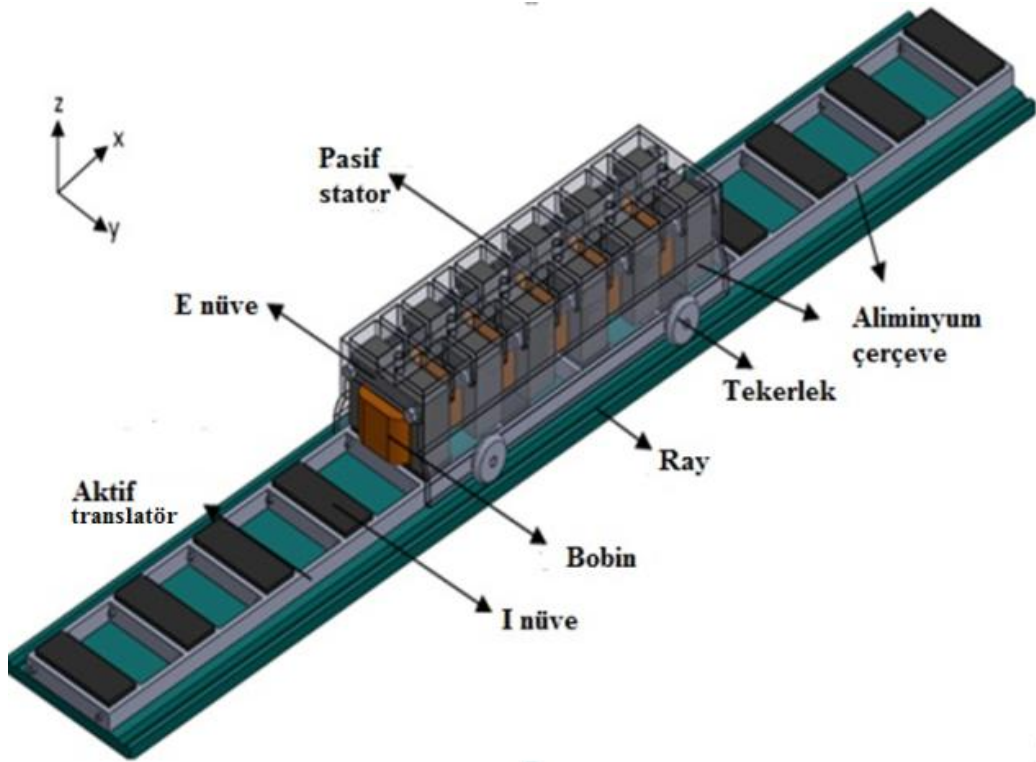
Şekil 4.4. Çift yanlı (double sided) stator ile tasarlanmış eyleyici;
 (a) önden görünüş, (b) izometrik görünüş

Tasımdaki sorunları düzeltmek amacı ile Şekil 4.5. de tasarlanan eyleyicide Şekil 4.4. den farklı olarak translatör kutuplar yatay konumda çevresi manyetik alandan etkilenmeyen alüminyum malzeme ile yataklanmıştır. Stator kısmı tek sıra halinde dizilmiştir. Statorlar z ekseninde yüksek miktarda çektiği kuvvet serbest tekerler ile yataklanmıştır.

Stator kutuplarını yataklamak için alüminyum malzemedan bir kafes tasarlanmış ve bu kafesteki tekerler açılan raylar yardımı ile x ekseninde ileri geri doğrusal hareketi gerçekleştirmektedir. Ancak stator kutuplarının yataklanması için hazırlanan kafesin uygulama için üretilmesi maliyetli olduğundan ve rayların uzunlukları ile birlikte kapının genişliğinin çok fazla artması nedeniyle bu tasarımda da bazı düzeltmeler yapılmıştır.



(a)

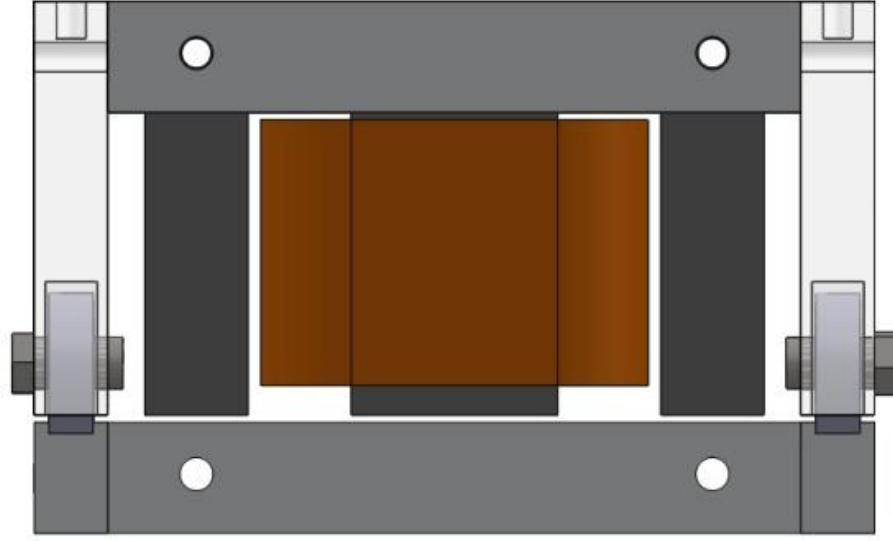


(b)

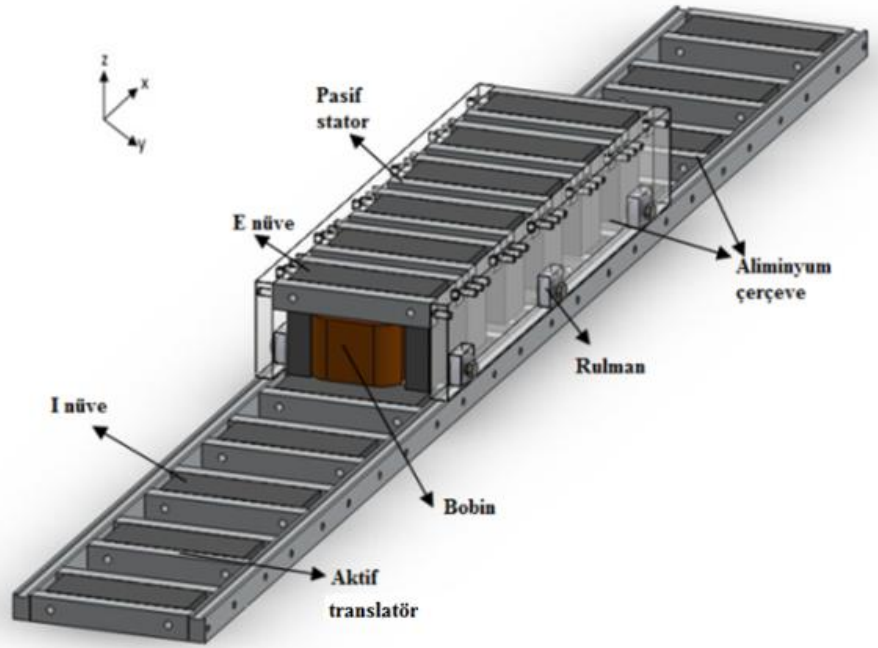
Şekil 4.5. Yatay translötörler ile dışarıdan raylı tasarlanmış eyleyici
(a) önden görünüş, (b) izometrik görünüş

Tasımdaki sorunları düzeltmek amacı ile Şekil 4.5. de tasarlanan eyleyicide Şekil 4.6. dan farklı olarak translatör ve stator kutuplarının yataklaması için piyasada kolaylıkla bulunabilen 10 mm kalınlığından ve 15 mm genişliğinde içi dolu alüminyum malzemedan oluşan profillere göre yapılmıştır. Böylece işçilik maliyeti ve kullanılan malzeme sayısı azalmıştır. Bir önceki çalışmada raylar için kullanılan boşluğu kaldırmak amacı ile 10 mm kalınlığındaki alüminyum profillerin orta kısmından 5mm rulman genişliğine göre raylar açılmıştır. Raylarda hareket edecek stator kutbu için 1 mm olan hava aralığında içi dolu alüminyum malzemenin içlerine yuvalar açılarak rulmanlar yardımı ile yataklama yapılmıştır. Alüminyum malzeme manyetik alandan etkilenmediği gibi yapısal olarak da dayanıklı bir malzemedir.

Tasarımda 3 fazlı 6/4'luk bir ARM'nin mantığı ile translatör kutuplarındaki I nüveler arasında uzaklık 90 mm ayarlanmış ve stator kutupları için E nüveler arasındaki uzaklık 60 mm olarak belirlenmiştir. Böylece 114 mm genişliğinde 1041 mm uzunluğunda ve 70 mm yüksekliğinde normal otomatik kapılara göre daha dayanıklı ve daha ekonomik olan otomatik kapılarda kullanılabilecek bir eyleyici gerçekleştirilmiştir.



(a)

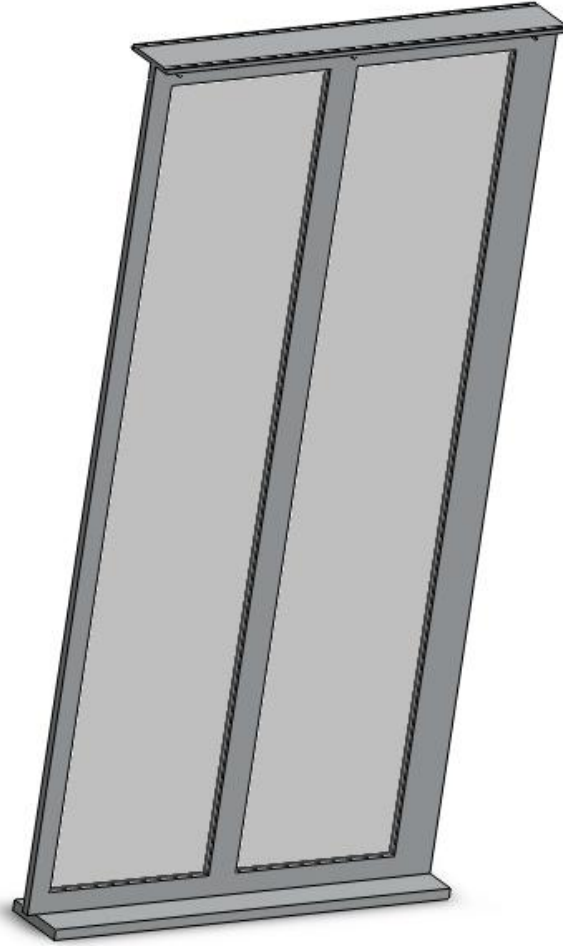


(b)

Şekil 4.6. Yatay translatörler ile tasarlanmış eyleyici;
 (a) önden görünüş, (b) izometrik görünüş

4.1.3. Kapı Tasarımı

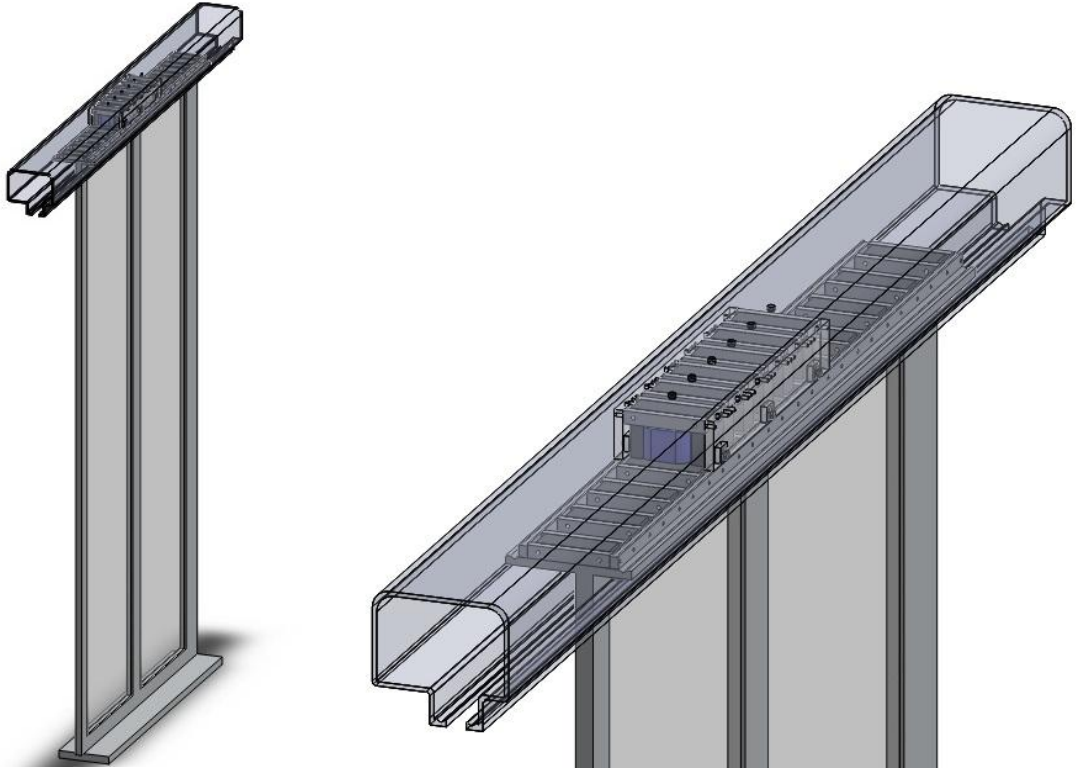
Eyleyicinin yapısı tamamlandıktan sonra bu eyleyiciye uygun, kütlece hafif ve düşük maliyette bir kapı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kapı yaklaşık 2 metre yüksekliğinde, 1,041 metre uzunluğunda ve 10 mm kalınlığında gerçekleşmiştir. Kapının üst kısmına translatör kutupları gelecek şekilde tasarlanmıştır. Kapı tasarımında özellikle alüminyum malzemelerden yararlanılmıştır. Böylece manyetik alandan etkilenmesi önlenmiştir. Kapı iki adet cam bloğundan oluşur. Şekil 4.7’de tasarlanan kapının 3 boyutlu görünümü bulunmaktadır.



Şekil 4.7. Kapı tasarımı

4.1.4. Montaj

Montaj kısmı parça, parça yapılan çizimlerin istenilen eksenlerde birbirleri ile birleştirildiği ve hareketlendirildiği bölümdür. Bu bölümde yapılan tasarımların her biri ayrı, ayrı ilişkilendirilerek oluşturulan çizimler hem üretim öncesi büyük avantajlar sağlar hem de bilgisayar destekli yapısal ve statik manyetik analizler için modelleme yerine geçmektedir. Şekil 4.8’de ki 3 boyutlu olarak şekilde görüldüğü gibi öncelikle stator ve translatör kutuplarını hava aralığına göre raylara rulmanlar gelecek şekilde montaj ilişkisi yapılmıştır. Translatör kutbu ile kapı birlerine ortalanacak şekilde sabitleştirilmiştir. Stator kısmını sabitlemek amacı ile stator tutma sistemi tasarlanmış ve statorun üst bölgesinden montaj ilişkisi ile sabitleştirilmiştir. Son olarak aktif translatör x eksenine göre ileri-geri hareket etüdü tanımlanmıştır.



Şekil 4.8. Otomatik kapı sisteminin tasarımı

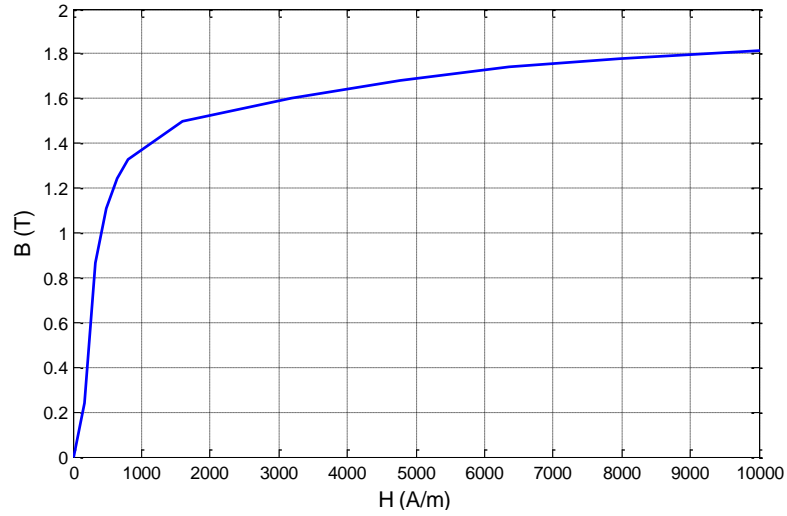
4.2. Öngörülen Doğrusal Eyleyicinin Statik Manyetik Analizi

Otomatik kapı sistemleri için kullanılan eyleyiciler genellikle döner sistemlerdir, doğrusal kapı hareketi için kullanılan dişli ve kasnak sistemleri mevcuttur. Bu sistemlerde hem arıza ihtimali hem de eyleyicinin verimliliğinde kayıplara yol açmaktadır. Doğrusal eyleyiciler ise dişli ve kasnak gibi sistemleri ortadan kaldırmaktadır. Bu tezde kullanılan DARM mantığına dayalı tasarımda kullanılan eyleyicinin sonlu elemanlar yöntemi ile statik manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Statik manyetik analizler doğrultusunda tasarlanan 3 boyutlu nüvelerde manyetik doyum, saçaklanma, kaçak akı ve sargı ucu etkileri sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilmektedir. Genel olarak sac malzemelerden oluşan nüvelere sonlu eleman yöntemi ile x ve z eksenlerinde oluşturdukları kuvvetler ve indüktans değerleri hesaplanmıştır. Tasarımda bobinler tek kutup halindedir, ancak bobin tellerine uygulanan akım miktarı sarım sayısı ile orantılıdır. Bu yüzden bobinler tek sarım kabul ederek akım miktarları sarım sayısı ile çarpılmıştır. Uygulanan akım 2 amper için 500 amper-tur (At), 4 amper için 1000 amper-tur (At), 8 amper için 2000 amper-tur (At), 10 amper için 2500 amper-tur (At) ve son olarak 12 amper için 3000 amper-tur (At) olarak hesaplanmıştır. Akım değerlerine göre translatörün 0-45 mm arasındaki 3mm adımlar için statik manyetik analizi yapılmıştır. Toplamda sonlu elemanlar yöntemi ile 112 adet statik manyetik analiz yapılmıştır. Nüvelerin kaç amperde doyuma gittiğini ve doyumda ürettiği kuvvet hesaplanmıştır. Bu hesaplama sırasındaki çözüm süreçleri;

- Tasarlanan EI nüveleri sonlu elemanlara yöntemine göre statik manyetik analiz yapan programa uygun bir uzantıya çevirerek şekilleri yüklemek,
- Malzemelerin tanımlanması,
- Uygulanacak akım yolları için terminallerin belirlenmesi işlemi,
- Uygulanacak akım değerleri ve translatör konumlarının parametrik olarak girilmesi işlemi, uygun ağ yapısının belirlenmesi işlemi,
- Çözüm parametrelerinin tanımlanması
- Analiz sonuçlarının veri olarak alınıp işlenmesi adımlarından oluşmaktadır.

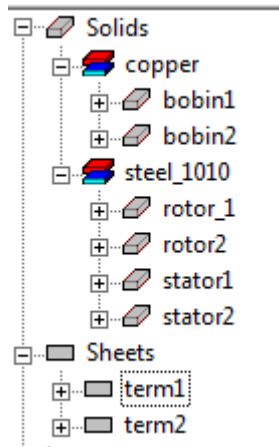
4.2.1. Malzeme Tanımlamaları

Modelde kullanılan 3 boyutlu katı (solid) cisimlerin hepsi bir materyal olarak tanımlanmıştır. Burada program kütüphanesinde bulunan malzemeler içerisinde sargıların hepsi tek parça bakır (copper) olarak belirlenmiştir. Translatör ve stator B-H eğrisi Şekil 4.9’da verilen çelik 1010 isimli malzeme ile tasarlanmıştır (Fenercioğlu ve Tarımer, 2008).



Şekil 4.9. Çelik 1010 BH eğrisi

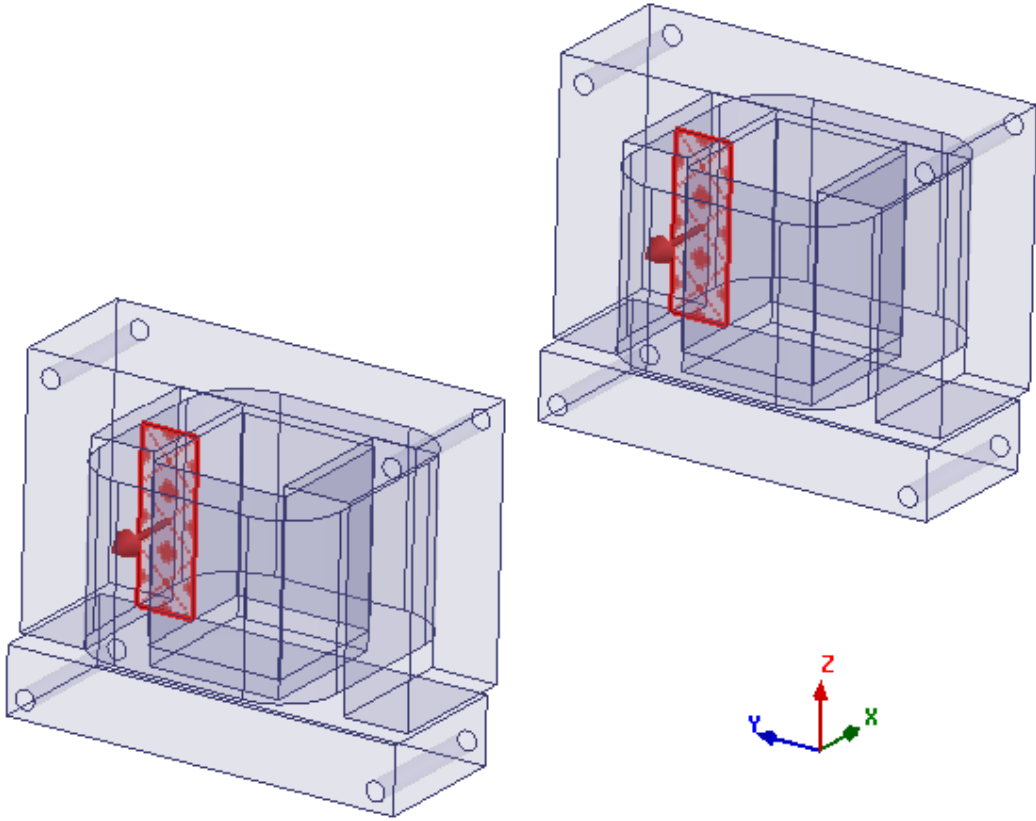
Modelin dış bölgesi ise vakum olarak atanmıştır. İstenildiği takdirde program içerisinde B-H verileri girilerek farklı malzeme tanımlamaları da yapılabilmektedir. Şekil 4.10’de Maxwell 3D programının malzeme tanımlama menüsü görülmektedir.



Şekil 4.10. Malzeme tanımlama menüsü

4.2.2. Terminal Tanımlamaları ve Akım Yoğunluğu

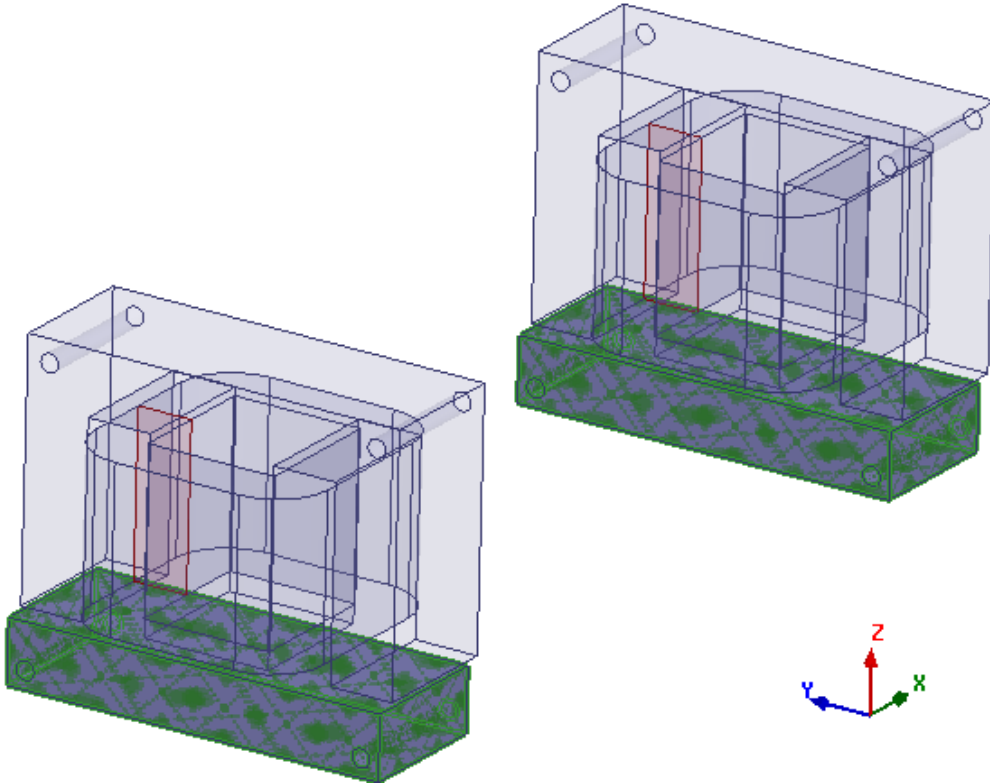
Model üzerinde 6 adet sargı bulunmaktadır. Analizler sadece bir faz için yapıldığından dolayı sadece 2 sargı (sargı1, sargı4) uyarılmıştır. Kalan diğer 2 faz için durum aynıdır (Fenercioğlu ve Tarımer, 2007). Terminaller sargıların tam ortasında sol kenarına yerleştirilmiştir ve bir faza ait karşılıklı sargılardan geçen akım aynı yöndedir. Terminallerin pozisyonu ve akımın yönü Şekil 4.11’de verilmiştir. Burada mevcut durumdaki 6 sargıdan birbirleri ile seri bağlı 1. ve 4. sargıya akım uygulanmaktadır. Stator nüveleri birbirlerinden bağımsız olduğu için verilen uyarımların yönleri önemli değildir.



Şekil 4.11. Terminaller ve akım yönleri

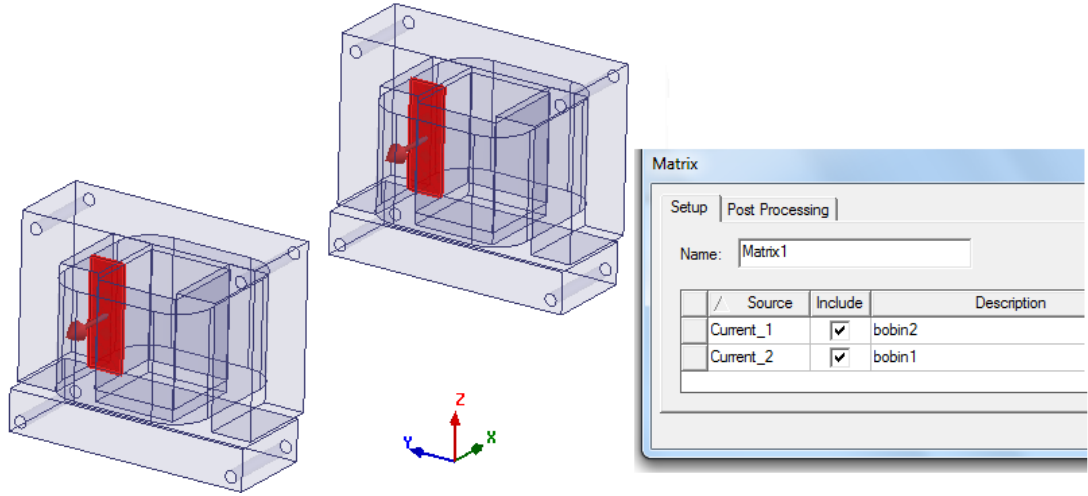
4.2.3. Çözüm Parametrelerinin Tanımlanması

Kuvvetleri bulmak için ilk önce istenilen malzeme seçilerek bu malzeme üzerinde oluşan sadece aksenal kuvvetler çözülmüştür. Simülatör hem zahiri hem de Lorentz kuvvetleri çözebilmektedir. Burada önce translator üzerinde üç ekseninde oluşan zahiri kuvvetleri tanımlanmıştır. İkinci olarak sargıların indüktans ve karşılıklı indüktans sonuçlarının matris formunda elde edilmesi için çözüm tanımlamaları yapılmıştır. Eksenler üzerindeki kuvvet tanımlamaları Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12 Translatör bölgesine kuvvet tanımlanması

Öz ve ortak indüktansın çözülebilmesi için ilk önce sargıların seçilmesi gerekir. Burada dikkat edilmesi gereken indüktansı hesaplanacak sargının mutlaka uyarılması gerekir. Şekil 4.13’de indüktans matrisinin oluşturulduğu program menüsü verilmiştir.



Şekil 4.13. İndüktans matrisinin tanımlanması

4.2.4. Çözüm Süreci

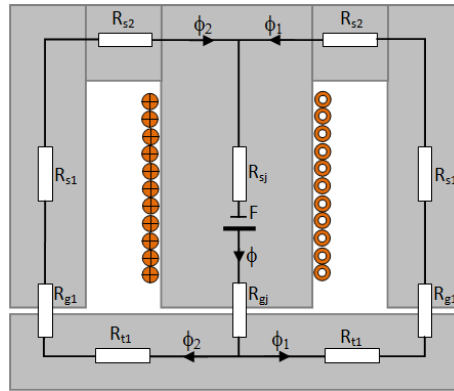
Modelin çizimi, malzeme tanımlamaları, sınır durumlarının atanması ve çözüm parametrelerinin tanımlanmasından sonra çözüm süreci başlamaktadır. Bu süreçte simülatör sonlu elemanlar yöntemiyle ilk önce modeli dört yüzlü elemanlara (tetrahedra) bölerek ağ (mesh) oluşturmaktadır ve bu ağlarda çözüm yapmaktadır. 3D simülatör çözeceği model üzerinde enerji hatasını bularak, hatanın yoğun olduğu bölgelerde ağ sayısını artırarak tekrar çözüm yapar ve bu hatayı azaltmayı sağlar. Sonuçta kullanıcı tarafından belirlenen hedef hata değerine ulaşıncaya kadar ağ sayısını artırıp çözüm yapar. Bu yapılan her bir çözüm iterasyon olarak adlandırılır. Tez modeli için yapılan analizlerde hata oranı %0,5-1, iterasyon sayısı ise 7-9 arasındadır. Daha hassas çözüm yapabilmek için iterasyon sayısını artırmak ve hata yüzdesi azaltmak gerekmektedir (Fenercioğlu, 2006). Yapılan her analizde; bobinler tek kutup halindedir, ancak uygulamada 1 mm çapındaki bobin telleri baz alındığında kutup halindeki bobin hacmine karşılık ortalama 250 sarım yapılabilir. Bobin tellerine uygulanan akım miktarı sarım sayısı ile orantılıdır. Bu yüzden bobinler tek sarım kabul ederek akım miktarları sarım sayısı ile çarpılmıştır. x,y,z eksenindeki kuvvetler ve sargılara ait indüktanslar ve karşılıklı indüktanslar hesap edilmiştir. Her çözüm sonucunda yaklaşık olarak model ve bölge üzerinde toplam 250,000 tetrahedra oluşmuştur.

4.2.5. Statik Manyetik Analiz Sonuçları

Sonlu elemanlar yöntemi yapılan analizler toplam 112 adettir. Her 1 mm lik translator konumu için değişik akım uygulanarak analizler yapılmıştır. Bu analizlerde EI nüvenin manyetik parametreleri, x,y,z eksenindeki kuvvetler, sargılara ait indüktanslar ve karşılıklı indüktanslar hesap edilmiştir.

EI Nüvenin Manyetik Devresi

EI nüve 2 adet UI nüve yapısının birleştirilmesi ile oluşmuş bir yapıdır. EI nüvenin manyetik devre şeması Şekil 4.14'de ve parametreleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. EI nüvenin manyetik devresi

Çizelge 4.2. EI de kullanılan parametreler

Sembol	Parametre	Birim
R_{s1}	1. bacak E stator nüvenin manyetik direnci	H^{-1}
R_{s2}	2. bacak E stator nüvenin manyetik direnci	H^{-1}
R_{sj}	Ortak stator E nüvenin manyetik direnci	H^{-1}
R_{g1}	Hava aralığı manyetik direnci	H^{-1}
R_{gj}	Ortak hava aralığı manyetik direnci	H^{-1}
R_{t1}	I translatör nüvenin manyetik direnci	H^{-1}
F	Manyetomotor kuvvet	At
ϕ_1, ϕ_2	Paralel manyetik akı	Wb
ϕ	Toplam manyetik akı	Wb
N	Bir bobinin tur sayısı	250

Eşitlik 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6'da eyleyicinin faz indüktansını elde etmek için, relüktans denklemleri sırayla hesaplanır.

$$R_{s1} = \frac{h_{sp}}{\mu l_{sy1} w_{sp}} \quad (4.1)$$

$$R_{s2} = \frac{l_{sp} - (l_{sy2} + 2l_{sy1})}{2\mu(h_{sp} - h_{sy})w_{sp}} \quad (4.2)$$

$$R_{sj} = \frac{h_{sp}}{\mu l_{sy2} w_{sp}} \quad (4.3)$$

$$R_{t1} = \frac{l_{tp}}{2\mu h_{tp} w_{tp}} \quad (4.4)$$

$$R_{g1} = \frac{2l_g}{\mu_0 l_{sy1} (w_{sp} + w_{tp})} \quad (4.5)$$

$$R_{gj} = \frac{2l_g}{\mu_0 l_{sy2} (w_{sp} + w_{tp})} \quad (4.6)$$

Toplam indüktans seri ve paralel devre kuralları ile hesaplanır Eşitlik 4.7'de olduğu gibi. Faz indüktansı Eşitlik 4.7' de verilmiştir.

$$\Sigma R = \frac{(R_{s1} + R_{s2} + R_{g1} + R_{t1})^2}{2(R_{s1} + R_{s2} + R_{g1} + R_{t1})} + R_{sj} + R_{gj} \quad (4.7)$$

$$L(x, i) = \frac{2N^2}{\Sigma R(x, i)} \quad (4.8)$$

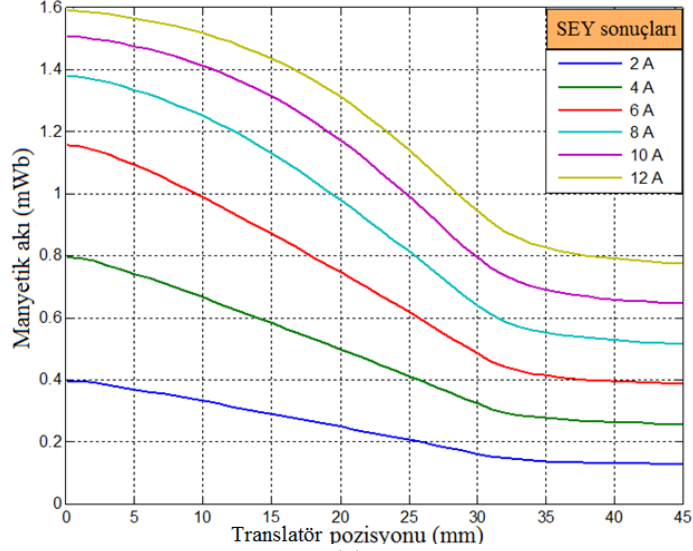
Bir fazın bobin sayısı 2 dir. Manyetik akı (ϕ) ve manyetik akı yoğunluğu (B) Eşitlik 4.9 ve Eşitlik 4.10'da hesaplanmıştır. Şekil 4.15'de bu akılar ve hava aralığı akı yoğunluğunu sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan sonuçlar gösterilmektedir.

$$\phi = \frac{F}{\Sigma R} = \frac{NI}{\Sigma R} \Rightarrow \phi_1 = \phi_2 = \frac{\phi}{2} \quad (4.9)$$

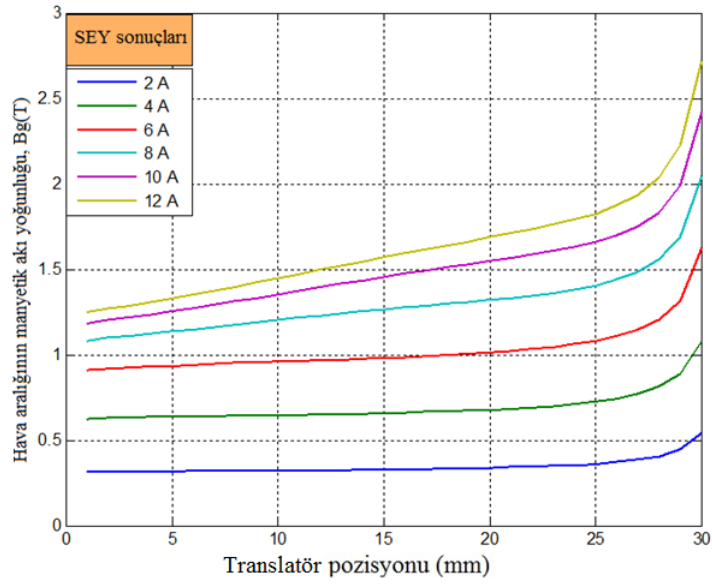
$$B = \frac{\phi}{A} \quad (4.10)$$

Şekil 4.15'te EI nüveler üzerindeki manyetik akı ve hava aralığındaki manyetik akı grafikleri verilmiştir. Manyetik akı grafiğinde translatör pozisyonu çakışık alanlarda en yüksek değerde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni çakışık konumda akı yolu kesitinin maksimum relüktansın minimum olmasıdır. Hava aralığının manyetik akı yoğunluğunda ise yüzey alanı azaldıkça manyetik akılar dar yüzeylerden geçmeye

çalışacakları için akı yoğunluğu pozisyon değişimine göre artmakta ve bu bölgelerde doyum oluşmaktadır.



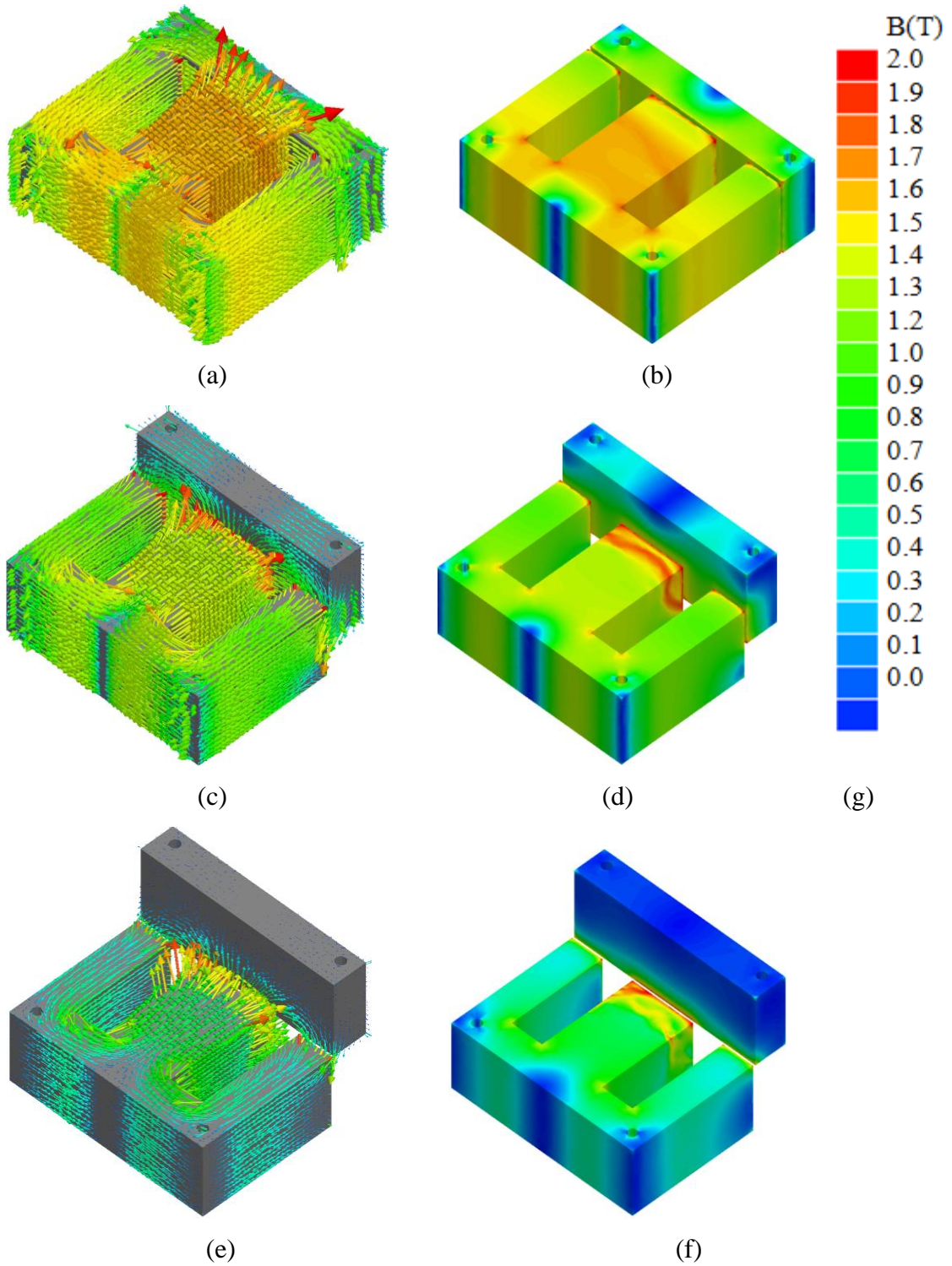
(a)



(b)

Şekil 4. 15. (a) Manyetik akılar, (b) Hava aralığında manyetik akı yoğunluğu

Hava aralığında manyetik akı yoğunluğu çakışık ve çakışık olmayan pozisyonlarda sunulmaktadır. Translatör hareket ederken ve nüve doyuma başladığında hava aralığının kesiti daha küçüktür. BH eğrisinin diz noktası 1.5 Tesla civarındadır. Nüvede diz noktasından sonra doyum başlar. Şekil 4.16'da 3 farklı pozisyon için büyüklükleri ve vektörlerine göre EI manyetik nüvenin manyetik akı yoğunluğu gösterilmektedir.



Şekil 4.16. Manyetik akı yoğunluğuna göre dağılımı:

(a) çakışık (0mm) pozisyonda B vektör, (b) çakışık (0mm) pozisyonda B genliği, (c) ara çakışık (15 mm) pozisyonda B vektör, (d) ara çakışık (15 mm) pozisyonda B genliği, (e) çakışmayan (30mm) pozisyonda B vektör, (f) çakışmayan (30mm) pozisyonda B genliği, (g) Tesla ölçeği

Şekil 4.16’da nüvede doyuma gitme, saçaklanma, kaçak akı ve düzgün olmayan akı dağılımları sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan statik manyetik analizler ile görülmektedir. Yani sadece doğrusal statik manyetik hesaplama değerleri verilmemektedir. Şekil 4.16’ da görüldüğü gibi akılar sivri köşeleri tercih etmemektedir. Dairesel nüve yapıları düzgün akı dağılımları için idealdir. Bu tasarımda köşelerin dairesele olmamasının nedeni sabitleme vida deliklerinin buralarda bulunuyor olmasından kaynaklanır. Şekil 4.16’ da görüldüğü gibi bobin sarmallarında ve E nüvenin uç kısımlarında manyetik akı doyuma gitmiştir. En yoğun bölge çakışık konumdaki bölgedir. Bu bölgede E nüveler kendilerine doğru istenmeyen yönde yüksek bir çekim kuvvetine sahiptir, ancak itme kuvveti üretmezler. İtme kuvveti başka bir anahtarlama yardımı ile faz değiştirerek gerçekleşmektedir.

EI Nüvenin İndüktans Değerleri

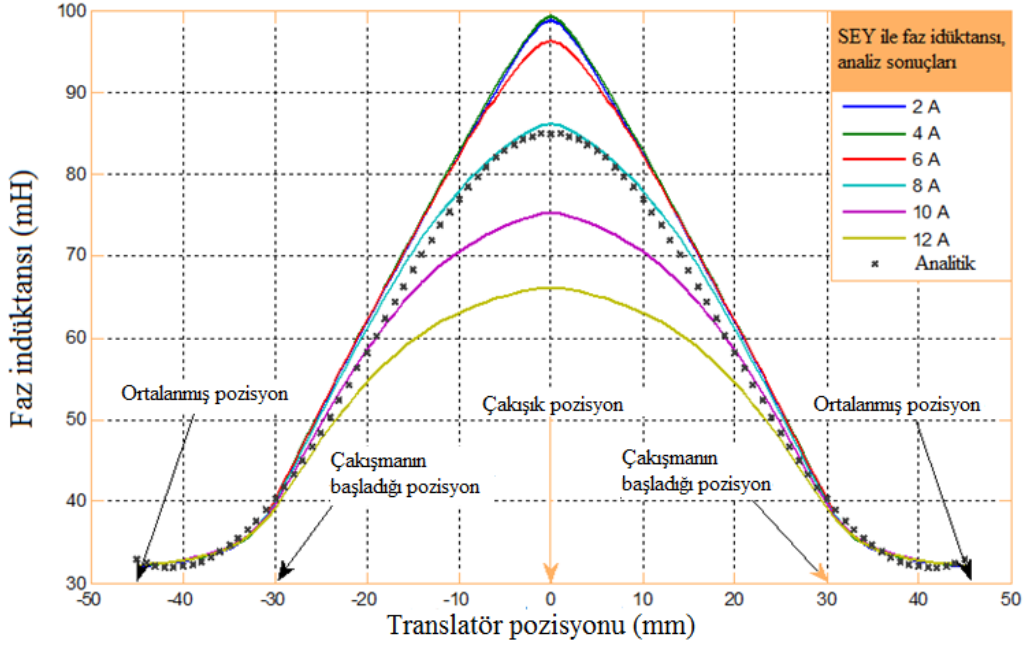
Faz indüktansı translatör pozisyonları (x) ve faz akımı (i) değerlerine bağlıdır. Faz akımının indüktans profiline BH karakteristiğinden dolayı etkileri vardır Malzeme doyuma gittikçe indüktansı azalır. Çünkü nüve malzemenin B-H eğrisi doğrusal değildir (Jang ve ark., 2006). Manyetik geçirgenlik $\mu = \mu_r \mu_0$ ve μ_r katsayısı BH eğrisine bağlıdır. Bu durum sonlu elemanlar analizi ile dikkate alınır. Faz indüktansı çakışık pozisyonda maksimum değerine (L_a) ulaşır ($x = 0$), ortalanmış pozisyonlarda ise minimum değerine (L_u) ($x = 45$) ulaşır. Orta pozisyonda indüktans (L_m) elde edilir ($x = 22,5$ mm). Bu pozisyonlar analitik hesaplamalarda indüktans profilini elde etmek için önemlidir. Eğer maksimum değer hesaplanırsa, orta çakışık ve ortalanmış değerler Eşitlik 4.11’den tahmin edilebilir. Bu eğri uydurma yöntemi ile Fourier serilerinin ilk üç terimi ile türetilmiştir. (Gao ve ark., 2004; Daldaban ve Üstkoyuncu, 2009) Şekil 4.17’ faz indüktansı profili gösterilmektedir.

$$L(x) = a_0 + a_1 \cos(k \cdot n_{tp} x) + b_1 \cos(k \cdot 2n_{tp} x) \quad (4.11)$$

Fourier’in a_0 , a_1 ve b_1 katsayıları Eşitlik 4.12’de verilmiştir. k katsayısı trigonometrik ifade de açılmal değeri doğrusal uzunluğa dönüştürmek için gereklidir ve Eşitlik 4.13’de verilmiştir. (Fenercioğlu ve Dursun, 2010).

$$a_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{L_a + L_u}{2} + L_m \right], a_1 = \frac{L_a - L_u}{2}, b_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{L_a + L_u}{2} - L_m \right] \quad (4.12)$$

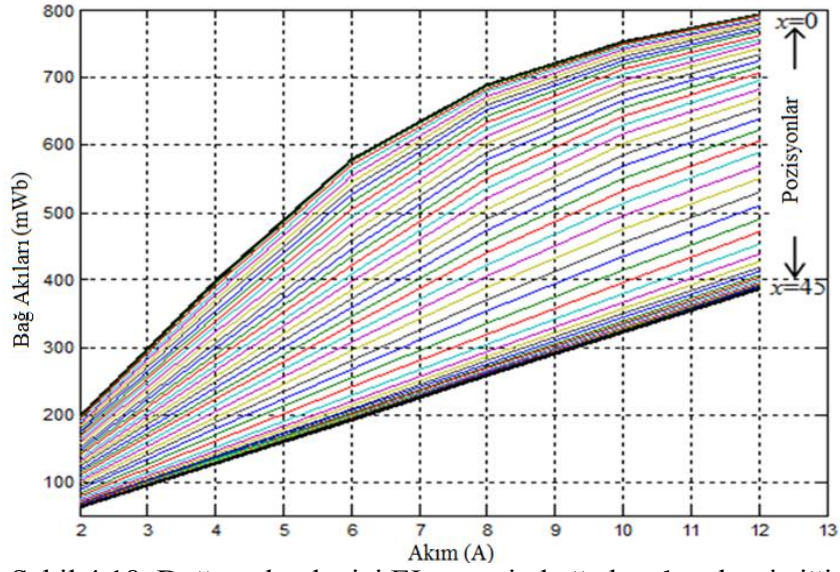
$$k = \frac{2\pi}{l_s} \quad (4.13)$$



Şekil 4.17. Doğrusal eyleyici EI nüvenin indüktans profili

Translatörün her 1 mm hareketi ile oluşan pozisyonlar için 0-45 mm arasında SEY analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda BH eğrisi ile orantılı olarak akımın artışı ile faz indüktansı değerleri azalmaktadır. Bu durum Şekil 4.17'de gösterilmektedir. Stator ve translatör kutupları modüler yapıda olduğundan aynı çekirdek üzerinde değildir. Bu durumda kutuplar aynı manyetik devre içerisinde yer almaz. Bu nedenle karşılıklı indüktans ihmal edilebilecek kadar azdır. Fakat faz indüktansı analiz sonuçlarında karşılıklı indüktansı içermektedir. Bağ akısı Eşitlik 4.14'te verilmektedir (Fenercioğlu ve Tarimer, 2007).

$$\lambda(x, i) = L(x, i)I \quad (4.14)$$

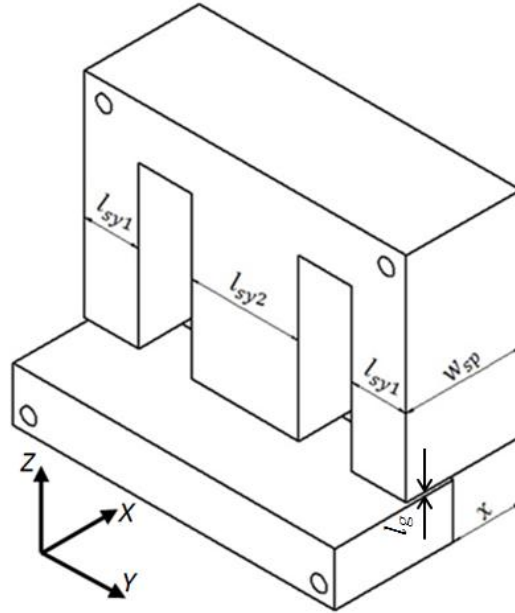


Şekil 4.18. Doğrusal eyleyici EI nüvenin bağ akısı karakteristiği

Şekil 4.18'de doğrusal eyleyicide EI nüvenin her pozisyon için akıma göre bağ akılarının grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde akım değeri arttıkça bağ akılarının BH karakteristiği ile uyumlu olarak arttığı gözükmemektedir. En yüksek bağ akısı değeri çakışık konumda verilmiştir.

EI Nüvenin Kuvvet Üretimi

Sonlu elemanlar yöntemi ile hazırlanan bu eyleyicide 3 eksende kuvvet oluşmaktadır. Bunlar itme kuvveti (F_x), yatay kuvvet (F_y) ve çekme kuvveti (F_z)'dir.



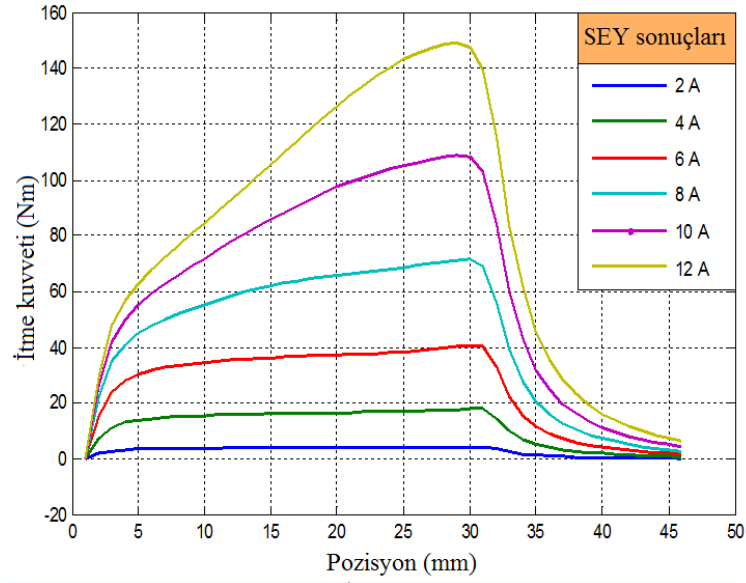
Şekil 4.19. Eyleyicinin kuvvet bileşenleri

Kuvvet bileşenleri Eşitlik 4.15. ve Eşitlik 4.16 gösterilmiştir. (Gan ve ark 2003; Krishnan, 2001,) Bu kuvvetlerden (F_y) kuvveti ihmal edilebilecek bir kuvvettir, çünkü bu kuvvet yönünde yataklama sistemleri mevcuttur. Bu yüzden sıfır olarak hesaplanır. Çekme kuvveti olan (F_z) kuvveti istenmeyen kuvvettir, çekme kuvveti manyetik akı yoğunluğundan dolayı statorun translatör kutbunu kendisine doğru çekme hareketidir. Çekme kuvveti yürütme kuvvetinden oldukça yüksektir. Bu kuvvetin değer aralığı Şekil 4.20'de gösterilmiştir. İtme kuvveti olan (F_x), ise tasarlanan otomatik kapıya hareket sağlayan yürütme kuvvetidir (Fenercioğlu ve Dursun, 2011).

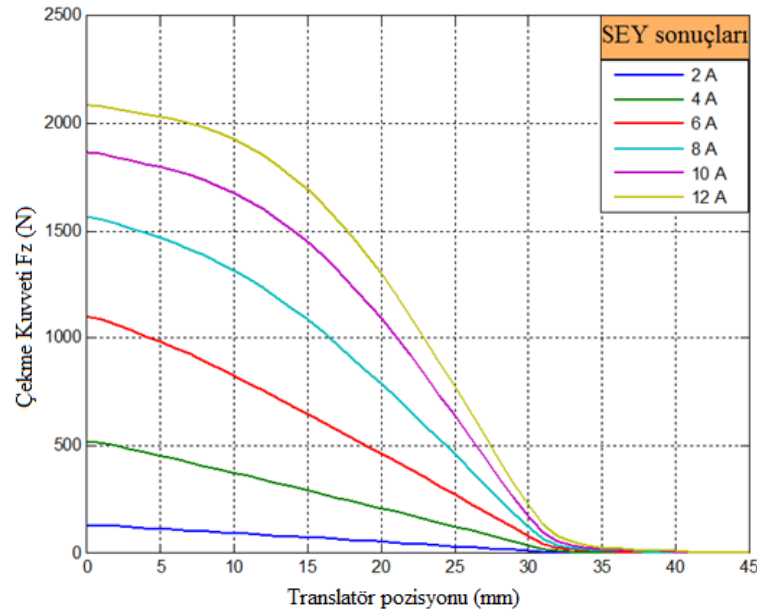
$$F_{x1} = \frac{B_g^2}{2\mu_0} XY = \frac{B_g^2}{2\mu_0} (2l_{sy1} + l_{sy2})(w_{sp} - x) \Rightarrow F_x = 2F_{x1} \quad (4.15)$$

$$F_{z1} = \frac{B_g^2}{2\mu_0} XZ = \frac{B_g^2}{2\mu_0} l_g(w_{sp} - x) \Rightarrow F_z = 2F_{z1} \quad (4.16)$$

Şekil 4.20'de verilen eyleyicinin translatör pozisyonlarına göre F_x kuvveti ve F_z kuvvetleri verilmiştir. BH eğrisi baz alındığında öngörülen nüve yapısının 8 Amper uyarımda akının, hava aralığında 1.5 Tesla'ya ulaştığı ve bu noktada doyumun başladığı görülmektedir. Bu nedenle grafik sonuçlarına bakıldığında F_x kuvvetinin en yüksek uç konumdaki değeri 70 Newton olmaktadır. Ancak malzeme doyuma gitmemiş olsaydı malzeme 12 Amper'de yaklaşık 150 Newton değerine ulaşacaktır. F_z kuvveti incelendiğinde bu kuvvetin doyum noktasındaki değeri baz alınmalıdır. Buna göre çakışık konumda yaklaşık 1600 Newton'luk değere ulaşan F_z kuvvetinin mekanik olarak ortadan kalkması gerekmektedir.



a)



b)

Şekil 4.20. a) Eyleyicinin F_x kuvveti b) Eyleyicinin F_z kuvveti

4.2.6. Statik Manyetik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Statik manyetik analizler doğrultusunda enine akılı doğrusal hareket oluşturan EI nüveler tek taraflı olarak tasarlanmıştır. 3 fazlı 6/4 lük bir ARM mantığına sahip bu eyleyici sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizleri incelenmiştir ve analitik yaklaşımlar tarafından doğrulanmıştır. Manyetik nüve akıları, hava aralığı akı

yoğunluğu, faz indüktansı, bağ akıları ve eksensel kuvvetler 3D sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmıştır. BH karakteristiği, kaçak akı, saçaklanma, manyetik doyum ve karşılıklı indüktans çözümleri dikkate alınarak simülasyonlar yapılmıştır. Bu sonuçlar analitik tahminler ile doğrulanmıştır.

Yapılan analizler sonucunda EI nüvelerin 2000 Amper-tur (At) magnetomotiv kuvvet (8 amper 250 tur) ile 1.5 tesla akı değerine ulaştığı görülmüştür. Bu değer BH eğrisinin doyum başlangıç noktasıdır. EI nüve 2000 amper-tur değerlerine ulaştığında F_x kuvveti 70 Newton itme kuvveti değerine ulaşır. F_z kuvveti ise 1600 Newton çekme kuvvetine ulaşmıştır.

Elde edilen bu kuvvet değerleri sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan yapısal analizlerde referans olarak alınmıştır.

4.3. Doğrusal Eyleyicinin Yapısal Analizi

Otomatik kapı tasarımında kullanılacak eyleyicinin çalışma anında eksenlerde belirli kuvvetler oluşturduğunu statik manyetik analizlerde bulunmuştur. Oluşan bu kuvvetlerin tasarlanan kapının malzemeleri üzerinde deformasyonu, yer değiştirme oranını ve malzemenin güvenilirliğini sonlu elemanlar yöntemi ile yapısal olarak hesaplatılmıştır. Bu işlem statik manyetik analizler sonucunda elde edilen kuvvetlerin çalışma anında malzemede kalıcı bir zarara yol açıp, açmadığını önceden tahmin etmektir.

Bilgisayar destekli yapısal analizlerde kapı sisteminin bir kısmı hesaplara katılmıştır. Örneğin translatör üzerindeki toplam yer değiştirme değerleri hesaplanırken kapı sistemi işlem dışında tutulmuş onun yerine ağırlık ve yerçekimi değerleri hesaplanarak z ekseninde bir kuvvet tanımlanmıştır. Analiz sürecinde analize etkisi olmayan malzemelerin hesaplama dışında bırakılması bizim için ağ oluşumu ve çözüm kısmında programın fazladan hesaplama yükünü ortadan kaldırır. Ayrıca sonuçların daha kaliteli ve gerçekçi olmasına imkân sağlar.

Yapısal analizler özellikle 1600 Newton olarak hesaplanan z eksenindeki kuvvet translatör kutbuna ve bununla birlikte stator kutbunun rulman çaplarının üzerinde uygulanan kuvvetin eyleyicinin mekanik yapısına etkilerini hesaplamaktır. Bu hesaplamalarda sonuçların daha net anlaşılabilmesi için translatör kutbu tek olarak hesaplanmış ve ayrıca bütün sistemi hesaplamaya katılarak rulmanlarda oluşabilecek stresler hesaplanmıştır.

Bu işlemler sırayla malzemelerin tanımlanması, kuvvet değerlerinin belirlenmesi, kapı sisteminin gerçekte sabit olan bölümlerinin belirlenip yapısal analizde o bölgeleri sabit olarak alınması, kuvvetlerin eksenlerinin bulunup o eksenlerden ve bölgelerden uygun kuvvet değerlerinin girilmesi, kullanılacak ağ tipi ve sayısının belirlenmesi, analiz süreci ve son olarak sonuçların yorumlanmasıdır.

4.3.1. Translatör Kutbunun Yapısal Analizleri

Bu çalışmada ilk olarak statik manyetik analizler sonucunda z ekseninde 1600 Newton ve x ekseninde 70 Newton olarak belirlenen translatör kutbunun malzeme üzerindeki en yüksek yer değiştirme sonuçlarını hesaplamaktır. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda translatör kutbundaki en yüksek esneme nerelerde ve ne kadar olduğunu bulmak amaçlanmıştır. İlk olarak translatör kutbunun malzemelerinin tanımlanma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Translatör Kutbunun Malzeme Tanımlamaları

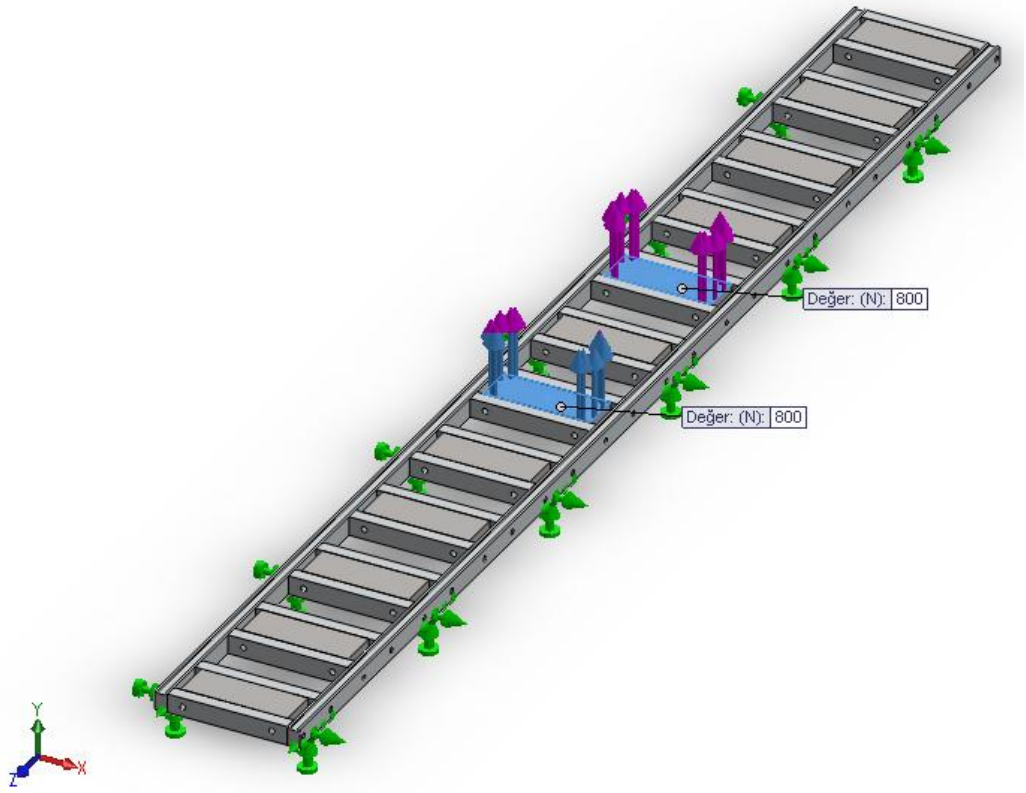
Translatör kutbunda kullanılan malzemeler I nüveleri oluşturan silisli saç malzeme ve bu nüvelerini sabitlemek için kullanılan alüminyum malzemelerdir. Sabitleme malzemesi olarak alüminyum malzemeler manyetik olmayan, oldukça dayanıklı ve piyasada kolay bulunabilen bir malzeme oldukları için projede translatör ve stator malzemelerin sabitlenmesinde kullanılmıştır. Malzeme tanımlama işlemi bittikten sonra uygun kuvvetlerin belirlenmesi işlemi gerçekleştirilmektedir.

Translatör Kutbunun Kuvvet Değerlerinin Belirlenmesi

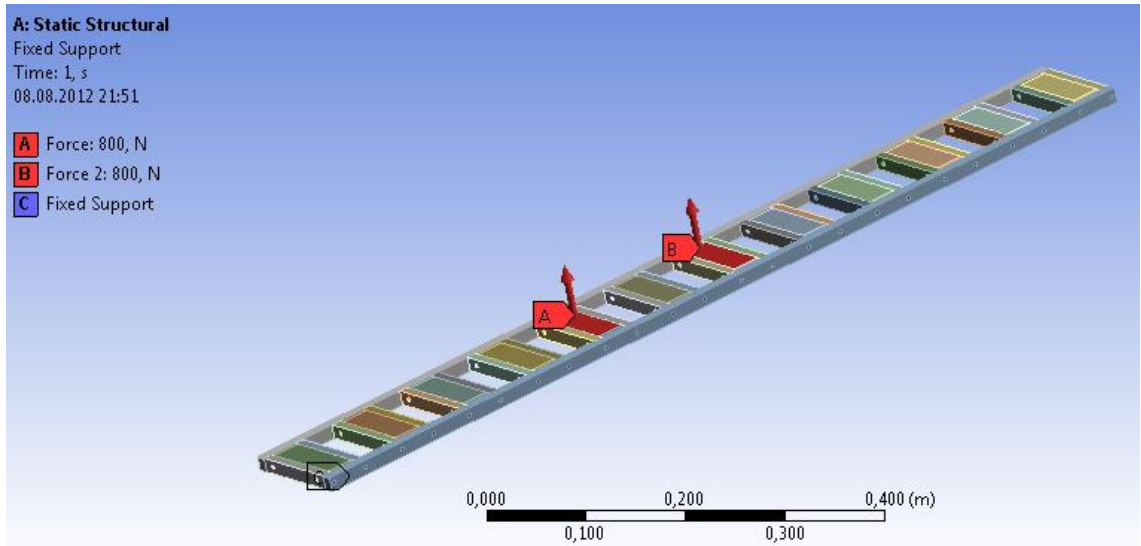
Yapılan çalışmaların sonucunda EI nüvelerin 2000 Amper-tur (At) magnetomotiv kuvvet (8 amper 250 tur) ile 1.5 tesla değerine ulaştığı görülmüştür. Bu değer B-H eğrisinin doyum başlangıç (knee point) noktasıdır. Yani EI nüvenin manyetik doyum değeridir. EI nüve 2000 amper-tur ulaştığında F_x kuvveti 70 Newton itme kuvveti değerine ulaşır. F_z kuvveti ise 1600 Newton çekme kuvvetine ulaşmıştır. Belirlenen bu sonuçları yapısal analiz programlarına kuvvet değerleri olarak girilmelidir. Translatör kutbu kapı sistemine bağlı olduğundan çekme kuvvetine karşılık ters yönde kapının kendi ağırlığı da olacaktır. Bu ağırlık CAD tasarım programı sayesinde otomatik olarak hesaplanmaktadır. Bu değer yaklaşık olarak 30 kilogram olarak hesaplanmıştır. Bu da yaklaşık 300 Newton gibi bir değer olacaktır. Ancak en yüksek esneme yaşanan noktalarda bu kuvvetin hissedilmesi daha az olacağından 1600 Newton iki translatöre de eşit olarak paylaştırılmıştır.

Translatör Kutbunun Sabitleme Alanları ve Kuvvet Yönlerinin Seçimi

Translatör kutbunun sabitleyici elemanları olarak kapı ve translatör kutbunun birbirleri ile bağlantı noktaları seçilmiştir. Toplam 12 adet 3.5 milimetre çapında vida ile translatör ve kapı birbirlerine bağlıdır. Bu durumda kapı kısmında bir esneme olmayacağından bu noktalar sabitleyici nokta olarak seçilmiştir. Kuvvetin hangi translatör kutbuna uygulanacağına ARM mantığına dayanarak 6/4 karşılık gelen translatörlere uygulanır. Çünkü statorun 6 kutup 3 faz olduğu durumda her seferde 2 kutup tetikleneceğinden, translatörün de bunlara karşılık gelen 2 kutbu birden tetiklenecektir. En yüksek esneme noktası olarak translatör kutuplarının merkezi yakın noktalardan olacağından buradan 2 adet translatör kutbuna kuvvet verilmiştir. Bu kuvvet değerleri 1600 Newton olan eşik değerini 2 translatöre eşit bölerek paylaştırılmıştır. Şekil 4.21. ve Şekil 4.22'de iki ayrı sonlu elemanlar program ile translatör kutbunun sabitleme noktaları ve kuvvet değerleri verilmiştir.



Şekil 4.21. Translatör kutbunun sabitleme noktaları ve kuvvet değerleri

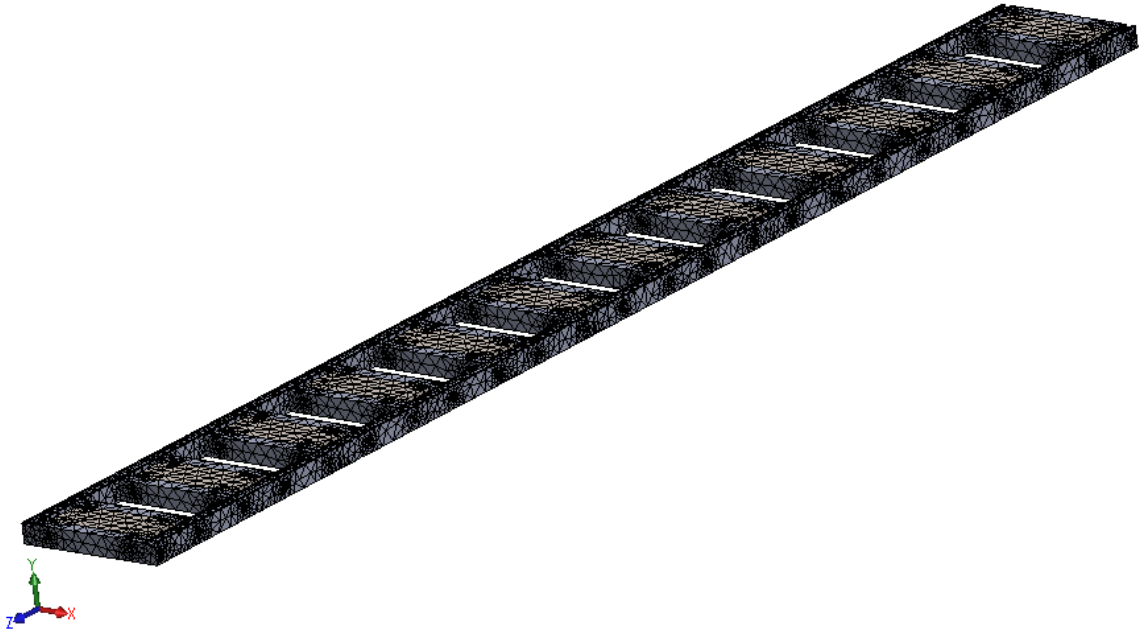


Şekil 4.22. ANSYS ile translatör kutbunun sabitleme noktaları ve kuvvet değerleri

Translatör Kutbunun Uygun Ağ Artırımı (mesh refinement) Belirlenmesi

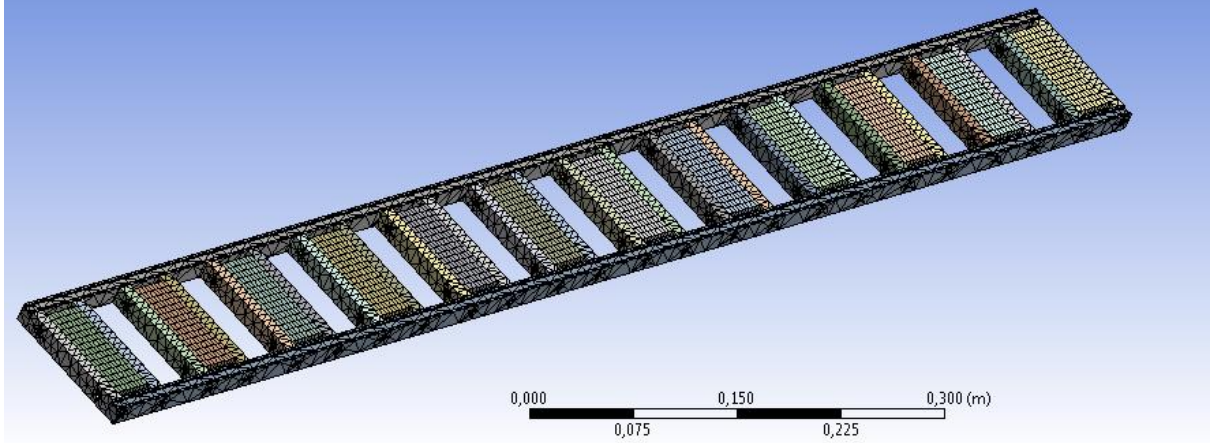
Ağ yöntemi doğrusal veya doğrusal olmayan geometrileri ufak parçalara ayırıp şekillerin hacim veya alan gibi değerlerinin hesaplanmasında en yakın sonucu bulmaya olanak sağlar. Alanın tam bir çözümünü elde etmek için sistem alan için yeterli küçük değerlere göre boyutlandırılmış dörtyüzlü elemanlarda denebilir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapısal analizlerde ağ sayısı ve tipi önemlidir. Ağ kalitesi analizi sonuçlarını doğrudan etkiler. Ağ kalitesi ise geometri ile doğrudan orantılıdır. Çünkü iyi bir ağ kalitesi elde edebilmek için geometrik şeklin olabildiğinde sade ve doğrusal olması istenir. Bununla beraber ağ sayısı ve düğüm noktalarının belirlenmesinde geometrik şeklin yapısı ve kullanıcının isteğine göre değişmektedir. Ağ tipi genellikle tetrahetra denilen dörtyüzlü üçgenler kullanılır. Bunun dışında hex dominant, sweep ve multizone isminde farklı ağ çeşitleri de seçilebilir.

Şekil 4.23’de görülen ağ tipi tetrahedralardan oluşan, 192397 adet düğüm noktası ve 116696 adet elemana bölünerek oluşturulmuştur.



Şekil 4.23. Translatör kutbunun ağı gösterimi

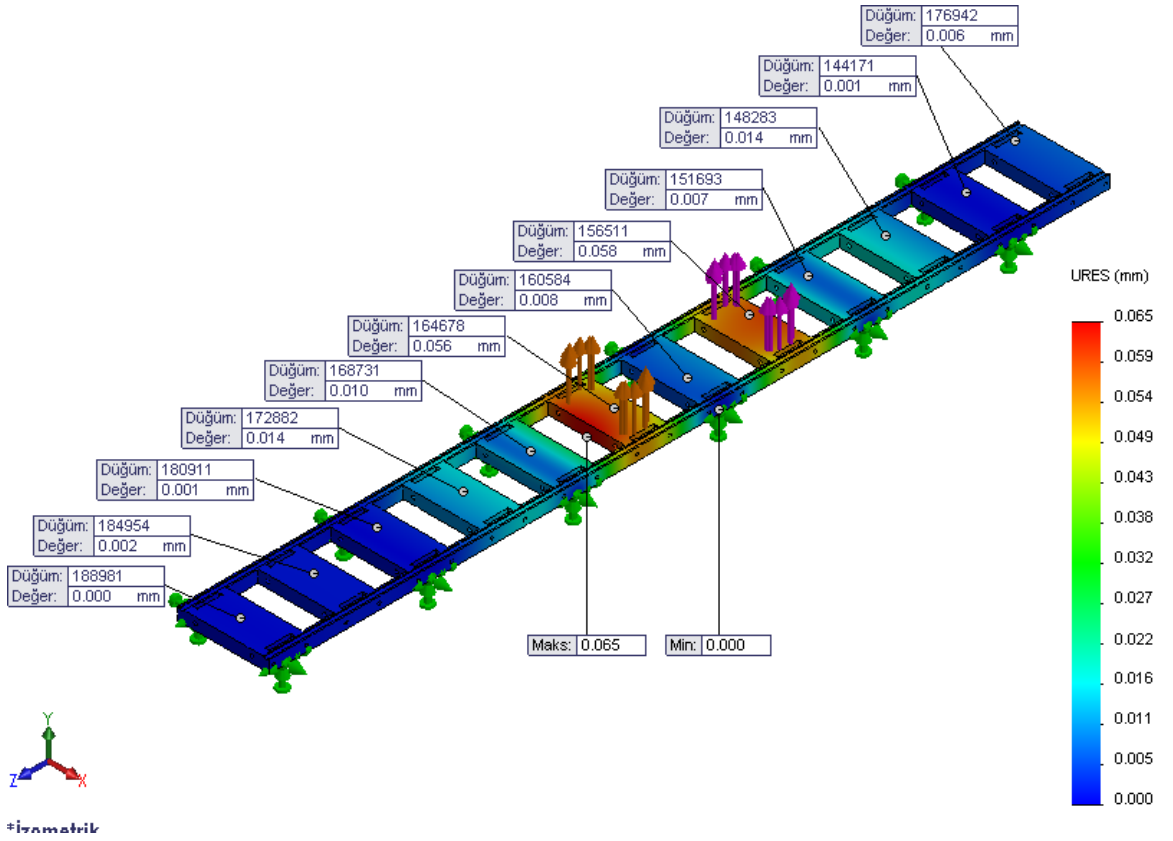
Şekil 4.24’de görünen ANSYS programında ise oluşturulan ağ tipi tetrahedralar, hex dominant, sweep ve multizone tiplerini otomatik olarak program seçmektedir. Burada 127822 adet düğüm noktası ve 52316 adet elemana bölünerek oluşturulmuştur.



Şekil 4.24. ANSYS translötör kutbunun ağı gösterimi

Translötör Kutbunun Yapısal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

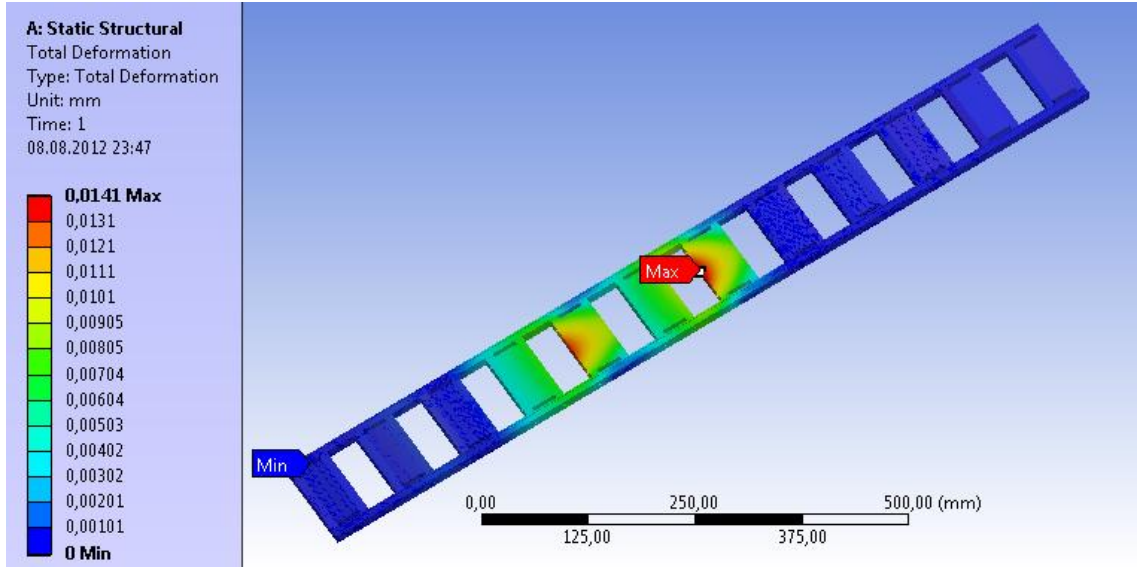
Translötör kutbu analizinde malzemede 2 önemli unsur ön plana çıkmıştır. Birincisi 1600 Newton’luk bir kuvvete karşın translötör kutbundaki esneme, ikincisi ise bu esnemede alüminyum malzeme meydana gelebilecek deformasyonların belirlenmesidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerin sonucunda malzemelerdeki esneme Şekil 4.25’de genel olarak uygulanan kuvvetlere karşın esneme miktarları milimetre cinsinden verilmiştir. Burada 12 translötörün ortalama esnemesi ile en az ve en çok esnemenin nerelerde gerçekleştiği verilmiştir.



Şekil 4.25. Esneme miktarlarının gösterimi

Bu sonuçlara göre en yüksek esneme 0.065 milimetre çıkmıştır ve esnemenin en yüksek olduğu bölge kuvvetin uygulandığı bölgedir. Bu sonuç göz ardı edilebilecek kadar küçük bir değerdedir.

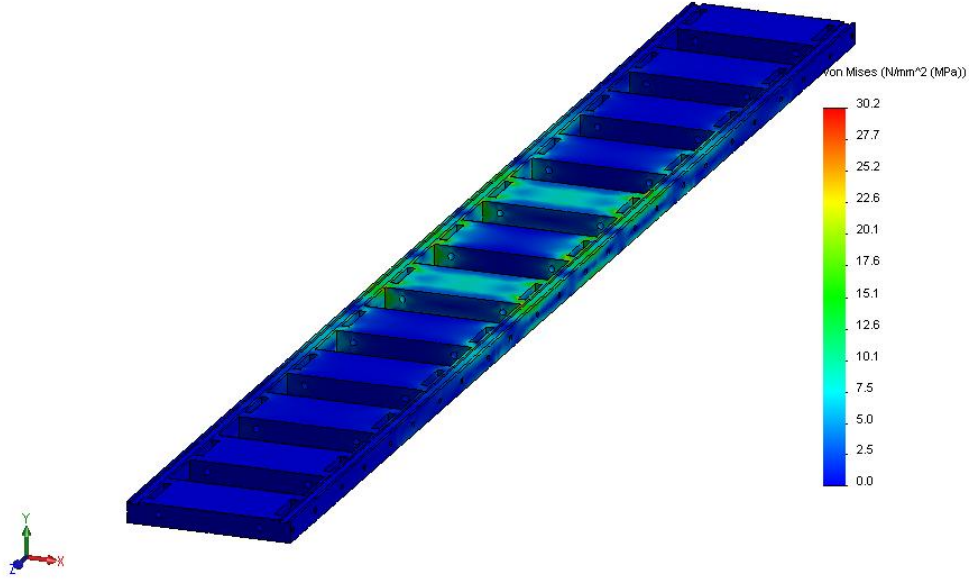
Şekil 4.26'da ANSYS'de ise toplam yer değiştirmeye karşılık toplam deformasyon oranı hesaplatılmıştır. Bu hesaplama göre kuvvet uygulanan bölgede en yüksek deformasyon değeri olarak 0,0141 milimetre olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.26. ANSYS’de toplam deformasyon oranı

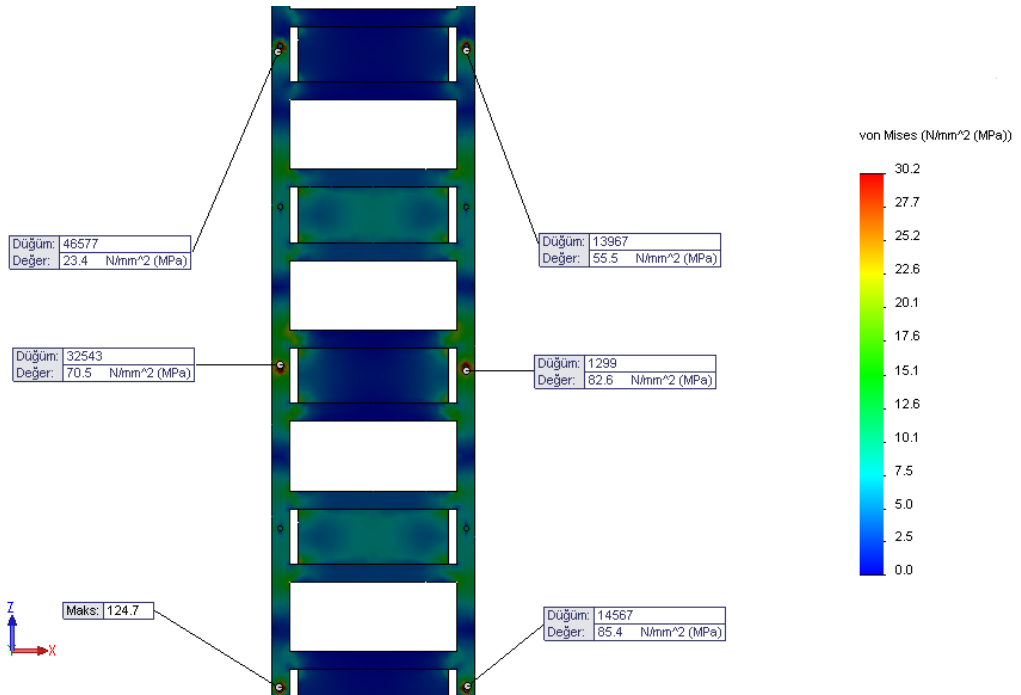
Toplam esneme oranı hesaplandıktan sonra bu kuvvetlere karşılık malzemenin dayanımı hesaplanmıştır. Burada sabitleme elemanı olarak kullanılan alüminyum alaşımların 1600 Newton karşın malzemede oluşabilecek hasarlar hesaplanmıştır. Alüminyum alaşımın akma mukavemeti (Yield Strength) yaklaşık olarak 280 Mega Paskal’dır. Yani sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleşen analizlerde akma mukavemetini geçmeyen Eşdeğer gerilme (Equivalent (von-mises) Stress) değerleri için malzemede yırtılma veya geri dönüşümsüz bir hasar oluşmamaktadır.

Yapılan sonlu elemanlar yöntemi analizinde Şekil 4.27’ de görüldüğü gibi malzemenin ortalama Eşdeğer gerilme (Equivalent (von-mises) Stress) 5 Mega Paskal civarındadır. Ancak Şekil 4.28’de en yüksek gerilmenin yaşandığı yer olarak 124,7 Mega Paskal olarak belirlenmiştir. Bu durumda dahi malzemede deformasyon oluşmamaktadır.



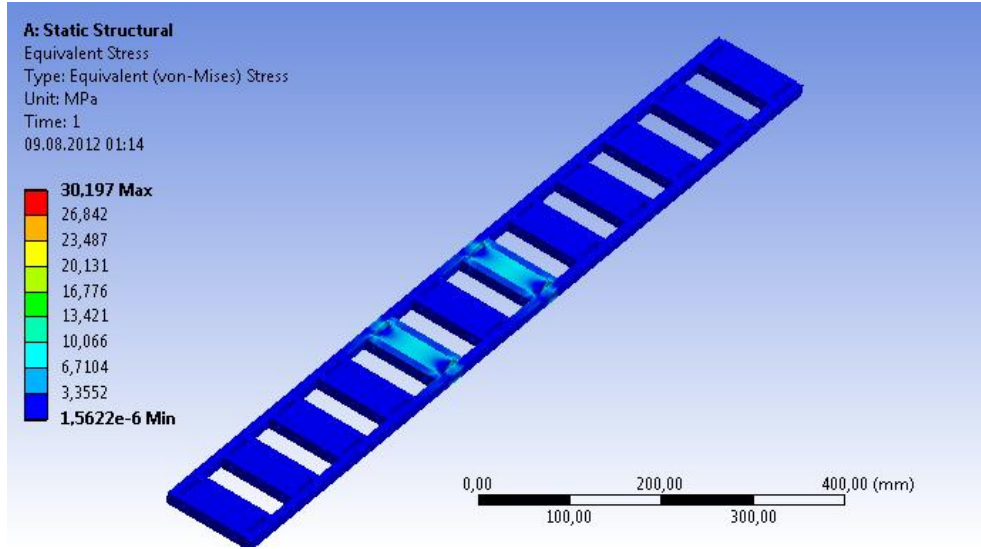
Şekil 4.27. Eşdeğer gerilme (Equivelent (Von-Mises) Stress)

Şekil 4.28'de görüldüğü gibi en yüksek gerilmenin yaşandığı yer olarak 124,7 Mega Paskal olarak belirlenmiştir. Bununla beraber kuvvet bölgesindeki kapı ile bağlantının sağlandığı vida bölümlerinde yüksek oranlarda gerilmeler mevcuttur. Bu durumda dahi malzeme akma mukavemetini geçmediği için deformasyon oluşmamaktadır.



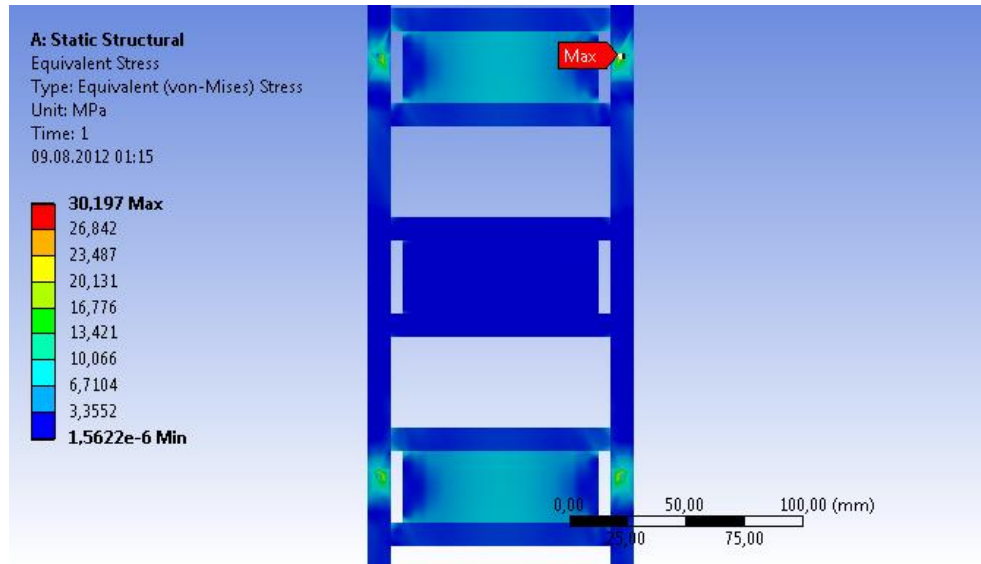
Şekil 4.28. Translatör üzerinde gerilmenin yaşandığı bölgeler

Şekil 4.29'de görüldüğü gibi ANSYS'de gerçekleştirilen sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan yapısal analizlerinin ortalama gerilme değerleri 5 mega paskal değerindedir. Bu değer malzemenin güvenli bölgelerde çalıştığını göstermektedir.



Şekil 4.29. ANSYS ile Eşdeğer gerilme (Equivelent (Von-Mises) Stress)

Şekil 4.30'de görüldüğü gibi en yüksek gerilmenin yaşandığı yer olarak uygulanan kuvvet bölgesindeki, kapı ile bağlantının sağlandığı vida bölümlerinde yüksek oranlarda gerilmeler mevcuttur. Bu durumda malzeme akma mukavemetini geçmediği için deformasyona uğramamaktadır.



Şekil 4.30. ANSYS ile Translatör üzerinde en yüksek gerilmenin yaşandığı bölgeler

4.3.2. Otomatik Kapının Eyleyicisinin Yapısal Analizleri

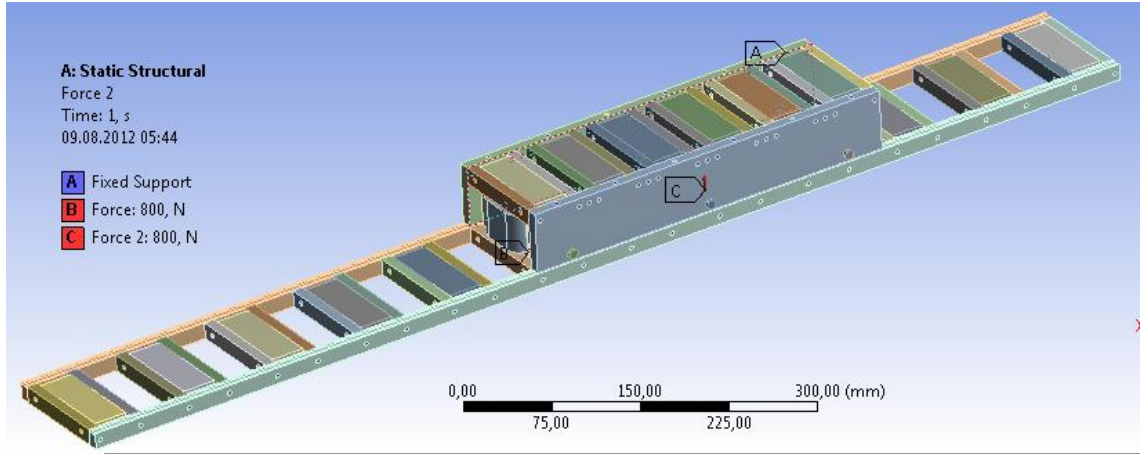
Bu çalışmada ilk olarak statik manyetik analizler sonucunda z ekseninde 1600 Newton ve y ekseninde 70 Newton olarak belirlenen translatör kutbunun malzeme üzerindeki en yüksek yer değiştirme sonuçlarını hesaplamaktır. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda otomatik kapının en yüksek gerilme değerinin malzemelerin akma mukavemetini ile karşılaştırılmıştır.

Otomatik Kapının Eyleyicisinin Malzeme Tanımlamaları

Translatör kutbunda kullanılan malzemeler E ve I nüvelerden oluşan saç malzeme ve bu nüvelerini sabitlemek için kullanılan alüminyum malzemedir. Sabitleme malzemesi olarak alüminyum malzemeler statik manyetik alandan etkilenmeyen, oldukça dayanıklı ve piyasada kolay bulunabilen bir malzeme oldukları için projede translatör ve stator malzemelerin sabitlenmesinde kullanılmıştır. Rulman ve rulman milleri çelik alaşım olarak seçilmiştir. Malzeme tanımlama işlemi bittikten sonra uygun kuvvetlerin belirlenmesi işlemi gerçekleştirilmektedir.

Eyleyicinin Sabitleme Alanları ve Kuvvet Yönlerinin Seçimi

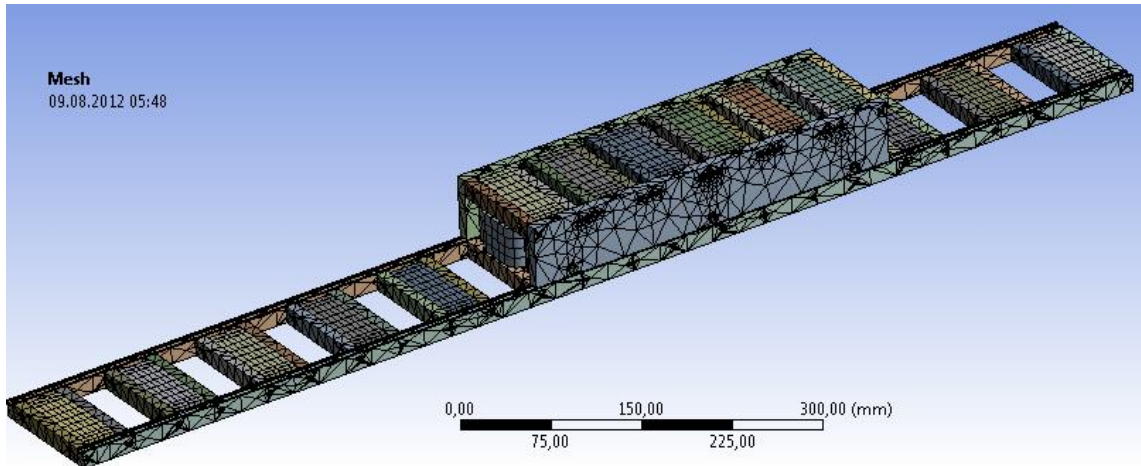
Otomatik Kapının sabitleyici elemanları olarak stator ve duvar arasında birbirleri ile bağlantı noktaları seçilmiştir. Toplam 12 adet 3.5 milimetre çapında vida ile stator ve duvar arasında birbirlerine bağlıdır. Bu durumda duvar kısmında bir esneme olmayacağından bu noktalar sabitleyici nokta olarak seçilmiştir. Kuvvetin hangi translatör kutbuna uygulanacağına anahtarlamalı relüktans motorların mantığına dayanarak 6/4 karşılık gelen translatörlere uygulanır. Yani statorun 6 kutup 3 faz olduğu durumda her seferde 2 kutup tetikleneceğinden, statorun da bunlara karşılık gelen 2 kutbu birden tetiklenecektir. En yüksek esneme noktası olarak translatör kutuplarının merkezi yakın noktalardan olacağından buradan 2 adet translatör kutbuna kuvvet verilmiştir. Bu kuvvet değerleri 1600 Newton olan eşik değer 2 translatöre eşit bölerek paylaştırılmıştır. Şekil 4.31'de iki ayrı sonlu elemanlar program ile stator-translatör sabitleme noktaları ve kuvvet değerleri verilmiştir.



Şekil 4.31. ANSYS eyleyicinin sabitleme noktaları ve kuvvet değerleri

Eyleyicinin Uygun Ağ Yapısının (mesh refinement) Belirlenmesi

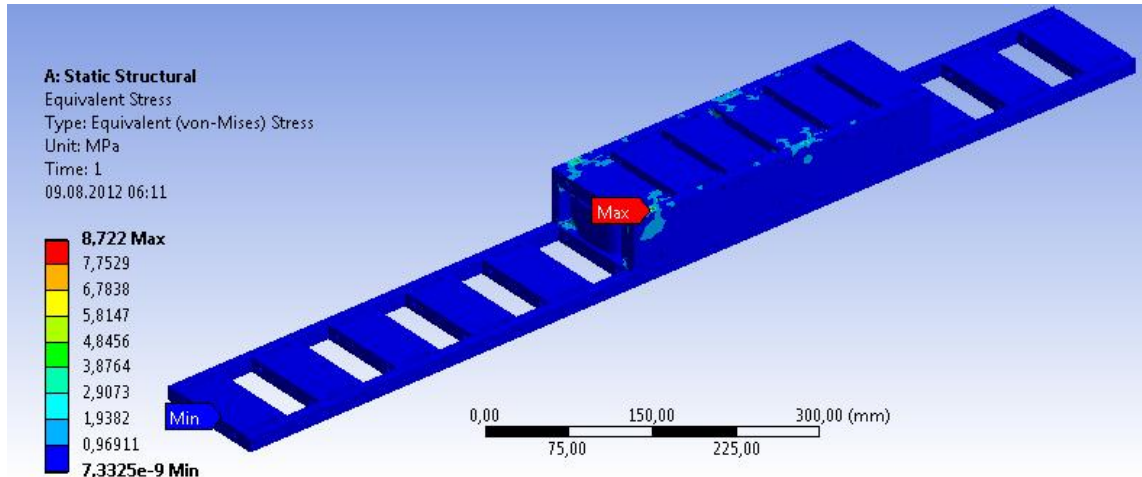
Şekil 4.32’de görünen ANSYS programında ise oluşturulan ağ tipi tetrahedralar, hex dominant, sweep ve multizone tiplerini otomatik olarak program seçmektedir. Burada 145308 adet düğüm noktası ve 64016 adet elemana bölünerek oluşturulmuştur.



Şekil 4.32. ANSYS eyleyicinin ağı gösterimi

Eyleyicinin Yapısal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Eyleyicinin sonlu elemanlar yöntemi ile yapısal analizinde malzemede 1600 Newton'luk bir kuvvete karşın rulman mili üzerindeki deformasyon hesaplanmak istenmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerin sonucunda malzemelerdeki en yüksek gerilme Şekil 4.33'de ANSYS programı ile verilmiştir.



Şekil 4.33. ANSYS'de en yüksek gerilim noktası

Bu sonuçlara göre en yüksek gerilme sabitleme elemanı olarak kullanılan alüminyum alaşımların 1600 Newton kuvvete karşın malzemede oluşabilecek hasarlar hesaplanmıştır. Alüminyum alaşımın akma mukavemeti (Yield Strength) yaklaşık olarak 280 Mega Paskal'dır. Yani sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleşen analizlerde akma mukavemetini geçmeyen Eşdeğer gerilme (Equivalent (von-mises) Stress) değerleri için malzemede yırtılma veya geri dönüşümsüz bir hasar oluşmamaktadır.

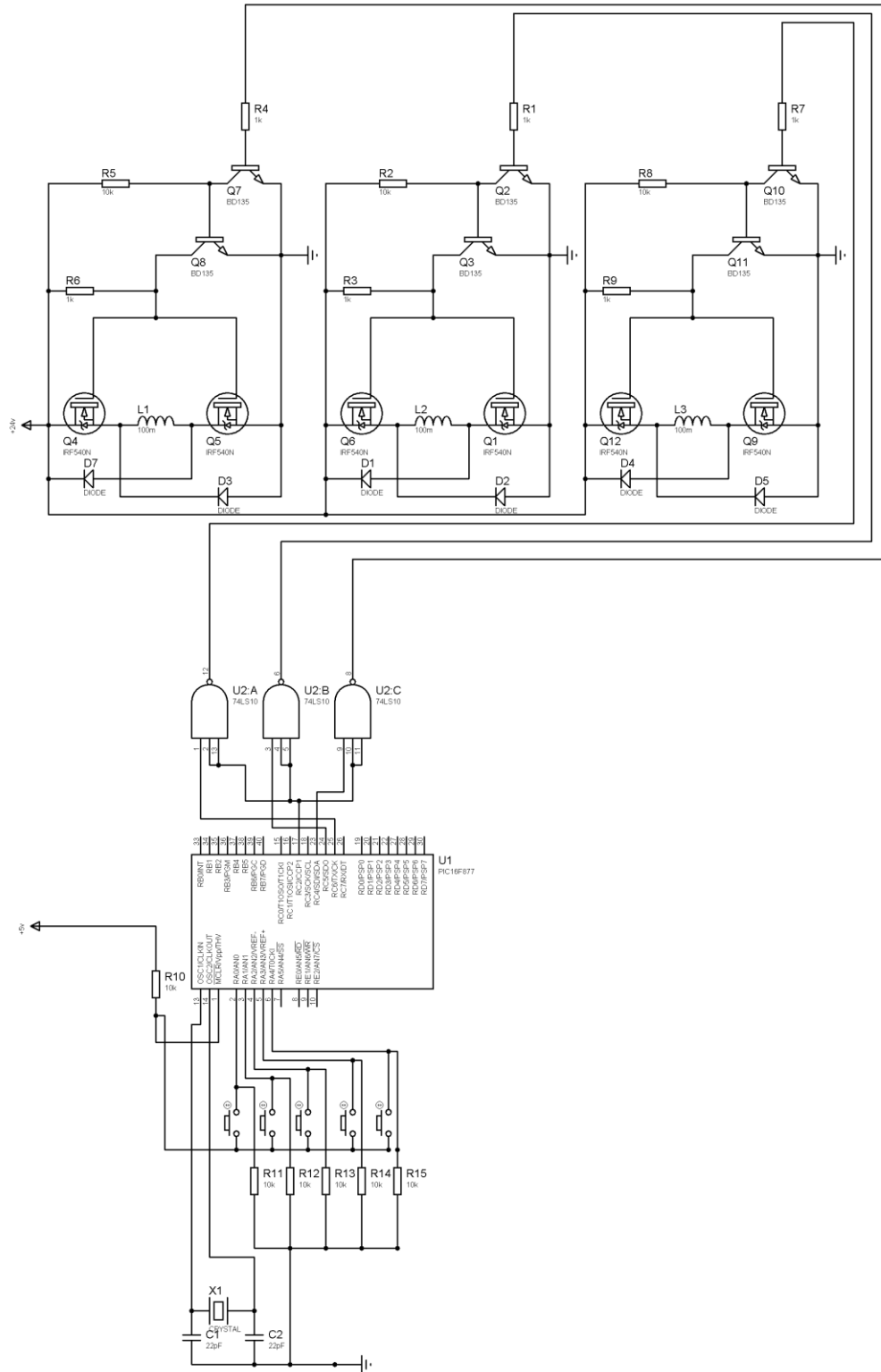
ANSYS ile yapılan sonlu elemanlar yöntemi analizinde Şekil 4.33' de görüldüğü gibi malzemenin ortalama eşdeğer gerilme (Equivalent (von-mises) Stress) yüksek gerilmenin yaşandığı yer olarak 8.722 Mega Paskal olarak belirlenmiştir. Bu durumda malzemeye deformasyona uğramamıştır.

4.4. Doğrusal Eyleyicinin Sürücü Tasarımı

Doğrusal eyleyicinin sürücü tasarımı anahtarlama relüktans motorların sürücüsü ile aynı mantığa dayanmaktadır. Anahtarlama relüktans motorlarda olduğu gibi fazların sırayla tetiklenmesi ile ileri-geri hareketi elde edilmektedir. Doğrusal eyleyici 3 fazdan oluşmaktadır.

Anahtarlama elemanı olarak MOSFET'ler tercih edilmiş olup IRF540N MOSFET'ler kullanılmıştır. Bu mosfetler MOSFET'ler N Kanallı ve 100 voltluk kanal kaynak doyum geriliminde dss (drain source saturation) 33 Amper değerine kadar çıkabilmektedir. MOSFET'leri tetiklerken yüksek akımı önlemek amacı ile PWM sinyalleri anahtarlama elemanları ile birlikte VE kapılarına sinyaller yollanmıştır. PWM kullanımındaki amaç, fazı anahtarlayarak değişken bir akım verip indüktans profilini elde etmektir. Eğer faz enerjilendikten sonra anahtarlama yapılmamış ise indüktans sıfır olur dolayısı ile sadece bobinin direncinden dolayı yüksek akım geçer.

Anahtarlama elemanları olan MOSFET'lerin kontrolü için darlington bağlantılı transistörler yardımı ile PIC mikrodenetleyici ile kontrol sağlanmıştır. Mikrodenetleyicinin PWM kontrolü için 2 adet, ileri-geri hareket için 2 adet, sensörler için 4 adet ve aç-kapa için 1 adet giriş birimi kullanılmıştır. Bu giriş birimleri pull-up dirençleri yardımı ile sinyal olmadığı durumlarda mikrodenetleyicilere "0" sinyali yollamaktadır. Anahtarlama için 3 adet ve PWM için 1 adet çıkış birimi tanımlanmıştır. Bunun yanında mikrodenetleyicinin, osilatör devresi için 2, güç devresi için 4 ve reset için 1 adet bacağı kullanılmıştır. Toplamda entegrenin 11 adet giriş-çıkış ünitesi bulunmaktadır.



Şekil 4.34. Sürücü devresi

4.4.1. Mikrodenetleyici Tabanlı Kontrol

Mikrodenetleyici olarak seçilen entegre PIC16F877'dir. Bu entegrenin seçilmesindeki en önemli etken donanımsal olarak PWM çıkışlarının bulunmasıdır. Şekil 4.35'de PIC16F877 mikrodenetleyicisinin genel özellikleri ve bacak bağlantıları verilmiştir.

ÖZELLİKLER	PIC16F877	PIC16F84
Çalışma Hızı	DC-20MHz	DC-20MHz
Program Belleği	8 Kword Flash ROM	8 Kword Flash ROM
EEPROM Belleği	256 Byte	256 Byte
Kullanıcı RAM	368 Byte	368 Byte
Giriş/Çıkış Port Sayısı	33	33
Zamanlayıcı	Timer0, Timer1, Timer2	Timer0
A/D Çevirici	8 Kanal, 10 Bit	Yok
Capture/Compare/PWM	16 Bit Capture, 16 Bit Compare, 10 Bit PWM çözünürlük	Yok
Seri çevresel Arayüz	SPI (Master) ve 12C (Master - Slave) modunda SPI portu ve senkron seri port	Yok
Paralel Uydu Port	8 Bit, harici, RD, WR ve CS kontrollü	Yok
USART/SCI	9 Bit adresli	Yok

Şekil 4.35. PIC16F877 mikrodenetleyicisinin genel özellikleri ve bacak bağlantıları

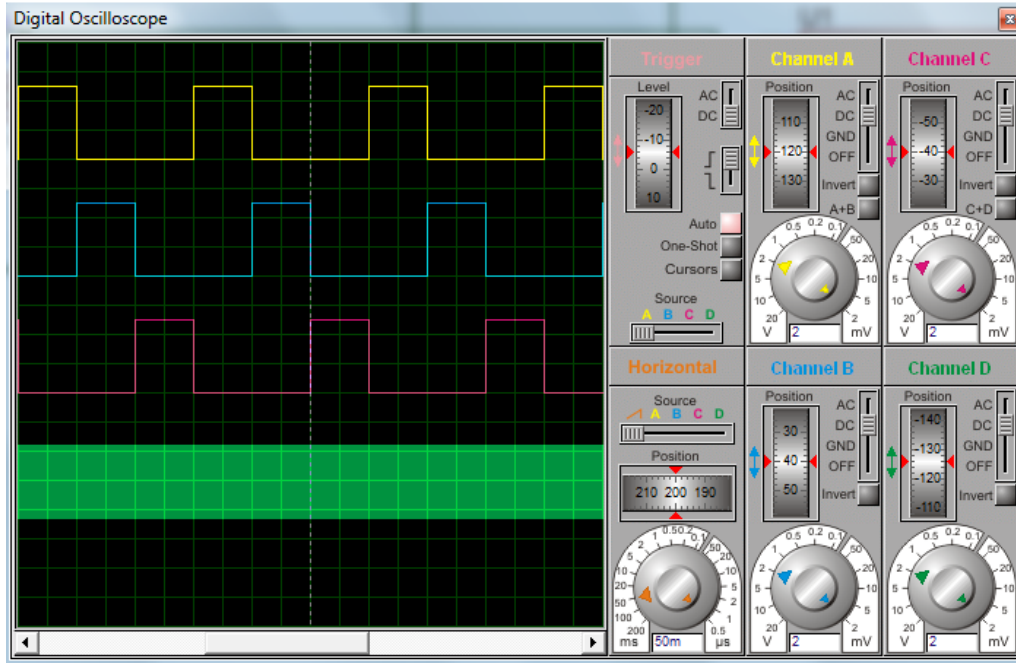
Mikrodenetleyici tabanlı kontrolde yüksek frekansta anahtarlama ve PWM sinyalleri gönderme imkânı sağladığı için eyleyicinin sürülmesinde öncelik olmuştur. Doğrusal eyleyicide mikrodenetleyicinin çıkış ünitesinde bulunan anahtarlama, ileri-geri hareketi elde etmek için sırasıyla 3 faza tetikleme gönderen sinyalleri üretmektedir. Bununla birlikte MOSFET'ler için gerekli olan PWM tetiklemelerini de gerçekleştirir. Mikrodenetleyicinin kontrolünde programlama dili olarak Picbasic tabanlı gerçekleşen proton ide derleyicisinde yazılmıştır.

4.4.2. PWM ile Anahtarlama

ARM'ları için PWM sinyallerinin genlikleri ve frekansları sürücü üzerinden istenilen aralıkta kontrol edilebilmelidir. Anahtarlama elemanları PWM tekniği ile tetiklenir. Böylece değişken bir faz akımı sağlandığı için değişken bir manyetik akı oluşur. Manyetik akının, akıma bağlı olarak değişmesi faz indüktansı karakteristiğini ortaya çıkarır.

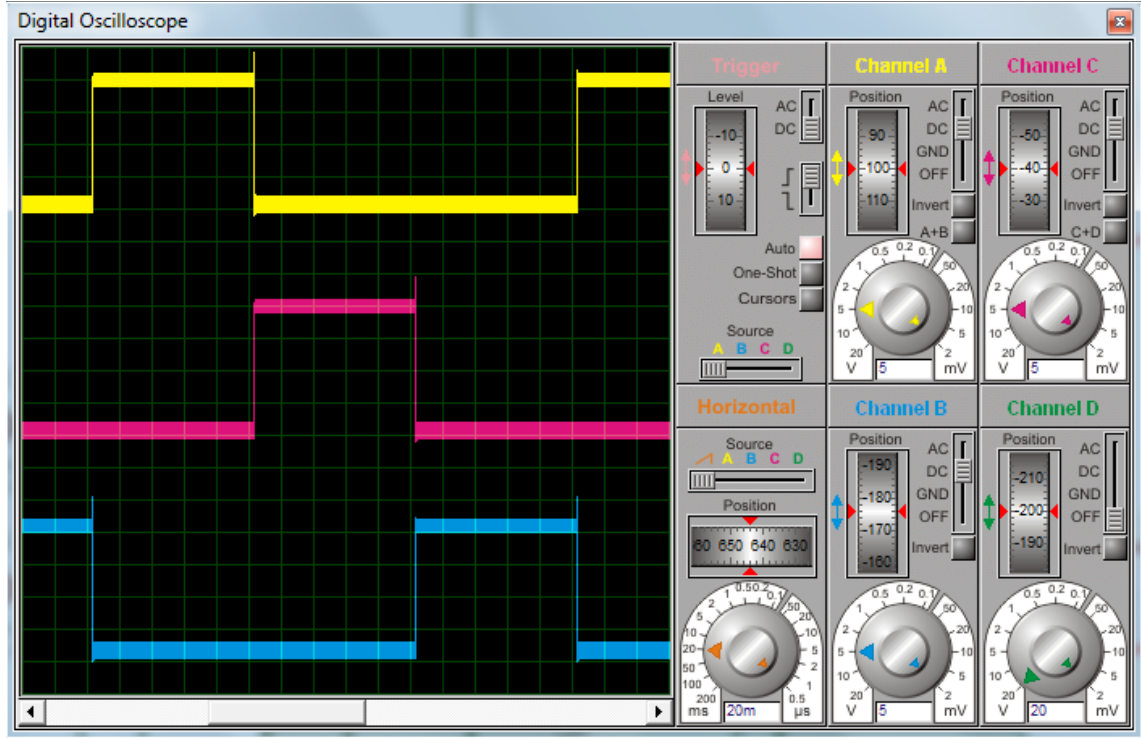
Fazların anahtarlama frekansı eyleyicinin hızını kontrol eder. Uyarılan fazın uyarım periyodu içerisinde tetiklenmesi ise indüktans oluşumunu sağlar. Bu şekilde eyleyicinin hızı anahtarlama elemanının hızına bağlı olarak değişecek, PWM sinyalleri ise istendiği gibi MOSFET tetiklemelerinin sayısını artırarak indüktans oluşumunu sağlayacaktır.

Şekil 4.36'da A,B,C kanalları fazları göstermektedir. D kanalı ise PWM sinyallerini göstermektedir.



Şekil 4.36. Mikrodenetleyicinin çıkış sinyalleri

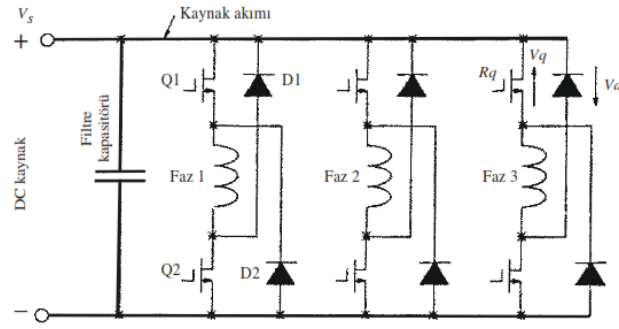
Şekil 4.37’de A,B,C kanalları fazları göstermektedir. A fazının üstüne PWM sinyalleri eklenerek yollanmıştır. Şekilde görüldüğü gibi A fazı tetiklendiği durumlarda anahtarlama işlemi fazlara göre belirlenmektedir. Ancak MOSFET tetiklemeleri PWM frekansına göre belirlenmektedir.



Şekil 4.37. Mikrodenetleyicinin çıkış ile PWM sinyallerinin eklenmesi

4.4.3. Klasik Köprü Tipi Konverter

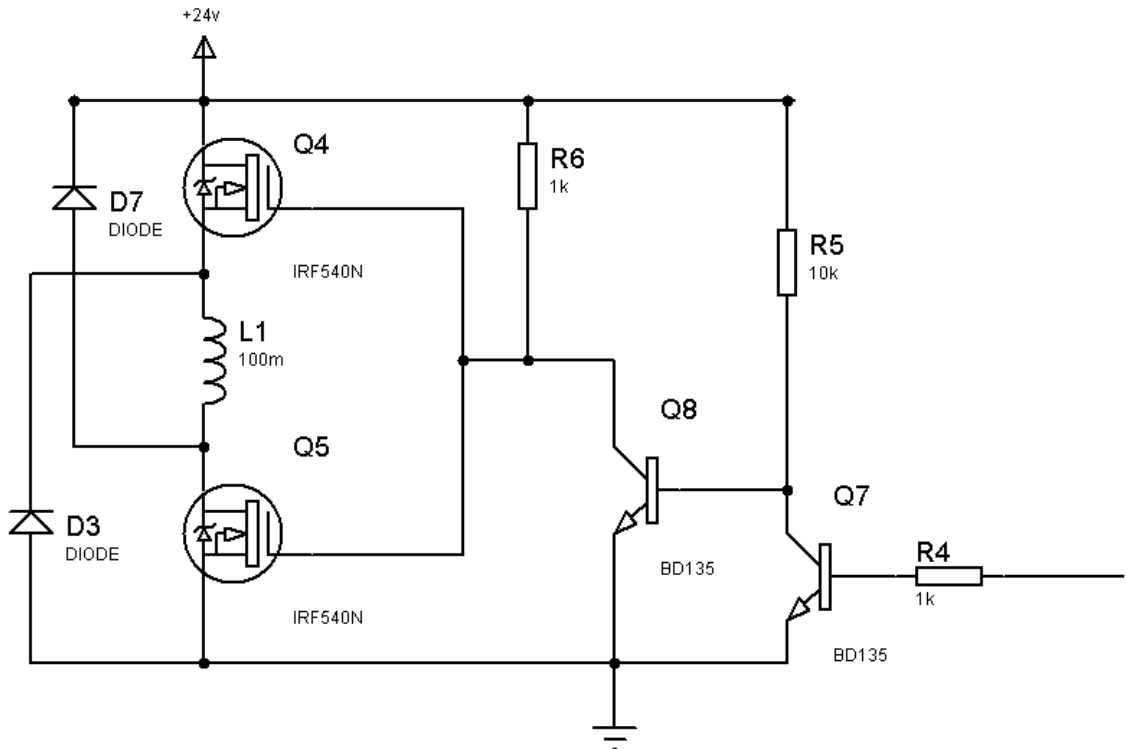
Bu dönüştürücüde stator faz sayısının iki katı kadar güç diyotu ve güç anahtarı kullanılmaktadır. Her faz için kullanılan anahtarlardan istenilen fazın kontrol edilmesinde kullanılır. Konvertörün anahtarlama elemanı olarak MOSFET’ler tercih edilmiştir.



Şekil 4.38. Üç fazlı 2n tipi MOSFET’li asimetrik köprü konvertör devresi

4.4.4. MOSFET Konvertör Tasarımı

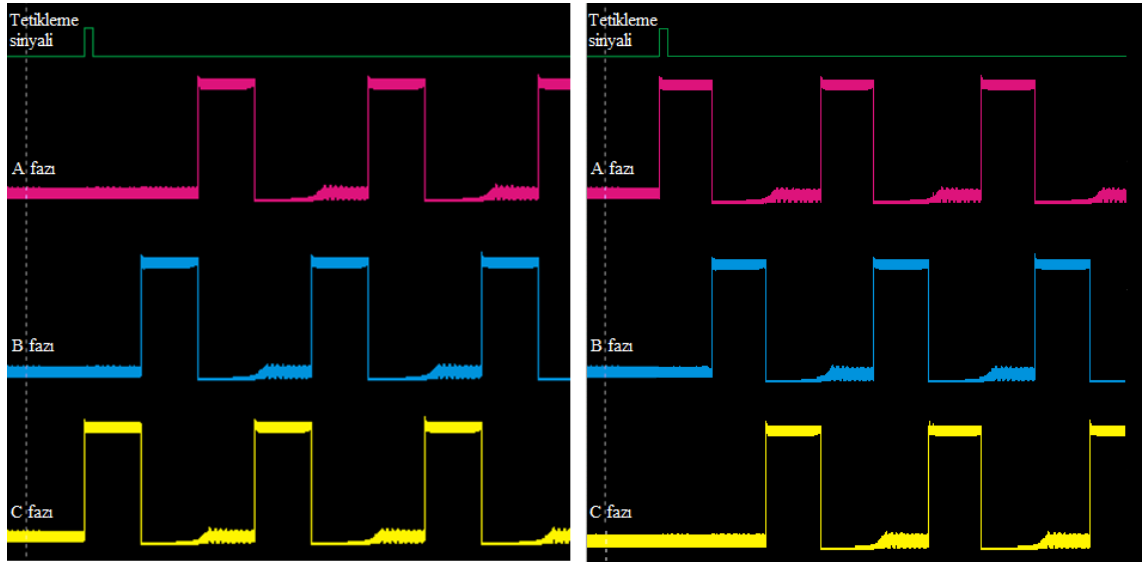
MOSFET kontrolünün sürücü kısmı darlington bağlantılı transistörler ile gerçekleştirilmiştir. Yani MOSFET’lerin gate tetiklemeleri 12 volt ile gerçekleşmektedir. Mikrodenetleyicilerin 5 volt çıkışı MOSFET’lerin gate tetiklemeleri için yetersiz olduğundan dolayı darlington bağlantı transistörleri ile kontrol yapılmıştır. Şekil 4.39’ da transistörler ile MOSFET bağlantıları gösterilmiştir.



Şekil 4.39. MOSFET konverter sürücü tasarımı

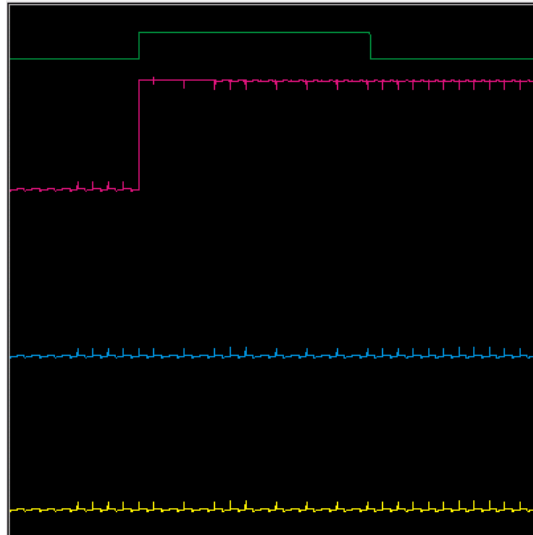
4.4.5. Akım- Zaman Diyagramı

Şekil 4.40'da görüldüğü gibi mikrogenetleyiciden gelen tetikleme sinyali fazları anahtarlama için kullanılmıştır. İleri hareket için fazlar sırası ile C,B,A anahtarlanmalıdır, geri hareket için fazlar sırası ile A,B,C anahtarlanmalıdır.



(a)

(b)



(c)

Şekil 4.40. Zaman diyagramı; a) ileri hareket b) geri hareket c) geri hareket tetikleme eğrisi

4.5. Öngörülen Sistemin Prototip Olarak İmalatı

Öngörülen tasarım sonlu elemanlar yöntemi ile statik manyetik ve yapısal analizleri yapılarak, kuvvet, indüktans, manyetik akı, deformasyon, esneme gibi parametrelerin simülasyonları yapılmıştır. Elde edilen veriler analitik olarak hesaplanarak analiz sonuçları ile doğrulanmıştır. Otomatik kapı sisteminin analitik olarak hesaplanması ve simülasyon ortamında gerçekleştirilen sonuçlar doğrultusunda uygun bir kapı uygulaması prototip olarak gerçekleştirilmiştir.

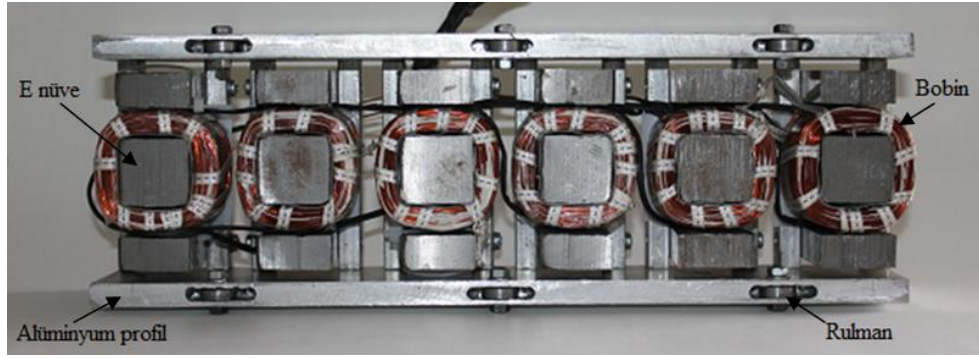
Gerçekleştirilen sistemin sırası ile EI nüveler ile doğrusal motorun stator translatör modülleri tasarlanmış, tasarlanan E nüvelerin sarımları gerçekleştirilmiş, doğrusal motora uygun bir kapı tasarımı yapılarak prototip sistemin mekanik montajı tamamlanmıştır. Son olarak asimetrik konvertöre uygun bir kontrol kartı tasarımı yapılmıştır. Şekil 4.41’ de öngörülen sistemin prototip uygulaması olan kapı sistemi gösterilmektedir.



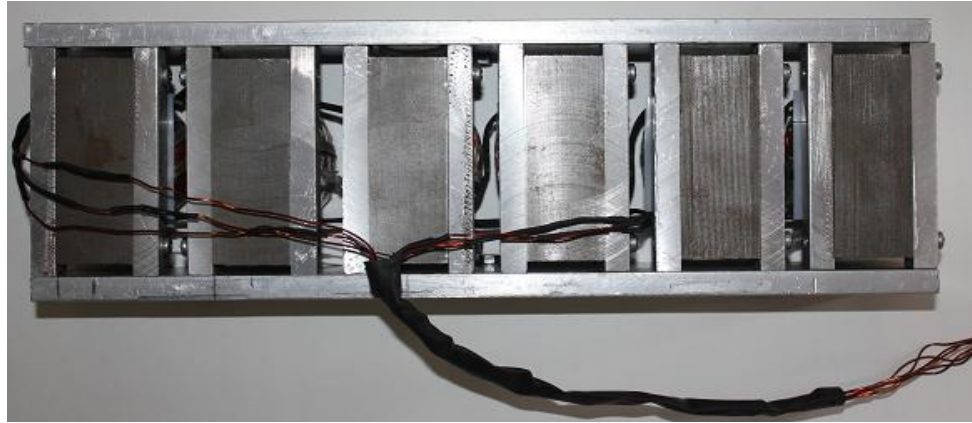
Şekil 4.41. Öngörülen otomatik kapı sisteminin prototip uygulaması

4.5.1. Doğrusal Motorun Gerçekleştirilmesi

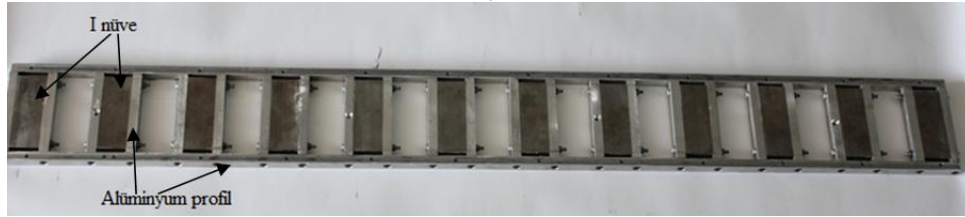
Şekil 4.41’da görüldüğü gibi daha önce 3 boyutlu simülasyon ortamında tasarlanan doğrusal eyleyicinin stator ve translator sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sistemde stator kısmı E nüveler ile 30 mm genişliğinde 6 kutuplu olarak tasarlanmıştır. Stator kutupları 1 mm çaplı bobin telleri ile 256 tur sarılmıştır. Translator kısmı ise I nüveler ile 32 mm genişliğinde 12 kutuplu olarak tasarlanmıştır. Çekme kuvvetine karşılık 1 mm hava aralığı oluşturulmuştur. I nüveler arasında uzaklık 90 mm dir.. Stator kutupları için E nüveler arasındaki uzaklık 60 mm dir. EI nüvelerin montajı 10 mm kalınlığından ve 15 mm genişliğinde içi dolu alüminyum malzemenen oluşan profiller ile gerçekleştirilmiştir. Yataklama için kullanılan rulmanlar ise bu profiller üzerinde açılan kanallara yerleştirilmiştir.



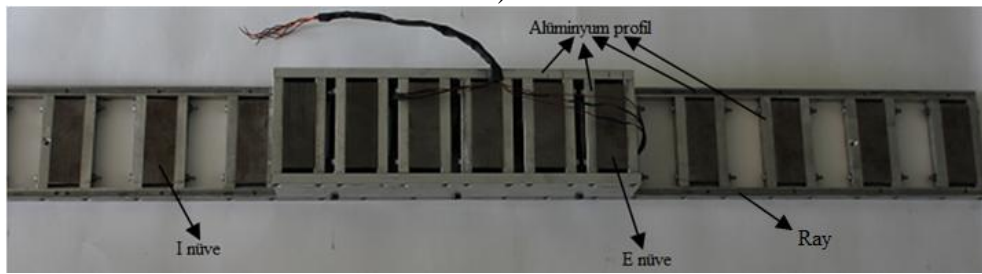
a)



b)



c)

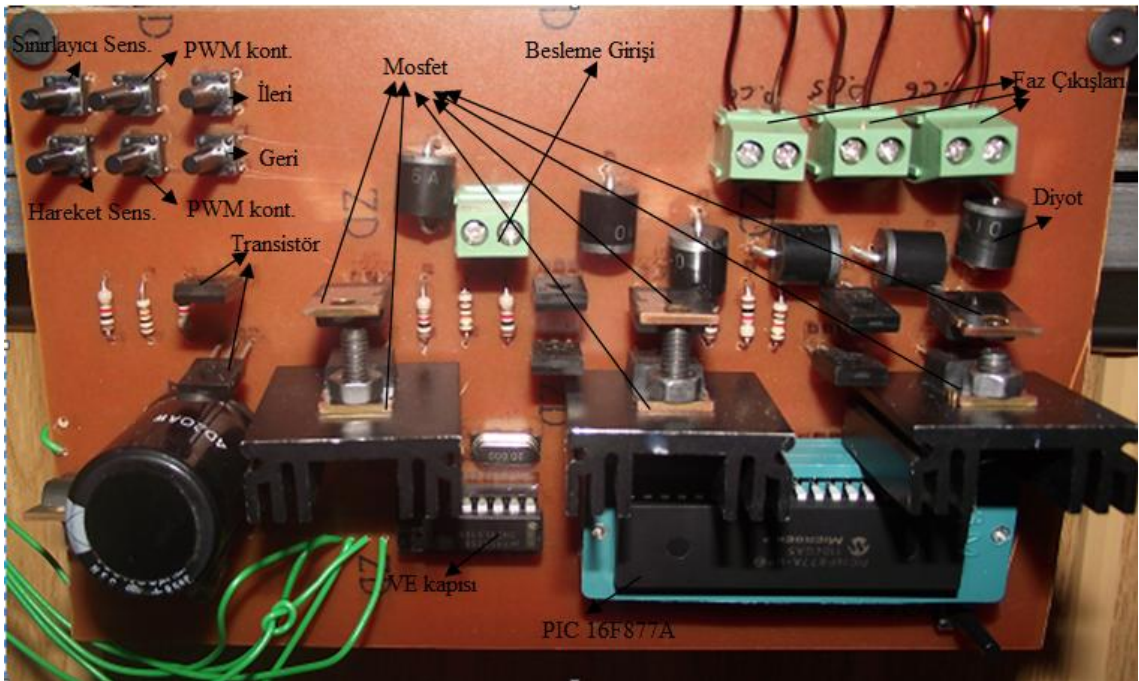


d)

Şekil 4.42. Doğrusal eyleyici;
 a) statorun altdan görünümü,
 b) statorun üstten görünümü,
 c) translötörün üstten görünümü
 d) stator-translötör

4.5.2. Kontrol Kartının Gerçekleştirilmesi

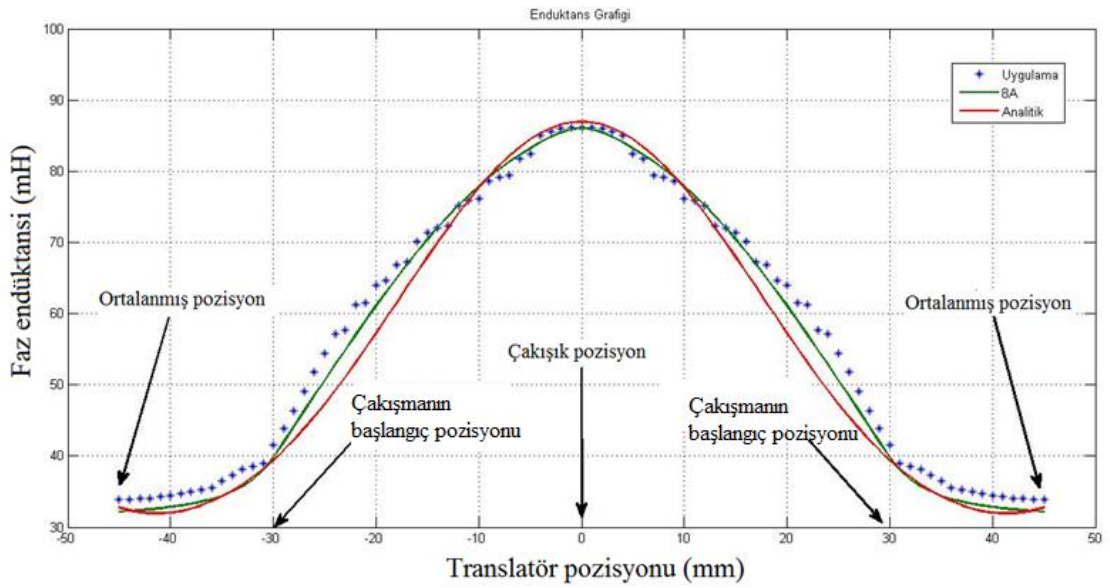
Daha önce simülasyon ortamında tasarlanan kontrol kartı Şekil 4.42’ de görüldüğü gibi uygulaması gerçekleştirilmiştir. Mikronetleyici ve konvertör devresi ayrı bir besleme yapılmıştır. Bununla birlikte kontrol entegresinin daha kararlı bir yapıda çalışabilmesi için besleme bacaklarına 100 nF değerinde kutupsuz kondansatör bağlanmıştır. Sistemin kapalı çevrim kontrolünü sağlamak için her faz için bir adet optik sensör kullanılarak sırası gelen fazın anahtarlanması sağlanmıştır.



Şekil 4.43. Kontrol Kartı

4.5.3 Doğrusal Eyleyicinin Faz İndüktans Karakteristiği

Şekil 4.44’de rotor pozisyonuna göre faz indüktans grafiği çizilmiştir. İndüktans karakteristiği translötörün her 1 mm lik hareketi ile çakışık ve ortalanmış pozisyon arasındaki (0-45 mm) translötör pozisyonu için elde edilmiştir. İndüktans grafiği, nüvede doyumun başladığı akım değeri olan 8 Amper için SEY çözümlerinden alınan sonuçlar, analitik yöntemler ile hesaplanan indüktans değerleri ve deneysel olarak ölçülen değerler ile çıkarılmıştır. Bu sonuçlara göre sistemimiz uygun bir şekilde yataklanmış ve simülasyon ortamındaki çalışmaların sonuçları, analitik sonuçlar ve deneysel veriler birbirleri ile paralel sonuçlar vermektedir.



Şekil 4.44. Sistemin faz indüktans grafiği

5. SONUÇ

Bu tez projesinde otomatik kapı sistemlerinde kullanılabilir yeni bir DARM tasarımı, analizleri ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Enine manyetik akılı ve modüler kutup yapısına sahip bir DARM otomatik kapı sistemi için tasarlanmıştır. Modüler yapıya sahip oldukları için bakım ve arıza durumunda bu parçalar kolaylıkla düzeltilebilir ve düşük maliyet sağlamaktadır. Ayrıca doğrusal hareket uzunluğu tasarım değiştirmeden yeni translatör kutupları ekleyerek uzatılabilir. Doğrudan tahrik ile elektromekanik enerji dönüşümünü sağlar. Böylece hareketi aktarmak için kasnak, halat ve dişli gibi mekanik dönüştürücülerin kullanılmaz hareket doğrudan manyetik olarak aktarılır.. Bu sistemlerde kayıplar düşüktür, arızalanma riski oldukça azdır ve periyodik bakım gerektirmez.

Otomatik kapı sistemlerinde kullanılabilir yeni bir doğrusal eyleyici olan, enine akılı 6/4 kutup oranında, 3 fazlı, pasif stator, aktif translatöre sahip, tek yüzlü DARM tasarımı yapılmıştır. Öngörülen sistemin SEY ile statik manyetik analizi, yapısal analizi yapılmıştır. Analizler analitik hesap ve deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Tasarım ve analizlerin sonucunda üretimi kolay, düşük enerji ile yüksek itme kuvveti sağlayan, maliyeti düşük en uygun nüve yapısı olarak EI nüve tasarlanmıştır. Bu nüvelere uygun yataklama mekanizması ve kapı sistemi modellenerek prototip imalatı yapılmıştır. Sürücü devresi bilgisayar ortamında simülasyonlar ile test edildikten sonra gerçekleştirilmiştir. Bunun için mikrodenetleyici kontrollü MOSFET anahtarlı asimetrik köprü konvertör kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen statik manyetik analizlerde EI nüvenin 1 mm hava aralığında, 8 Amper faz uyarımında 70 Newton itme kuvveti elde edilmiştir. Bunun yanı sıra 1600 Newton'luk çekme kuvveti oluşmuştur. Bu kuvveti sınırlamak için rulmanlar yardımı ile translatör üzerindeki yuvalar açılarak yataklama yapılmıştır. EI nüvelerin öz indüktans ve karşılıklı indüktans değerleri hesaplanmıştır. Fakat nüveler aynı manyetik göbek üzerinde bulunmadığından karşılıklı indüktans ihmal edilecek kadar azdır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen yapısal analizlerde iki ayrı simülasyon programı ile toplam deformasyon ve toplam yer değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Analizler sonucunda kullanılan malzemelerde çok düşük değerlerde deformasyon ve esneme meydana gelmiştir. Buda sistemimizin güvenilir bir şekilde kullanılabilmesi anlamına gelmektedir.

Sürücü kartının tasarımında her fazda 2 adet anahtar bulunan klasik tip konvertör seçilmiş, anahtarlama elemanı olarak MOSFET'ler kullanılmıştır. MOSFET'ler transistörler yardımı ile mikrodenetleyici ile kontrol edilmiştir. MOSFET'leri sürme işlemi, mikrodenetleyiciden gönderilen sinyallerin her bir fazın sırayla anahtarlama ile gerçekleşmiştir. DARM'nın indüktans karakteristiğini sağlamak için mikrodenetleyiciden alınan PWM sinyallerini güç anahtarlarının tetikleme girişine verilmiştir. Bu esnada sensörlerden gelen pozisyon bilgisine göre ilgili faz anahtarları. Böylece eyleyicinin kapalı çevrim kontrolü sağlanmaktadır.

Gerçekleşen sistemde prototip olarak yeni bir DARM tasarlanmış ve otomatik bir kapı sistemine montajı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında öngörülen tasarımın otomatik kapı sistemlerine uygun olduğu kanıtlanmıştır.

Doğrusal eyleyici olarak kullanılan modüler yapıdaki EI nüveler ile doğrusal motorlar tasarımlarında ve özellikle temassız yatay hareket eden raylı sistemlerde kullanılmaları gelecekte büyük avantaj sağlayacaktır.

Bu alanda çalışma yapacak olan araştırmacılara, öngördüğümüz DARM ile tahrik edilen otomatik kapı sisteminin optimizasyonu ve kontrolü üzerine çalışmalar yapmaları önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2007. 3D Tasarım Simülatorü. www.otomasyon.gen.tr, <http://www.otomasyon.gen.tr/archive/index.php/t-1861.html> (26.03.2010).
- Arkan, M.A.S., 1991. Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Bal, G., 2004. Özel Elektrik Makinaları. Seçkin Yayıncılık, 155-175, Ankara
- Cathey, J.J. ve Richter, E., 1995. High-Force Density Linear Switched Reluctance Motors. IEEE Transactions on Industry Applications, 31(2), 345-352.
- Daldaban, F., ve Üstkoyuncu N., 2009. A New Linear Switched Reluctance Motor with MagLev Effect. International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Turkey, 420-422.
- Deshpande, U.S., 2000. Two-Dimensional Finite-Element Analysis Of A High-ForceDensity Linear Switched Reluctance Machine Including Three-Dimensional Effects. IEEE Transactions on Industry Applications, 36(4), 1047-1052.
- Dursun M. ve Özden S., 2008. Bulanık Mantık Denetimi ile Asansör Tahriki. Politeknik Dergisi.
- Dursun M. ve Saygın A., 2005. Bulanık Mantık Denetimli Anahtarlama Relüktans Motorla Asansör Tahriki. Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu, Kocaeli.
- Dursun M. ve Saygın A., 2006. Bir Asansör Tahrik Sistemi İçin Bulanık Mantık Denetimli Anahtarlama Relüktans Motor Sürücüsü Tasarımı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi.
- Dursun M., Özbay H. ve Koç F., 2010. Doğrusal Motorlu Bir Asansör Kapı Tahrik Sistemi. Asansör Sempozyumu.
- Fenercioglu A. 2010. Design and Magnetically Analysis of Circular Flux Linear Actuator, Kaunas University of Technology. The Journal Elektronika Ir Elektrotechnica, 5(101):21-26.
- Fenercioglu, A. ve Dursun, M., 2011. Velocity Control of Linear Switched Reluctance Motor for Prototype Elevator Load. A, PRZEGL, R., 87, 12a/2011 p.209-214, NR
- Fenercioglu, A., ve Dursun M., 2010. Design and Magnetic Analysis Of A Double Sided Linear Switched Reluctance Motor. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 86 NR.
- Fenercioglu, A. ve Tarımer, İ., 2007. Anahtarlama Relüktans Motorlarda Faz İndüktansına Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, ISSN: 1300-7009, 13/2, 145-150, Pamukkale.
- Fenercioglu, A. ve Tarımer, İ., 2007. Bir Manyetik Sistemin Maxwell 3D Alan Simülatorü İle Statik Manyetik Analizinin Çözüm Süreçleri. Selçuk Üniversitesi Teknik Online Dergisi, <http://alaeddin.cc.selcuk.edu.tr/~tekbil/eylul2007.htm> ISSN: 1302/6178, 6, 221-240, Konya.
- Fenercioglu, A. ve Tarımer, İ., 2008. Anahtarlama Relüktans Motor Tasarımlarında Farklı Rotor Geometrilerinin Motor Güç Ve Tork Üretimine Etkilerinin İncelenmesi. Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, ISSN: 1301-7985, 10/1, 19-30, Balıkesir.

- Fenercioğlu, A., 2006. Helisel Yapılı Anahtarlama Relüktans Motorun (HY_ARM) Tasarımı ve Analizi. (Doktora Tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Gan, W.C., Cheung, N.C. ve Qiu, L., 2003. Position Control of Linear Switched Reluctance Motors for High-Precision Applications. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 39(5):1350-1362.
- Gao, H., Salmasi, F.R. ve Ehsani, M., 2004. Inductance Model-Based Sensorless Control of the Switched Reluctance Motor Drive at Low Speed. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(6):1568-1573.
- Gürdal, O., 2001. Elektrik Makinalarının Tasarımı. Atlas Yayın Dağıtım, 201-240, İstanbul.
- Hamayer, K. ve Belmans, R., 1999. Numerical Modelling and Design of Electrical Machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 35(5):3000-3003.
- Karagöz, F., 2009. Mikrodenetleyici Kontrollü Anahtarlama Relüktans Motorların Tasarımı ve Marş Motoru Olarak Kullanılması. (Yüksek Lisans Tezi), Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Kibar, H. ve Öztürk, T., 2012. ANSYS Sonlu Eleman Yazılımının Tarımdaki Uygulamaları. *İğdır Üni. Fen Bilimleri Enst. Der.* 2(2): 65-74
- Krishnan, R., 2001. Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. CRC Press, London. Machines and Devices. Wit Press, Boston, 28-305.
- McFee, S. ve Giannacopoulos, I., 1992. Introduction to Adaptive Finite Element Analysis for Electromagnetic Simulations. *ICS, Newsletter* 1-10.
- McLean, G.W., 1988. Review of Recent Progress in Linear Motors. *IEE Proceedings*, 135-B (6), 380-416.
- Mutlu, Ü., 2006. Anahtarlama Relüktans Motor Sürücü Devre Tasarımı. (Yüksek Lisans Tezi), Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 30-37, Kayseri.
- Omaç, Z., Kürüm, H. ve Selçuk, A.H., 2007. 18/12 Kutuplu Anahtarlama Relüktans Motor Tasarımı, İncelenmesi ve Kontrolü. *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, (3), 339-346.
- Özoğlu, Y., 1999. Anahtarlama Relüktans Motorunda Kutup Başlarına Şekil Vererek Moment Dalgallığının Azaltılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri, İstanbul.
- Pan, J., Cheung, N.C. ve Yang, J., 2005. High Precision Position Control of a Novel Planar Switched Reluctance Motor. *IEEE Transactions on Industrial Application*, 52(6), 1644- 1652.
- Rasmussen, P.O., 2002. Design and Advanced Control of Switched Reluctance Motors. Doktora Tezi, Aalborg University Institute of Energy Technology, Denmark.
- Ray, W. F., Lawrenson, P. J., Davis, R. M., Stephenson, J. M., Fulton, N. N. ve Blake, R. J., 1986. High Performance Switched Reluctance Brushless Drives, *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. IA-22, No. 4, p. 722-730.
- Schlenk, C., Scheermesser, D., Riesen ve Henneberger, G., 2003. Finite-Element Models of Electrical Machines and their Calculation. *International Congress on FEM Technology, 21st CAD-FEM Users' Meeting, Zurich*, 1-10.
- Üstkoçuncu N., 2010. Anahtarlama Doğrusal Hareketli Relüktans Motor Tasarımı. (Doktora Tezi), Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Yadlapalli, N., 1999. Implementation of a Novel Soft-Switching Inverter for Switched Reluctance Motor Drives. Ms. Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 10-42.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Yusuf AVŞAR

Doğum Tarihi ve Yer : 16.04.1989 - KAHRAMANMARAŞ

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Telefon : 0(505) 960 40 45

e-mail : yusufavsar@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	G.O.P. Mühendislik ve Doğa bil. Fak. Mekatronik Mühendisliği	2012
Lisans	S.D.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Mekatronik Eğitimi	2010
Lise	Erkan Avcı Anadolu Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi	2006