

LİNEER ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR TASARIMI

Harun ÖZBAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2011
ANKARA**

Harun ÖZBAY tarafından hazırlanan “LİNEER ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR TASARIMI” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mahir DURSUN

.....

Tez Danışmanı, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Osman GÜRDAL

.....

Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Mahir DURSUN

.....

Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Recep DEMİRCİ

.....

Endüstriyel Teknoloji Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih: 22/09/2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Harun ÖZBAY

**LİNEER ANAHTARLAMALI RELÜKTANS
MOTOR TASARIMI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Harun ÖZBAY

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Eylül 2011

ÖZET

Bu çalışmada doğrusal hareket eden hassas konum kontrolü ve hızlı tepki istenen asansör, hastane ve metro kapıları gibi yerlerde kullanılmak üzere 250 N çekme kuvvetine sahip, çift taraflı, 6/4 kutuplu, 3 fazlı, 8A, 24V, 250W'lık bir Lineer Anahtarlama Relüktans Motor (LARM) tasarımı yapılmıştır. Motorun parametreleri belirlenerek analitik ve sonlu elemanlar metodu (Ansoft Maxwell 3D) ile elektriksel ve manyetik büyüklükleri (endüktans, direnç, verim, stator üzerine etkiyen kuvvetler ve üretilen çekme kuvveti) simule edilmiştir. Tasarımı yapılan motorun gücüne uygun olarak hava aralığı ve stator, translator kutuplarının geometrik ölçülerine uygun olarak motorun ideal endüktans profili çıkartılmıştır. Endüktans profilinden motor ve jeneratör olarak çalışma ve anahtarlama bölgeleri belirlenmiştir. LARM, yapısı itibariyle dairesel hareket yapan Anahtarlama Relüktans Motorlar (ARM) ile aynıdır. Her alanda kullanıma uygun olan ARM'ler üzerine birçok çalışma yapılmış ve güç elektroniğindeki gelişmelerle birlikte endüstride sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Basit yapısı, uzun mesafelerde yüksek hız ve hassas konum kontrolü sağlayan LARM'ler otomatik kapı uygulamaları için de oldukça uygundur.

Bilim Kodu : 703.01.033
Anahtar Kelimeler : Lineer anahtarlamaalı relüktans motor, sonlu elemanlar
metodu, asansör kapısı
Sayfa Adedi : 116
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Mahir DURSUN

DESIGN OF LINEAR SWITCHED RELUCTANCE MOTOR**(M.Sc. Thesis)****Harun ÖZBAY****GAZI UNIVERSITY****INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY****September 2011****ABSTRACT**

In this study ,a linear switched reluctance motor (LSRM) is designed which has 250N pull force, and which is double sided ,6/4 poled,3 phased,8A , 24V, 250W, to be used in places such as elevator, hospital and subway doors which move linearly and in which accurate position control and rapid response is required. Electrical and magnetic quantities (inductance, resistance, efficiency, forces acting on the stator and generated pull forces) of LSRM were obtained by using analytical and predicted by finite element method (Ansoft Maxwell 3D), by determining its parameters. Air gap and stator of designed motor are made in accordance with the motor force and the ideal inductance profile of the motor is made in accordance with the geometric dimensions of translator poles. Operation and switching zones are determined as motor and generator from the inductance profile. LSRM is similar with rotationally moving Switched Reluctance Motor in consideration of its structure. There are many studies about SRMs that are suitable for use in all areas and together with the improvements in power electronics field, they become widely used in the industry. With their simple structure, high speed and sensitive position control feature at long distances, LSRMs are also comparatively suitable for automatic door applications.

Science Code : 703.01.033

**Key Words : Linear switched reluctance motor, finite element method,
elevator door**

Page Number : 116

Adviser : Assoc. Prof. Dr. Mahir DURSUN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve yönlendirmeleriyle sabırla destekleyen değerli hocam Doç. Dr. Mahir DURSUN'a, tez çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen Uzman Semih ÖZDEN ve Öğretim Görevlisi Fatmagül KOÇ'a , bu çalışmamda, 00401.STZ.2009-1 kodlu SANTEZ projesi kapsamında Sanayi ve Ticaret Bakanlığı ile EMSA Otomasyona desteklerinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu vesile ile manevi desteleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan arkadaşlarıma ve her zaman sabırla destekleyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TESEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
SEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xx
1. GİRİŞ	1
2. ASANSÖR KAPISI TAHRİKİNDE KULLANILAN ELEKTRİK MOTORLARI	7
2.1. Asansör Kapılarının Mekanik Yapısı	7
2.2. Kapı Konumunun Algılanması	8
2.3. Asansör Kapılarında Kullanılan Tahrik Motorları	8
2.3.1. DA seri motoru	8
2.3.2. Üç fazlı asenkron motor	9
2.3.3. Anahtarlama relüktans motor	9
3. LİNEER ARM VE OTOMATİK KAPI TAHRİKİ	11
3.1. Anahtarlama Relüktans Motorun Yapısı	11
3.2. Anahtarlama Relüktans Motorun Çalışma Prensipleri	12
3.3. Endüktansın Rotor Konumu ile Değişimi	13
3.3.1. Çakışık pozisyon	13
3.3.2. Ayrık pozisyon	14

3.4. ARM Eşdeğer Devresi	15
3.5. Lineer Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Yapısı ve Çalışması	19
3.6. LARM Sürme Devresi	22
3.7. LARM’de Komütasyon.....	23
3.8. Otomatik Kapı Tahriki	25
3.8.1. LARM ile asansör kapısı tahrik sistemi tasarımı	25
4. LARM’NİN TASARIMI VE ANALİZİ.....	27
4.1. LARM’nin Analitik Analizi.....	27
4.2. LARM’nin Manyetik Analizi.....	32
5. BENZETİM VE DENEY SONUÇLARI.....	40
5.1. Sargı Akımı 1 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları.....	43
5.2. Sargı Akımı 2 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları.....	46
5.3. Sargı Akımı 3 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları.....	48
5.4. Sargı Akımı 4 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları.....	50
5.5. Sargı Akımı 5 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları.....	53
5.6. Sargı Akımı 6 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları.....	55
5.7. Sargı Akımı 7 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları.....	57
5.8. Sargı Akımı 8 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları.....	60
5.9. Farklı Kutup Başına Sahip LARM Analizleri.....	62
5.9.1. LARM-A modelinin incelenmesi.....	62
5.9.2. LARM-B modelinin incelenmesi	70
5.9.3. LARM-C modelinin incelenmesi	77
5.9.4. LARM-D modelinin incelenmesi.....	84
5.9.5. LARM-E modelinin incelenmesi	91

5.10. Değerlendirme.....	98
6. TASARIMI YAPILAN LARM’NİN İMALATI.....	102
6.1. LARM’nin İmalat Aşamaları.....	102
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	107
KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ	115

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. ARM'nin diğer motorlarla karşılaştırılması.....	10
Çizelge 4.1. LAR motoruna ait mekanik ve elektriksel parametreler.....	33
Çizelge 4.2. Bir faza ait akım-pozisyon değişimine göre endüktans değerleri.....	37
Çizelge 4.3. Çakışık durumdaki fazlar arası endüktans (mH) matrisi	38
Çizelge 4.4. Ayırık durumdaki fazlar arası endüktans (mH) matrisi	39
Çizelge 5.1. LARM-A modeline ait mekanik ve elektriksel parametreler	62
Çizelge 5.2. LARM-A modeline ait akım-pozisyon değişimine göre endüktans değerleri.....	69
Çizelge 5.3. LARM-B modeline ait mekanik ve elektriksel parametreler.....	70
Çizelge 5.4. LARM-B modeline ait akım-pozisyon değişimine göre endüktans değerleri.....	76
Çizelge 5.5. LARM-C modeline ait mekanik ve elektriksel parametreler.....	77
Çizelge 5.6. LARM-C modeline ait akım-pozisyon değişimine göre endüktans değerleri.....	83
Çizelge 5.7. LARM-D modeline ait mekanik ve elektriksel parametreler	84
Çizelge 5.8. LARM-D modeline ait akım-pozisyon değişimine göre endüktans değerleri.....	90
Çizelge 5.9. LARM-E modeline ait mekanik ve elektriksel parametreler.....	91
Çizelge 5.10. LARM-E modeline ait akım-pozisyon değişimine göre endüktans değerleri	97
Çizelge 5.11. Farklı modellerin pozisyona göre endüktans(mH) değerleri(4A).....	99
Çizelge 5.12. Farklı modellerin pozisyona göre endüktans(mH) değerleri(8A).....	100

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. ARM yapıları	11
Şekil 3.2. ARM yapısı ve faz sargıları	12
Şekil 3.3. Anahtarlama relüktans motorun çakışık ve yarı çakışık pozisyonları	14
Şekil 3.4. ARM'nin Ayırık ve çakışmanın başladığı pozisyonları	15
Şekil 3.5. Bir faz için endüktans, tork ve akım eğrileri.....	16
Şekil 3.6 ARM nin bir fazı için eşdeğer devre.....	16
Şekil 3.7. Lineer anahtarlama relüktans motor	19
Şekil 3.8. Lineer anahtarlama relüktans motorun stator sargılarının yerleşimi	20
Şekil 3.9. Asansör kapısı tahriki için tasarlanmış olan LARM'nin 3 boyutlu görüntüsü.....	21
Şekil 3.10. LARM için çevirici devresi	23
Şekil 3.11. ARM'de komütasyon işlemi	24
Şekil 3.12. Klasik kapı tahrik sisteminin blok diyagramı	25
Şekil 3.13. Lineer ARM kullanılan kapı tahrik sisteminin blok diyagramı	25
Şekil 3.14. Kayar kapı sistemine yerleştirilen LARM'nin görüntüsü.....	26
Şekil 4.1 Steel 1010 BH eğrisi	32
Şekil 4.2. Tasarlanan motorun 3 boyutlu olarak gösterimi	33
Şekil 4.3. Tasarlanan LAR motora ait (a) üç boyutlu modelinin benzetimi (b) sonlu elemanlar yüzeyi	34
Şekil 4.4. Çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu	35
Şekil 4.5. Ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu	35
Şekil 4.6. Pozisyona göre akım-endüktans değişimi.....	36

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. Pozisyona göre kuvvet değişimi	37
Şekil 5.1. Ansoft Maxwell 3D programının ara yüzü	40
Şekil 5.2. Manyetik akı yoğunluğunun 3 boyutlu olarak benzetimi	41
Şekil 5.3. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun bulunması (Çakışık).....	41
Şekil 5.4. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu (Çakışık durumda).....	42
Şekil 5.5. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun bulunması (Ayrık)	42
Şekil 5.6. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu (Ayrık durumda).....	43
Şekil 5.7. Ayrık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (1A)	44
Şekil 5.8. Ayrık durumdaki manyetik akı şiddeti (1A).....	44
Şekil 5.9. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (1A).....	44
Şekil 5.10. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı şiddeti (1A)	45
Şekil 5.11. Çakışık durumdaki manyetik alan yoğunluğu (1A).....	45
Şekil 5.12. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (1A)	45
Şekil 5.13. Ayrık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (2A)	46
Şekil 5.14. Ayrık durumdaki manyetik akı şiddeti (2A).....	46
Şekil 5.15. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (2A).....	47
Şekil 5.16. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı şiddeti (2A)	47
Şekil 5.17. Çakışık durumdaki manyetik alan yoğunluğu (2A).....	47
Şekil 5.18. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (2A)	48
Şekil 5.19. Ayrık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (3A)	48
Şekil 5.20. Ayrık durumdaki manyetik akı şiddeti (3A).....	49
Şekil 5.21. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (3A).....	49
Şekil 5.22. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı şiddeti (3A)	49

Şekil	Sayfa
Şekil 5.23. Çakışık durumdaki manyetik alan yoğunluğu (3A).....	50
Şekil 5.24. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (3A)	50
Şekil 5.25. Ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (4A)	51
Şekil 5.26. Ayırık durumdaki manyetik akı şiddeti (4A).....	51
Şekil 5.27. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (4A).....	51
Şekil 5.28. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı şiddeti (4A)	52
Şekil 5.29. Çakışık durumdaki manyetik alan yoğunluğu (4A).....	52
Şekil 5.30. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (4A)	52
Şekil 5.31. Ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (5A)	53
Şekil 5.32. Ayırık durumdaki manyetik akı şiddeti (5A).....	53
Şekil 5.33. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (5A).....	54
Şekil 5.34. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı şiddeti (5A)	54
Şekil 5.35. Çakışık durumdaki manyetik alan yoğunluğu (5A).....	54
Şekil 5.36. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (5A)	55
Şekil 5.37. Ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (6A)	55
Şekil 5.38. Ayırık durumdaki manyetik akı şiddeti (6A).....	56
Şekil 5.39. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (6A).....	56
Şekil 5.40. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı şiddeti (6A)	56
Şekil 5.41. Çakışık durumdaki manyetik alan yoğunluğu (6A).....	57
Şekil 5.42. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (6A)	57
Şekil 5.43. Ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (7A)	58
Şekil 5.44. Ayırık durumdaki manyetik akı şiddeti (7A).....	58
Şekil 5.45. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (7A).....	58

Şekil	Sayfa
Şekil 5.46. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı şiddeti (7A)	59
Şekil 5.47. Çakışık durumdaki manyetik alan yoğunluğu (7A).....	59
Şekil 5.48. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (7A)	59
Şekil 5.49. Ayrık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (8A)	60
Şekil 5.50. Ayrık durumdaki manyetik akı şiddeti (8A).....	60
Şekil 5.51. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (8A).....	61
Şekil 5.52. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı şiddeti (8A)	61
Şekil 5.53. Çakışık durumdaki manyetik alan yoğunluğu (8A).....	61
Şekil 5.54. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (8A)	62
Şekil 5.55. LARM-A modelinin 3 boyutlu olarak görselleştirimi	63
Şekil 5.56. LARM-A modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A).....	64
Şekil 5.57. LARM-A modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A).....	64
Şekil 5.58. LARM-A modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (5A).....	65
Şekil 5.59. LARM-A modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (5A).....	66
Şekil 5.60. LARM-A modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (8A).....	67
Şekil 5.61. LARM-A modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (8A).....	68
Şekil 5.62. LARM-A modelinin pozisyona göre Akım-Endüktans değişimi	69
Şekil 5.63. LARM-B modelinin 3 boyutlu olarak görselleştirimi	70
Şekil 5.64. LARM-B modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A).....	71

Şekil	Sayfa
Şekil 5.65. LARM-B modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A).....	72
Şekil 5.66. LARM-B modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (5A).....	73
Şekil 5.67. LARM-B modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (5A).....	74
Şekil 5.68. LARM-B modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (8A).....	75
Şekil 5.69. LARM-B modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (8A).....	75
Şekil 5.70. LARM-B modelinin pozisyona göre Akım-Endüktans değişimi	76
Şekil 5.71. LARM-C modelinin 3 boyutlu olarak görselleştirimi	77
Şekil 5.72. LARM-C modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A).....	78
Şekil 5.73. LARM-C modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A).....	79
Şekil 5.74. LARM-C modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (5A).....	80
Şekil 5.75. LARM-C modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (5A).....	81
Şekil 5.76. LARM-C modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (8A).....	82
Şekil 5.77. LARM-C modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (8A).....	82
Şekil 5.78. LARM-C modelinin pozisyona göre Akım-Endüktans değişimi	83
Şekil 5.79. LARM-D modelinin 3 boyutlu olarak görselleştirimi	84
Şekil 5.80. LARM-D modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A).....	85

Şekil	Sayfa
Şekil 5.81. LARM-D modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A).....	86
Şekil 5.82. LARM-D modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (5A).....	87
Şekil 5.82. LARM-D modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (5A).....	88
Şekil 5.84. LARM-D modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (8A).....	89
Şekil 5.85. LARM-D modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu(b) Manyetik alan şiddeti (8A).....	89
Şekil 5.86. LARM-D modelinin pozisyona göre Akım-Endüktans değişimi	90
Şekil 5.87. LARM-E modelinin 3 boyutlu olarak görselleştirimi.....	91
Şekil 5.88. LARM-E modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A).....	92
Şekil 5.89. LARM-E modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A).....	93
Şekil 5.90. LARM-E modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (5A).....	94
Şekil 5.91. LARM-E modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (5A).....	95
Şekil 5.92. LARM-E modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b)Manyetik alan şiddeti (8A).....	96
Şekil 5.93. LARM-E modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (8A).....	96
Şekil 5.94. LARM-E modelinin pozisyona göre Akım-Endüktans değişimi.....	97
Şekil 5.95. Farklı modellerin pozisyona göre endüktans değişimleri (4A).....	98
Şekil 5.95. Farklı modellerin pozisyona göre endüktans değişimleri (4A).....	99
Şekil 6.1. Tel erozyon yöntemi ile kesim işlemi.....	102

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Klasik otomatik kapı sistemi.....	7
Resim 6.1. Sac rulosu ve kalıp	103
Resim 6.2. Paketlenmiş translator ve stator sacları.....	103
Resim 6.3. Bobinlerin translatora yerleştirilmesi.....	104
Resim 6.4. Stator yuvası ve Stator sacları.....	105
Resim 6.5. Çift taraflı lineer anahtarlama relüktans motor.....	105
Resim 6.6. LARM makinesi ve sürücüsü	106

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
F	LARM'nin gücü(N)
h_r	Stator kutbunun yüksekliği(mm)
h_s	Translator kutbunun yüksekliği(mm)
h_t	Translator kutbunun yüksekliği(mm)
L_a	Çakışık pozisyondaki endüktans(H)
L_u	Ayrık pozisyondaki endüktans(H)
L_{tr}	Translatorun toplam uzunluğu(mm)
N_{sc}	LARM'nin toplam sektör sayısı
P	LARM'nin gücü (W)
F_g	Hava boşluğundaki kuvvet(N)
F_s	Translator nüvesindeki kuvvet(N)
F_r	Stator nüvesindeki kuvvet(N)
i	Bobindeki akım(A)
H_g	Hava boşluğundaki manyetik alan şiddeti(A / mm)
H_s	Translator nüvesindeki manyetik alan şiddeti(A / mm)
H_r	Stator nüvesindeki manyetik alan şiddeti(A / mm)
l_g	Hava boşluğu uzunluğu(mm)
l_s	Translator nüvesi uzunluğu(mm)
l_r	Stator nüvesi uzunluğu(mm)
φ_s	Toplam manyetik akı
B_s	Translator kutbundaki akı yoğunluğu
A_s	Translator kutbu alanı

Simgeler**Açıklama** $\mathfrak{R}$

Relüktans

 L_u Çakışık durumdaki endüktans değeri(H) L_u Ayrık durumdaki endüktans değeri(H) L_u Orta durumdaki endüktans değeri(H) W_{m_x}

Mekanik iş değişimi

 μ_0

Havanın manyetik geçirgenliği

 W_e

Motor giriş gücü

 W_f

Manyetik alanda depo edilen enerji

 f_x LARM çekme kuvveti(N)**Kısaltmalar****Açıklama****3D**

Üç boyutlu

AA

Alternatif Akım

DA

Doğru Akım

LARM**Lineer Anahtarlama**lı **Relüktans Motor****emk****Elektromotor kuvvet****mmk****Manyetomotor kuvvet****SEY****Sonlu Elemanlar Yöntemi**

1. GİRİŞ

Yaşam alanlarımızda sıkça karşılaştığımız otomatik açılıp kapanan kapı sistemleri hayatımızda önemli bir yer almıştır. Giriş ve çıkışların yoğun olduğu mekânlarda kullanılan otomatik kapı sistemlerinin tercih edilmesindeki en önemli nedenler konfor, iklimlendirme, yetkisiz girişleri engelleme ve güvenlidir. Kışın ısı tasarrufu sağlama yanında çalışma alanlarında sadece yetkili personelin girişine imkan verme, tren, metro, asansör gibi yerlerde güvenliği sağlama gibi avantajlara da sahiptir. Hayatımızı kolaylaştıran otomatik kapıların hareketini sağlayan motorlar kapılardan istenilenleri vermede en önemli role sahip elemandır.

Asansör kapılarının açılıp kapanma süreleri asansör hizmet kalitesini ve yolcuların bekleme sürelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle hem hızlı açılıp kapanan, hem de arıza oranı düşük ve aynı zamanda da yüksek verimli yeni sistemlerin tasarımını zorunlu kılmaktadır.

Günümüzdeki otomatik kapı sistemlerindeki hareket; dairesel hareketi sağlayan bir motor ve bu motorun miline bağlı redüktör veya kayış kasnak sistemlerine bağlanan bir elektromekanik kilit ve kayar kapı sisteminden oluşmaktadır. Bu hareket eden cismin kendinden sonraki güç aktarma organına hareketi aktarma sırasında ani darbelerden kaçınıldığından kapının hızlanma süresini de uzatmaktadır. Ayrıca her bir güç aktarma organında ve kayış kasnak sisteminde eleman sayısının artması, verimin düşmesine ve arıza oranının artmasına yol açar. Bunun yanında 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. Bu nedenle lineer hareket yapan mekanik sistemlerde yüksek verimli ve yüksek hız tepkili aynı zamanda da arıza oranı daha düşük olan lineer motorların asansör kapısı gibi kayar kapı sistemlerinde kullanılması kaçınılmazdır.

DC motorların kontrol yapılarının basitliği ve analog devre elemanlarıyla gerçekleştirilebilmesi sebebiyle başlangıçtan günümüze kadar DC motorlar yaygın

şekilde kullanılmakta ve endüstride önemli bir yer teşkil etmektedir. Benzer şekilde tren, metro, asansör veya ameliyathane kapılarında da genellikle doğru akım motoru kullanılmaktadır. Ancak DC motorlarda bulunan fırça ve kollektör gibi mekanik parçalarından dolayı bu motorların arıza oranının yüksek olması, kollektör ve fırçalar arasında oluşan yanma ve patlama ihtimali olan ortamlarda kullanılmaması hız tepkisinin yavaş olması ve yüksek hızlarda kullanılmaması gibi sebepler DC motorların kullanımını sınırlamaktadır. Özellikle sık kullanılan kapı uygulamalarında fırça ve kollektör bakımı ciddi bir sorun teşkil etmektedir. DC motorların kalkışta yüksek akım çekmesi bir başka dezavantajı olarak görülebilir. İlk çalışma anında (kalkış), sağladıkları yüksek tork sebebiyle DC motorlar tercih sebebi olmuştur.

Lineer anahtarlamalı relüktans motorlar yüksek tahrik gücüne sahip, hassas konum kontrolü yapılabilen basit yapılı ve ucuz motorlardır. Lineer Anahtarlamalı relüktans motorlar (LARM) 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, üretim ve bakım maliyetlerinin düşük olmasından dolayı endüstri ve tüketiciye yönelik uygulamalarda gittikçe artan bir ilgiye sahiptirler [1].

Sağladığı avantajlar nedeniyle hareket kontrol sistemlerinde diğer AC ve DC motorlara alternatif olarak birçok uygulama alanı bulmuştur [2]. Uygun bir konvertör devresi ve sürme sistemi ile kontrol edilen LARM' de diğer elektrik motorlarından daha yüksek verim elde edilebilir [3]. Bu motorlar yapı bakımından stator kutup sayısı translator kutup sayısından farklı ve statorlarında herhangi bir sargı bulunmayan fırçasız DC motorlardır.

LARM'lerde hem translator hem de stator sıkıştırılmış silisli saçlardan meydana gelir. Stator, sadece sıkıştırılmış silisli saçlardan çıkıntılı kutuplu olarak imal edilmişken, translatorda ise ayrıca kutup üzerinde DC makinelerinde olduğu gibi bir alan sargısı da bulunmaktadır. Bu alanlar enerjilendiklerinde karşılıklı olarak ters bir manyetik alan meydana getirecek şekilde yerleştirilirler. Enerjilendirme ise tek yönlü bir uyartım şeklindedir.

Lineer Anahtarlmalı Relüktans Motorları tasarım açısından inceleyen, parametrelerin etkisini inceleyen birçok yayın bulunmaktadır. Ayrıca LARM’de kullanılan sensörlerin, sürme devresinin maliyetini düşürmek, daha yüksek hassasiyet ve verimlilikte LARM üretmek amacıyla araştırmalar yapılmıştır. Dursun,M., bulanık mantık hız denetimli ARM’yi asansör tahrik sisteminde kullanmıştır [2,3].

Motorun kapı uygulaması bulunmamaktadır. Ancak, bir başka doğrusal hareket olduğu asansör uygulamasını R. Krishnan Nisan 2004’de yapmıştır. Lineer anahtarlmalı relüktans motorlu sistem sağlıklı bir şekilde asansörde uygulamış ve maliyeti diğer asansörlere göre 15 kat daha ucuz olduğunu belirtmiştir. Bu konuda yayınladıkları makalede, LARM’yi taşıyıcı asansörlerde itici güç olarak kullanmışlardır. LARM tasarımında, ikiz translator kullanılarak yapılacak yeni tip LARM düşünmüşler. Asansörlerde titreşimi azaltmak için güç dağıtım fonksiyonları(FDF) kullanmışlardır. LARM’nin geniş kapsamlı dinamik simülasyon ve deneysel ispatları verilmiştir. Örneklerle gösterilmiş dikey asansör uygulamaları performansın yüksekliğini kanıtladığını belirtmişlerdir [4].

Gan ve diğerleri, doğrusal hareketin imalat sürecinde malzeme taşınması, paketlenme, toplama gibi durumlarda doğru hareketlere gereksinim olduğunu vurgulayarak lineer motorların uygulamalardaki önemine dikkat çekmiştir. Yüksek performanslı hareket için lineer anahtarlmalı relüktans motor uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Hareketlendiricinin çok basit bir yapıya sahip olduğunu, kolayca üretiminin yapılabileceğini ve hareket sınır anahtarına ihtiyacı olmadığını, son derece sağlam ve kötü ortam koşullarında çalışabilecek yapıda olduğunu belirtmişlerdir [5].

Thet, 5 metre uzunluğunda ve 75W gücündeki Lineer Anahtarlmalı Relüktans Motoru, bir konveyör sistemi için tasarlamıştır. Diğer lineer motorlardan farklı olarak daha basit yapıda, daha ekonomik, yüksek hızlarda uzun mesafede kullanıma çok uygun, daha sağlam ve daha fazla hata toleransına sahip olan LARM’nin vida, mıknatıs, fırça gibi mekanik parçalara gereksinim duymadığını, Özel ayarlamalar ve düzenlemelere ihtiyacı olmadığını belirtmiştir [6].

Kolomeitsev ve diğerkleri, LARM'yi trende kullanmak için geliştirip ve üretimini gerçekleştirmiştir. Tasarlanan motoru yatak yapılı olarak ve sonlu elemanlar metodu ile benzetimini yapmıştır. Gerçekleştirdiği tasarımıla, verimi en yükseğe çıkarıp akustik sesler de en aza indirmeyi amaçlamıştır [7].

Yuan-Jiang ve diğerkleri, pozisyon kontrol uygulamaları için yüksek doğruluk elde etmek maksadıyla boylamsal değişimde lineer anahtarlamalı relüktans motor(LARM) tasarlanmış ve analiz etmiştir. LARM'nin endüktans ve g profili, analitik manyetik devre analizi ve sonlu elemanlar metodu(SEM) kullanılarak analiz edilmiştir. SEM kullanımıyla LARM tasarımında, yüksek doğruluklu pozisyon kontrolü ile yarı iletken malzemelerin uygulanması optimize edilmiştir [8].

Daldaban ve diğerkleri, yaptıkları çalışmada yeni bir lineer anahtarlamalı relüktans motor yapısı tasarlamışlardır. Çift taraflı biçimde yerleştirilen yeni tasarımda düşük maliyetli birçok uygulamaya göre daha yüksek güç sağlamışlar. Lineer anahtarlamalı relüktans motorun karakteristikleri, sonlu elemanlar metodu(SEM) ve analitik hesaplamalar kullanılarak elde edilmiş. SEM ve analitik hesaplamaların sonuçları gösterilmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır [9].

Jang ve diğerkleri, yüksek hızlı lineer anahtarlamalı relüktans motor tasarımında, stator ve translator kutuplarının kavis oranına, kullanılan fazdaki endüktansın ve direncin zaman sabitesine bağlı olarak tasarım parametrelerine karar vermişler. Sonuç olarak sonlu elemanlar metodu kullanılarak LARM karakteristikleri analiz etmişlerdir [10].

Domingos ve diğerkleri, lineer anahtarlamalı relüktans motorun hız kontrolü ve 4 çeyreklik bölgede çalışması denemişlerdir [11]. Bae ve diğerkleri ise LARM'nin titreşimsiz şekilde kontrolünü kolaylaştırmak için en az sayıda güç elemanı kullanma üzerine çalışma yapmışlar. 4,8 metrelik uzunluğundaki bir LARM'yi unipolar anahtarlama stratejisi olarak bilinen konvertör için elde edilen deneysel sonuçları göstermişlerdir [12].

2008 yılında Liu X. ve arkadaşları da yine lineer fırçasız motorlu bir asansör kapısı sunmuşlardır. Motoru sonlu elemanlar metodu ile analiz edip tasarlamışlar ve çeşitli deneysel ve manyetik analiz ile teorik bulgularını ve asansör kapısındaki test sonuçlarını yayınlamışlardır [13].

2010 yılında Fenercioğlu A. ve Dursun M. çift taraflı, 12/8 kutuplu, 3 fazlı, düşük maliyetli bir lineer anahtarlama relüktans motorun tasarımını ve 3 boyutlu manyetik analizini yayınlamışlardır [14].

ARM ile ilgili yapılmış birçok çalışma vardır. Ancak bu çalışmaların geneli ARM'nin kontrolü ve kullanılma alanları ile ilgilidir. Referanslarda belirtilen çalışmalardan biri, yapay sinir ağları kullanılarak doğrusal olmayan bir anahtarlama relüktans motor sürücüsünün modellenmesidir [15].

Farklı bir çalışma olarak bulanık mantık tabanlı doğrusal olmayan relüktans motor sürücüsün çalışması ve modellemesi literatürde verilmiştir [16]. Yine referanslarda belirtilen çalışmaların biri de anahtarlama relüktans motor ile pompa tahriki konusunda bir doktora çalışmasıdır [17].

Bu çalışmada 250 W gücündeki bir Lineer ARM' nin, manyetik analizleri M. Dursun, H. Özbay F. Koç tarafından yapılmıştır [18]. Asansör, hastane, metro ve tren kapıları gibi doğrusal hareket eden kapı sistemlerine uygun bir motorun optimum geometrik özellikleri bulunup belirlenmiştir. Motorun ideal ve gerçek endüktans eğrileri çıkartılmıştır. Literatürde benzer çalışmalara da rastlanmaktadır [19-50].

Tezin bundan sonraki bölümleri özet olarak aşağıdaki gibidir:

İkinci bölümde, asansör kapısı sistemlerinin mekanik yapısı ve kullanılan donanımları incelenmiştir. Ayrıca, asansör tahrik sistemlerinde kullanılan motor çeşitleri ve aralarındaki farklar belirtilmiştir.

Üçüncü bölümde, Anahtarlamaalı Relüktans Motorun yapısı ve çalışması anlatılmıştır. Lineer Anahtarlamaalı Relüktans Moturun yapısı, çalışması, endüktansın translator konumu ile ilişkisi ve LARM ile asansör kapısı tahrik sistemi anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, tasarımı yapılan LARM'nin analitik analizlerinin yapım aşamaları ve manyetik analizi anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, Lineer Anahtarlamaalı Relüktans Motorun benzetimi yapılmıştır. Motorun değişik akımlarda ürettiği çekme kuvveti, manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, translator pozisyonuna göre endüktans değişimi ele alınmıştır. Farklı geometrik yapılara sahip translator ve stator modellerinin, farklı akımlarda ve farklı translator pozisyonlarında ürettiği çekme kuvveti, manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve endüktans değişimleri ele alınarak değerlendirme yapılmıştır.

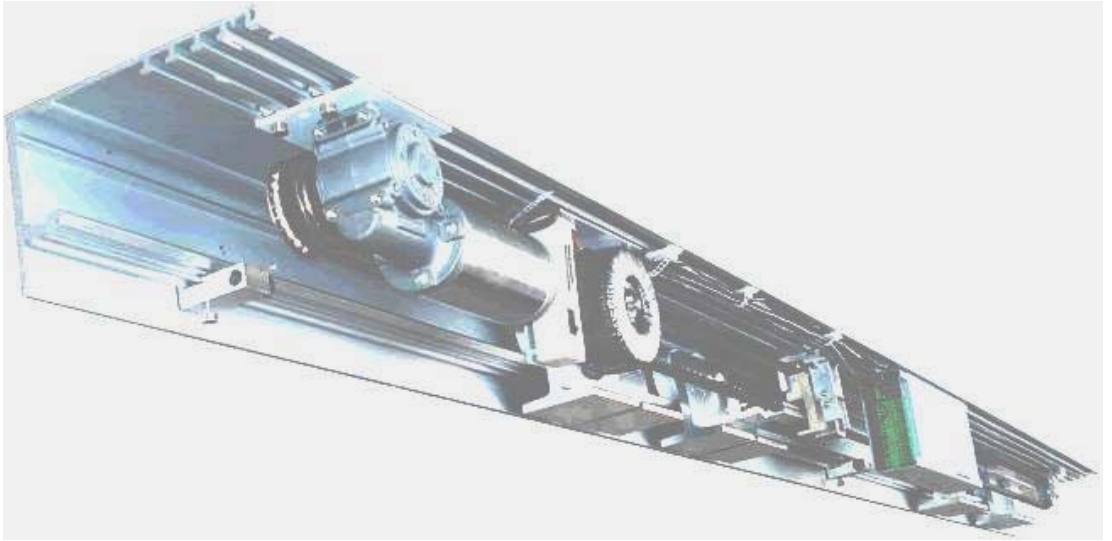
Altıncı bölümde, çalışmada kullanılacak olan sistemin yapısı, sistem elemanları ve elemanların özellikleri ile imalat aşamaları anlatılmıştır.

Yedinci bölümde, çalışmadan çıkan sonuçlar ile öneriler yer almaktadır.

2. ASANSÖR KAPISI TAHRİKİNDE KULLANILAN ELEKTRİK MOTORLARI

2.1. Asansör Kapılarının Mekanik Yapısı

Günümüzdeki 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 deforme olmakta, kolaylıkla bozulmaktadır. Bunun yanında 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. Klasik otomatik kapı sistemi Resim 2.1’ de verilmiştir.



Resim 2.1. Klasik otomatik kapı sistemi

DC motorların kontrol yapılarının basitliği ve analog devre elemanlarıyla gerçekleştirilebilmesi sebebiyle başlangıçtan günümüze kadar DC motorlar yaygın şekilde kullanılmakta ve endüstride önemli bir yer teşkil etmektedir. Benzer şekilde tren, metro, asansör veya ameliyathane kapılarında da genellikle doğru akım motoru kullanılmaktadır. Ancak DC motorlarda bulunan fırça ve kollektör gibi mekanik parçalarından dolayı bu motorların arıza oranının yüksek olması, kollektör ve fırçalar

arasında oluşan yanma ve patlama ihtimali olan ortamlarda kullanılmaması hız tepkisinin yavaş olması ve yüksek hızlarda kullanılmaması gibi sebepler DC motorların kullanımını sınırlamaktadır. Özellikle sık kullanılan kapı uygulamalarında fırça ve kollektör bakımı ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Ayrıca, DC motorlarının kalkışta yüksek akım çekmesi bir başka dezavantajı olarak görülebilir. İlk çalışma anında (kalkış), sağladıkları yüksek tork sebebiyle DC motorları tercih sebebi olmuştur.

2.2. Kapı Konumunun Algılanması

Asansör kapılarının konum algılanmasında kalıcı tip manyetik şalterin kullanımı yaygındır. Kalıcı tip manyetik şalter, mıknatısın aynı kutbu ile karşılaştığında kalıcı olarak kapanan, zıt kutbu ile karşılaştığından ise kalıcı olarak açılan kontağa sahip bir anahtardır. Yani mıknatısın bir kutbunu gördüğünde kontağı açıksa kapanır ve kapalı olarak kalır. Zıt kutupla karşılaşmadan aynı kutup ile tekrar karşılaşırsa kontağın konumu değişmez ve kapalı kontak durumu devam eder. Mıknatısın zıt kutbu ile karşılaştığında ise kontak açılır ve zıt kutupla karşılaşmadığı sürece kontak açık kalır [51].

2.3. Asansör Kapılarında Kullanılan Tahrik Motorları

Günümüzde elektrik motorları ile tahrik edilen asansör kapılarında, genellikle DA seri motoru, 3 fazlı sabit hızlı asenkron motor, 3 fazlı iki hızlı asenkron motor (dahlender motor), frekans çeviriciden beslenen asenkron motor kullanılmaktadır. Son yıllardaki çalışmalarda asansör tahrikinde anahtarlamalı relüktans motorun da kullanılabileceği belirtilmiştir.

2.3.1. DA seri motoru

DA seri motorlarının kalkınma torku yüksektir. Bir DA seri motorda oluşan manyetik akı devrenin akımına bağlıdır. Motorun milinden alınan tork da akıma ve akıya bağlıdır. Yani oluşan tork akımın karesi ile değiştiğinden kalkınmada motorun

çekmiş olduğu yüksek akım, yüksek torku da beraberinde getirecektir. Kalkınma torkunun yüksek olmasına karşın bakımlarının zorluğu bu motorların en büyük dezavantajıdır. Ayrıca üzerindeki yük arttıkça hızları oldukça azalır.

2.3.2. Üç fazlı asenkron motor

Basit asansör kapılarında asenkron motor kullanılabilir. Bu sistemler oldukça ekonomik ve basit olmakla birlikte ani ivmelenme vardır ve güvenli değildir. Sabit hızlı sistemlerde durma sırasında mekanik frenlemeden önce sargıdaki AA kesilerek yerine DA verilerek ani frenleme yaptırılabilir. Daha güvenli olması istenen yerlerde ise asenkron motorlar güç elektroniği devreleri kurularak frekans invertöründen beslenirler. Ancak, bu sistemler oldukça karmaşık ve pahalı sistemlerdir.

2.3.3. Anahtarlama relüktans motor

ARM'lerin kalkınma torkları yüksektir. Bu özelliği DA motorlara, bakım gerektirmemeleri asenkron motorlara benzemektedir. Ayrıca ARM'lerin hız kontrolü oldukça basittir. Hassas hız kontrolü ile yolcuların güvenliği daha yüksek tutulabilir. Tüm bu özellikleri ile ARM'ler gelecekte asansörlerde ve asansör kapılarında çok yaygın kullanılabileceği ihtimali yüksektir.

ARM'nin diğer motorlarla karşılaştırılması Çizelge 2.1' de yapılmıştır.

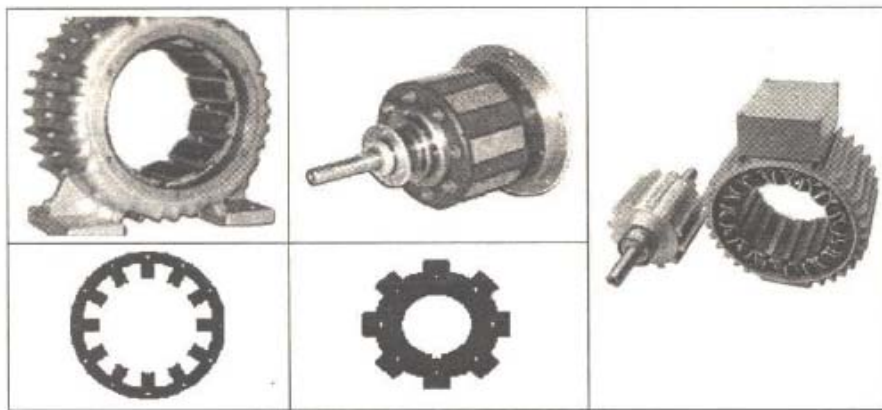
Çizelge 2.1. ARM'nin diğer motorlarla karşılaştırılması [49]

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

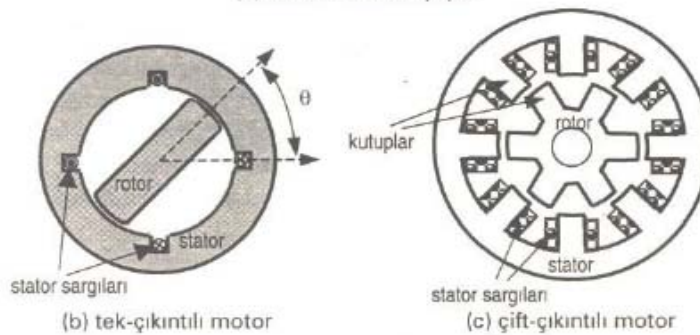
3. LİNEER ARM VE OTOMATİK KAPI TAHRİKİ

3.1. Anahtarlama Relüktans Motorun Yapısı

ARM'ler oldukça basit bir yapıya sahiptirler. Hem rotor hem de stator sıkıştırılmış paket saçlardan çıkıntılı kutuplu olmak üzere imal edilmiştir. Stator ve rotor, birer yüzleri yalıtılmış silisli saçların paketlenmesi ile imal edilmişlerdir. Stator sargı vardır, rotorda ise sargı yoktur ve stator kutup sargıları karşılıklı olarak birbirine seri bağlanmıştır. Stator kutup sargıları, küçük akım değerlerinde çok sipirli, küçük direnç ve endüktans değerlerinde az sipirli yapılır [52]. ARM'ler hem stator hem de rotorda çıkıntılı kutupları olan ve sargıları tek yönlü uyartılan motorlardır. Stator ve rotor, birer yüzleri yalıtılmış silisli saçların paketlenmesi ile imal edilmişlerdir. ARM'lerin tork üretebilmesi için stator sargılarının endüktansları rotor konumu ile değişecek şekilde tasarlanmalıdır. Şekil 3.1 (a)'da ARM parçaları, Şekil 3.1 (b) tek çıkıntılı ARM'nin kesit görünüşü verilmektedir[49].



(a) Stator ve rotor yapısı



(b) tek-çıkıntılı motor

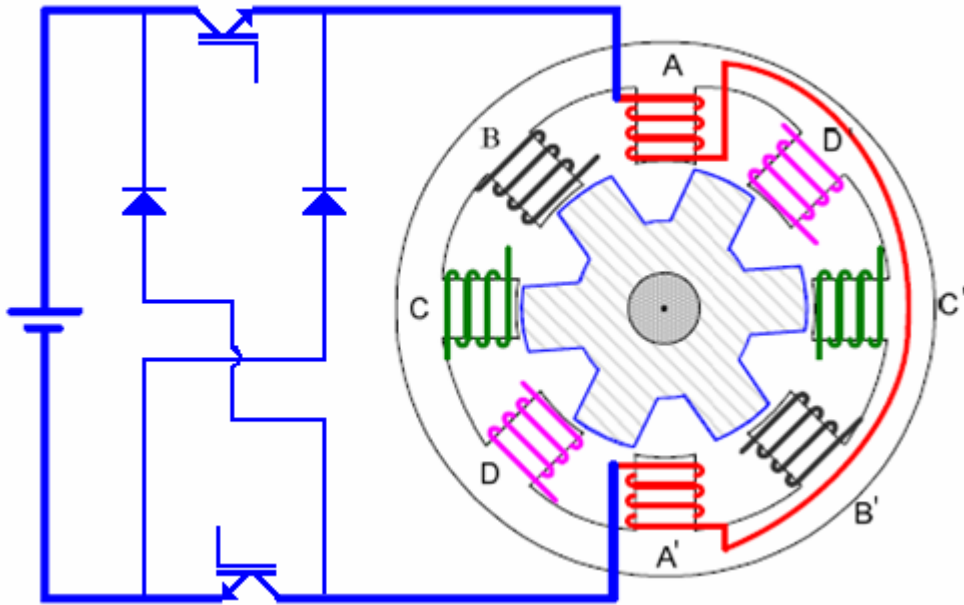
(c) çift-çıkıntılı motor

Şekil 3.1. ARM yapıları [49]

Bu örnekteki motor, çıkıntısız (silindirik) bir statora ve iki kutuplu çıkıntılı bir rotora sahiptir. Hem stator hem de rotor yüksek manyetik geçirgenlikli malzemeden yapılmıştır. Şekilde sadece iki stator fazı gösterilmiş olmasına rağmen daha fazla sayıda faz sargılarının kullanılması daha yaygındır. Her bir sargının endüktansı rotor konumu ile değişmektedir [53].

3.2. Anahtarlama Relüktans Motorun Çalışma Prensibi

ARM'lerde stator ve rotor kutup sayıları farklı (6/4, 8/6, 12/8, 12/10) sayılarda üretilebilir. Stator ve rotor kutup sayılarının fazla olması durumunda daha az tork dalgalanması olmakta, fakat ortalama tork ve bakır kayıplarından dolayı verim azalmaktadır. ARM'ler stator ve rotor kutup sayıları eşit ve katları (2/2, 4/2) sayılarda üretilmezler, çünkü stator ve rotor kutupları çakışık pozisyona geldiklerinde, kalkınma torku üretmek mümkün olmayacaktır. Şekil 3.2' deki A fazı (A ve A' sargıları) enerjilendirildiğinde faz sargıları elektromıknatis oluşturur ve rotoru kendine doğru çekmeye ve bu da rotoru hareket ettirmeye baslar [50].



Şekil 3.2. ARM yapısı ve faz sargıları

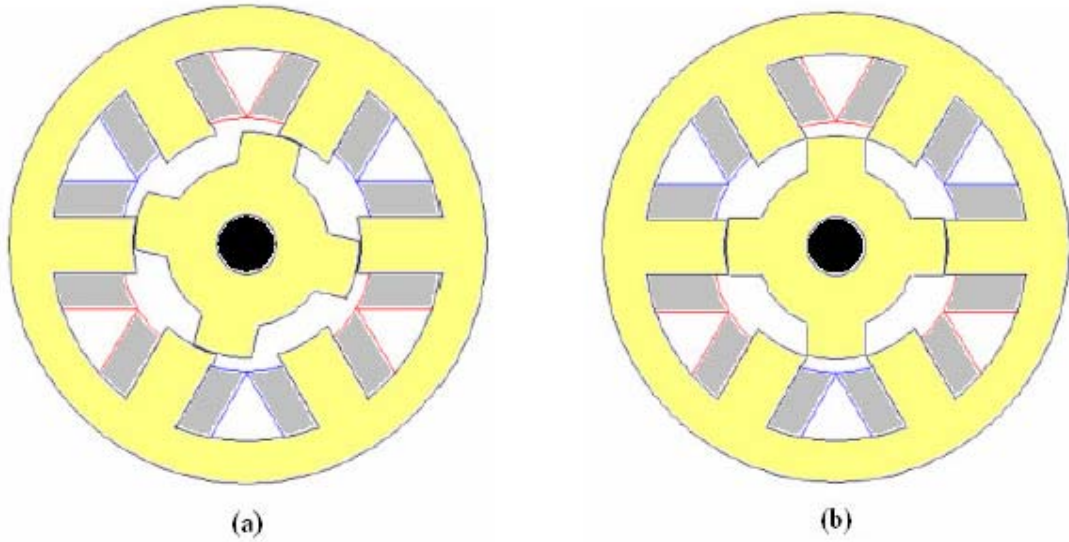
Rotor, A fazı ile çakışık pozisyona geldiğinde, rotor D faz sargılarının bulunduğu çıkıntı kutba yaklaşır. Motor bu durumda ayırık durumdan çakışık duruma gelmiş olur. A fazının enerjisi kesilerek D fazı enerjilendirildiğinde rotor D fazına doğru hareket etmeye baslar.

Stator fazlarının sıralı olarak enerjilendirilmesi ile her iki yönde sabit ortalama tork üretmek mümkün olmaktadır. Motorun stator yapısı simetrik çıkıntılara sahip olduğundan ve devrenin mıknatıslılığı manyetik akının yönünden bağımsız olduğundan üretilen tork stator kutbundaki akımın yönünden bağımsız olmaktadır. Motorun ayırık olduğu durumda, hava aralığındaki relüktans en yüksek değerdedir. Çakışık duruma yaklaştıkça relüktans azalır endüktans artar. Motor çakışık duruma geldiğinde o fazın enerjisi kesilmelidir. Doğru zamanda kesilmezse faydalı bir tork üretimi olmaz. Motorun oluşturduğu pozitif tork negatif torka dönüşerek fren etkisi yapar.

3.3. Endüktansın Rotor Konumu İle Değişimi

3.3.1. Çakışık pozisyon

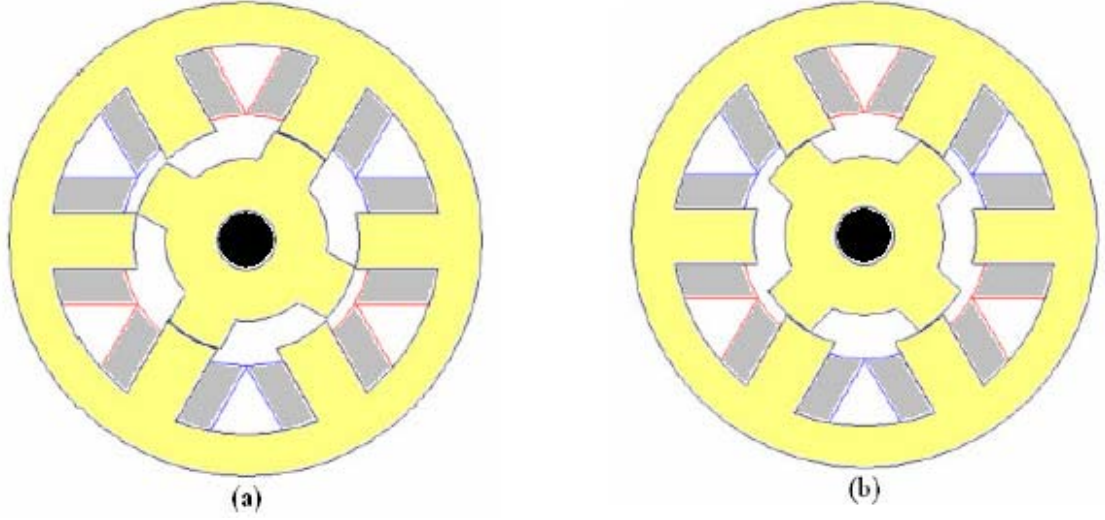
Rotor kutuplarının her hangi bir çifti 1. fazın stator kutupları ile tam olarak doğrultuya gelmişse bu faza Sekil 3.3 (b)'de görüldüğü gibi doğrultuya gelmiş pozisyona çakışık pozisyon denilir (1. fazın kutupları yatay eksendedir). Bu konum doğrultulu yada örtüşen pozisyon olarak da adlandırılır. 1. fazdan akım geçerken bu pozisyonda tork yoktur, çünkü rotor manyetik olarak kilitlemiş durumdadır. Eğer rotor Sekil 3.3 (a)'da görüldüğü gibi çakışık pozisyonunun iki tarafından birine kaydırılırsa, rotoru çakışık pozisyonuna geri getirmeye eğilimli bir geri getirici tork meydana gelir. Çakışık pozisyon tutma pozisyonudur [54,55]. Çakışık pozisyonda fazın endüktansı maksimum değerindedir. Çünkü akı yolunun manyetik relüktansı en düşük değerindedir. Düşük akım seviyelerinde relüktansın çoğu hava aralığındadır, fakat stator boyunduruğu yoluyla oluşan uzun manyetik yol üzerinde de bariz bir mmk düşümü olur ve bu düşük akımlarda bile çakışık endüktansı önemli miktarda düşürür.



Sekil 3.3. Anahtarlamaalı relüktans motorun çakışık ve yarı çakışık pozisyonları, (a) 6/4 ARM 1.fazda ters saat yönünde motor çalışması devam ederken kısmi çakışma pozisyonu, (b) 6/4 ARM 1.fazda ters saat yönünde motor çalışması devam ederken tam çakışma pozisyonu[49]

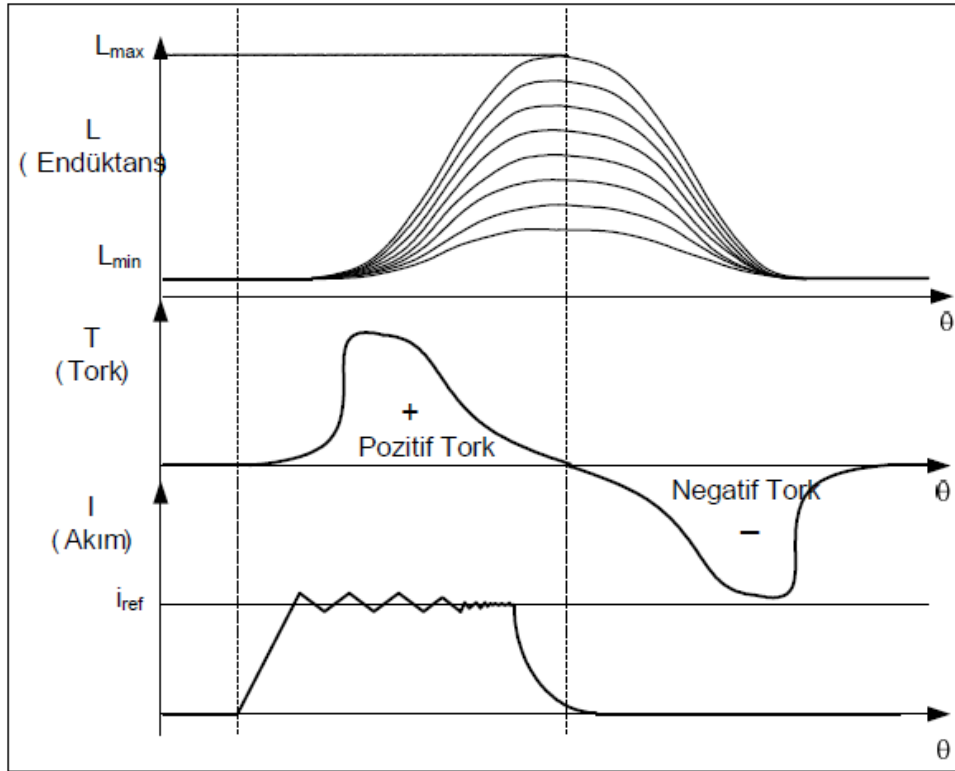
3.3.2. Ayrık pozisyon

Rotorun ara kutup eksenini 1. fazın kutuplarının eksenine ile aynı doğrultuya geldiğinde 1. faz Sekil 3.4 (b)'de görüldüğü gibi ayrık pozisyonda olur. Bu konum doğrultusuz veya örtüşmeyen pozisyon olarak da adlandırılır. 1. fazdan akım geçtiğinde bu pozisyonda tork yoktur. Eğer rotor ayrık pozisyonunun her iki yanına kaydırılırsa bunu daha ileri kaydırmaya ve sonraki çakışan pozisyona doğru çekmeye eğilimli bir tork gözükür.



Sekil 3.4. ARM'nin ayrık ve çakışmanın başladığı pozisyonları, (a) 6/4 ARM 1. fazda ters saat yönünde motor çalışması devam ederken çakışmanın başladığı pozisyon, (b) 6/4 ARM 1.fazda ters saat yönünde motor çalışması devam ederken ayrık pozisyon[49]

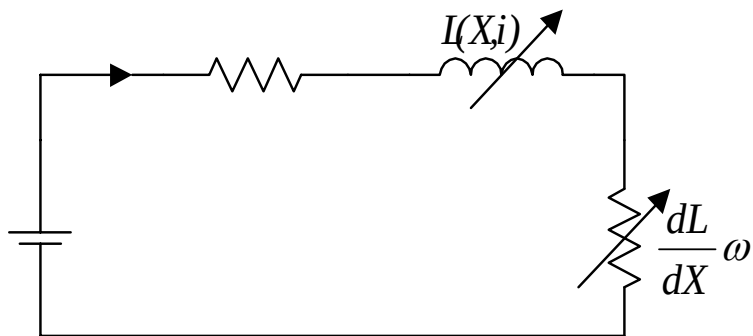
Ayrık pozisyon kararsız bir denge pozisyonudur. Bu pozisyonda fazın endüktansı minimum değerindedir. Çünkü akı yolunun manyetik relüktansı stator ve rotor arasındaki büyük hava aralığının bir sonucu olarak en yüksek değerinde bulunmaktadır. Hava aralığının relüktansı statorun boyunduruğu yoluyla uzun manyetik yola rağmen çelik kısımlarinkinden çok daha büyüktür [55-57]. ARM'de bir faz için, endüktans değişimi, üretilen pozitif, negatif tork ve faz sargısından geçen akım Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Sekil 3.5. Bir faz için endüktans, tork ve akım eğrileri[17]

3.4. ARM Eşdeğer Devresi

ARM'lerde motor faz endüktası, rotor pozisyonu ve sargıdan geçen akıma bağlı olarak değişir. ARM'nin genel devre denklemi Eş. 3.1 de verilmiştir. ARM'nin bir faz için eşdeğer devresi Şekil 3.6' da görülmektedir.



Şekil 3.6 ARM nin bir fazı için eşdeğer devre

Eşdeğer devreden her bir faz için gerilim diferansiyeli Eş. 3.1,

$$V = Ri + \frac{d\psi(X,i)}{dt} - M(X) \frac{di'}{dt} \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, V kaynak gerilimi, R stator sargı direnci, Ψ manyetik akı, i faz sargı akımı, $M(X)$ karşılıklı endüktans, X rotor pozisyon açısı, di' ilgili fazdan önce uyarılan sargı akımıdır. Doyum ihmal edildiğinde manyetik akı,

$$\psi = L(X,i) \quad (3.2)$$

olduğundan Eş. 3.2 yeniden düzenlendiğinde,

$$V = Ri + \frac{dL(X,i)}{dt} - M(X) \frac{di'}{dt} \quad (3.3)$$

olmaktadır. Burada $L(X,i)$ faz endüktansını göstermektedir. Eş. 3.3'deki türevsel ifade parçalara ayrıldığında karşılıklı endüktans ihmal edilerek;

$$V = Ri + L(X) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(X)}{dt} \quad (3.4)$$

şekline gelir. Karşılıklı endüktans değeri ihmal edildiğinde Eş. 3.4, Eş. 3.5 şekline gelir.

$$\frac{dL(X,i)}{dt} = \frac{dL(X,i)}{dX} \omega \quad (3.5)$$

Aynı zamanda;

$$\frac{di}{dt} = \frac{di}{dX} \omega \quad (3.6)$$

$$V = Ri + L(\theta) \frac{dX}{dX} \omega + i \frac{dL(X)}{dX} \omega \quad (3.7)$$

olmaktadır. Burada ω açısal hızdır. $L(\theta)$ ise endüktansın konuma göre değişimidir. Motor faz akımları pozisyona göre değişmektedir. Buna göre devrenin denklemini yeniden düzenlenirse K_a , K_b ve K_c motor fazları için birer sabit olmak üzere, Eş. 3.8, Eş. 3.9 ve Eş. 3.10 ile gösterilirse;

$$K_a = R + \omega (dL_a / dX) \quad (3.8)$$

$$K_b = R + \omega (dL_b / dX) \quad (3.9)$$

$$K_c = R + \omega (dL_c / dX) \quad (3.10)$$

olur. Motor elemanlarının tamamı durum uzay formunda;

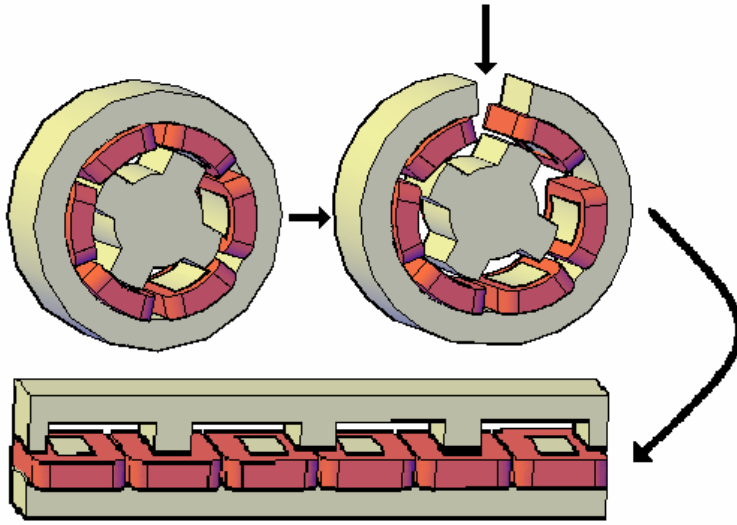
$$\dot{X} = Ax + Bu \quad (3.11)$$

ile gösterilirse Eş. 3.12 elde edilir [17].

$$\dot{X} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_a}{\omega L_a} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_a}{\omega L_a} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_a}{\omega L_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{\omega L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [V] \quad (3.12)$$

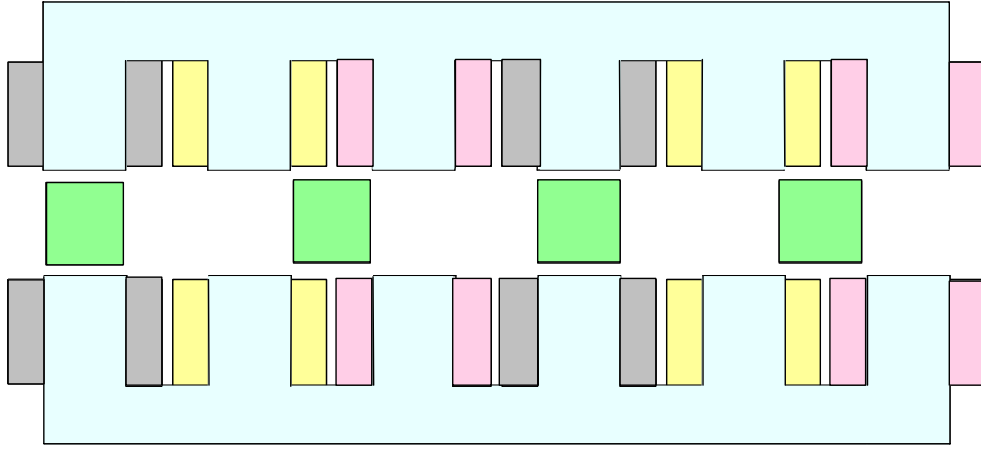
3.5. Lineer Anahtarlama Relüktans Motorun Yapısı ve Çalışması

Asansörler ve otomatik kapılar gibi doğrusal hareketin gerektiği birçok uygulama için Lineer Anahtarlama Relüktans Motoru geliştirilmiş ve uygulanmaya başlanmıştır. Lineer Anahtarlama Relüktans Motor (LARM) yapısı, Şekil 3.7' den görüleceği gibi dairesel hareket eden ARM'ler ile aynıdır.



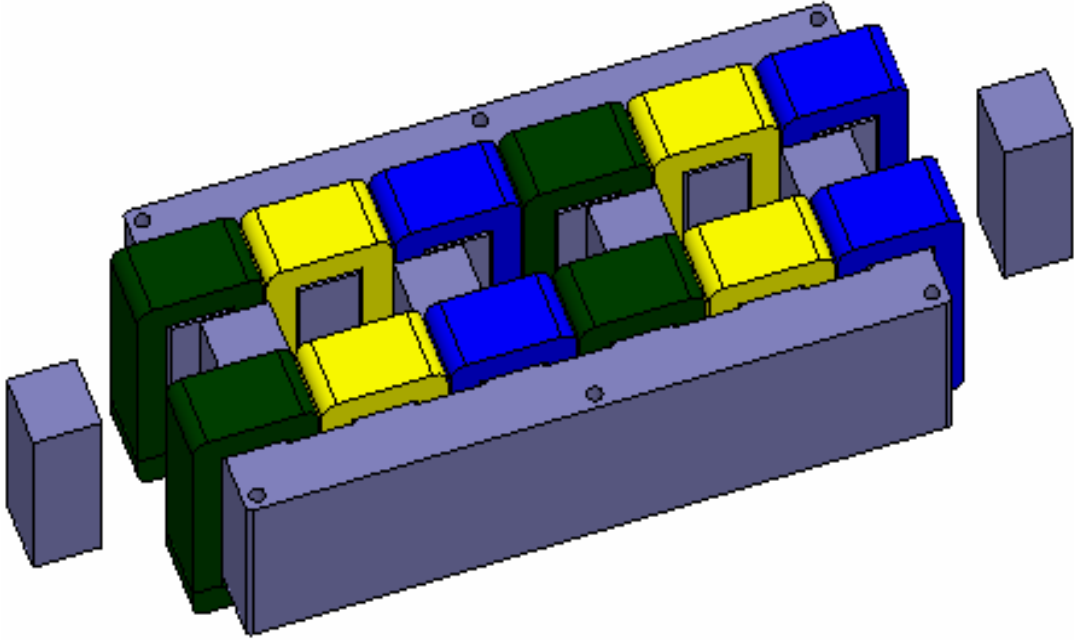
Şekil 3.7. Lineer Anahtarlama Relüktans Motor

Motor sargılarının ayrı iki translator yapısına karşılıklı olarak yerleşimi Şekil 3.8' de gösterilmiştir. translator konumu statora göre karşı karşıya durumundadır ve minimum relüktans göstermektedir. Bu durumda “y” sargıları enerjilendirilirse translator taşıyıcı olarak sağ tarafa doğru harekete geçecektir. Eğer diğer tarafa doğru hareket istenirse “z” sargıları enerjilendirilmelidir.



Şekil 3.8. Lineer Anahtarlamalı Relüktans Motorun Stator Sargılarının Yerleşimi

LARM’de bir faza ait sargılar enerjilendiği anda translator kutupları büyük bir elektromıknatis haline gelirler. Elektromıknatis haline gelen translator kutupları belli bir büyüklükteki çekme kuvveti ile en yakın stator kutuplarını kendilerine doğru çekerler. Oluşan hareket, başlangıçta ayrık pozisyonda bulunan translator ve stator kutupları çakışık pozisyona gelinceye kadar devam eder. Kutuplar çakışık pozisyona geldiğinde, eğer bu fazın enerjisi kesilip sıradaki faz enerjilendirilmez ise stator hareketi sona erer [57,58]. Motor kutuplarında kullanılan demirin mıknatıslanması manyetik akının yönünden bağımsız olduğundan ve devrenin simetrik çıkıntılara sahip olması nedeniyle translatorun çekim kuvveti, translator sargılarına uygulanan akımın yönüne bağımlı olmamaktadır. Uygun bir konvertör devresi ve sürme sistemi ile kontrol edilen LARM’ de diğer elektrik motorlarından daha yüksek verim elde edilebilir. Şekil 3.9’ da asansör kapısı için tasarlanmış bir LARM’ nin 3 boyutlu görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.9. Asansör kapısı tahriki için tasarlanmış olan LARM'nin 3 boyutlu görüntüsü

Lineer ARM'lerin başlıca özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Basit ve dayanıklı yapıya sahip olmaları
- Düşük maliyetle imal edilebilmeleri
- Yüksek akım çekmeden kalkışta yüksek çekme kuvveti üretebilmeleri
- Diğer motorlara oranla düşük sıcaklık değerinde yüksek hızda çalışabilmeleri
- Birbirinden bağımsız stator faz sargılarına sahip olmaları
- Motor momentinin faz akımlarının yönünden bağımsız olması ve dolayısıyla faz başına bir anahtar ile denetlenebilmeleri
- Dört bölgede çalışabilme özelliğine sahip olmaları
- Çekme kuvveti-hız karakteristiklerinde geniş, sabit çekme kuvveti-güç özelliğine sahip olmaları
- Yüksek verimli olmaları

3.6. LARM Sürme Devresi

LARM'lerde çekme kuvveti, faz akımının yönüne bağlı olmadığından tek yönlüdür ve tek kutuplu denetim devresi kullanılabilir. Bu da AA ile çalışan aynı sürücü devrelere göre bazı avantajlara sahip olduğunu gösterir. Histerisiz kayıplarının azalmasına olan etkisi, akımın tek yönlü olmasının ikinci bir avantajıdır.

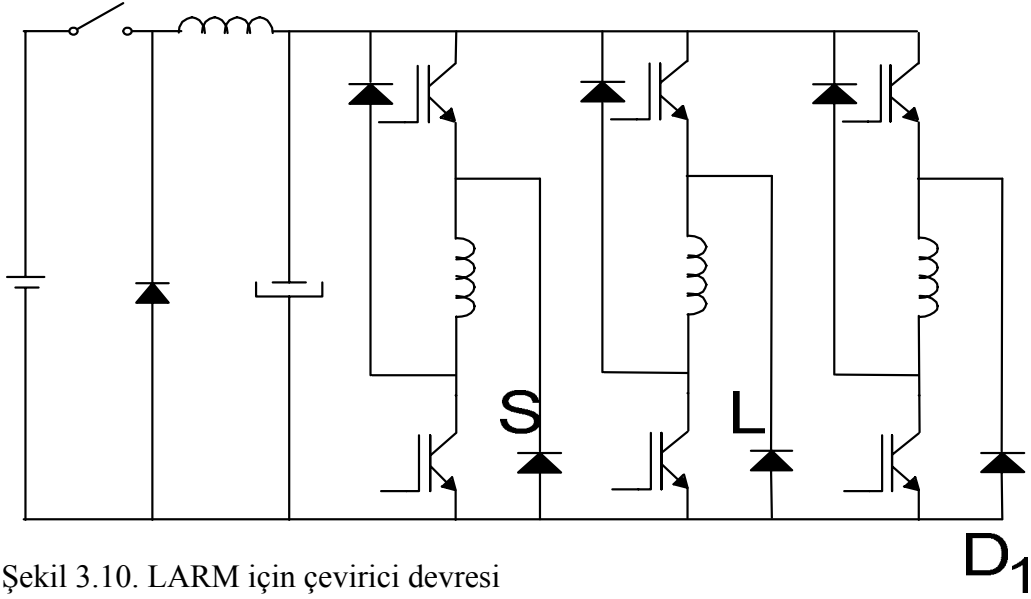
LARM için konvertör tasarımında karşılaşılan en önemli sorunlar ise şunlardır:

- Motor translator faz akımlarının komütasyonunda gerekli olan yüksek seviyeli enerji.
- Motorun translator faz akımlarının denetimindeki zorluk.

Bunların yanı sıra LARM'nin toplam performansını arttırmak için kullanılacak olan çevirici ek olarak aşağıdaki özellikleri de sağlamalıdır.

- Fazlardan biri tamamen kesime gitmeden diğer faz iletime geçirilmeli
- Çevirici, kesime götürülen faz sargısında depo edilen enerjiyi kaynağa ya da iletime geçirilecek bir sonraki faza aktarabilmeli
- Komütasyon süresini kısa tutabilmeli
- Kısıyıcı olarak çalışma esnasında anahtarlama serbest dolaşım sağlayabilmelidir [59].

LARM'lerin sargılarını enerjilendirmede kullanılan çeşitli çevirici tipleri mevcuttur. Bunlardan LARM için en uygun olanı ve kullanılacak olan klasik köprü tipi çeviricidir. Şekil 3.10' da ARM için kullanılacak bir çevirici devresi görülmektedir [17].



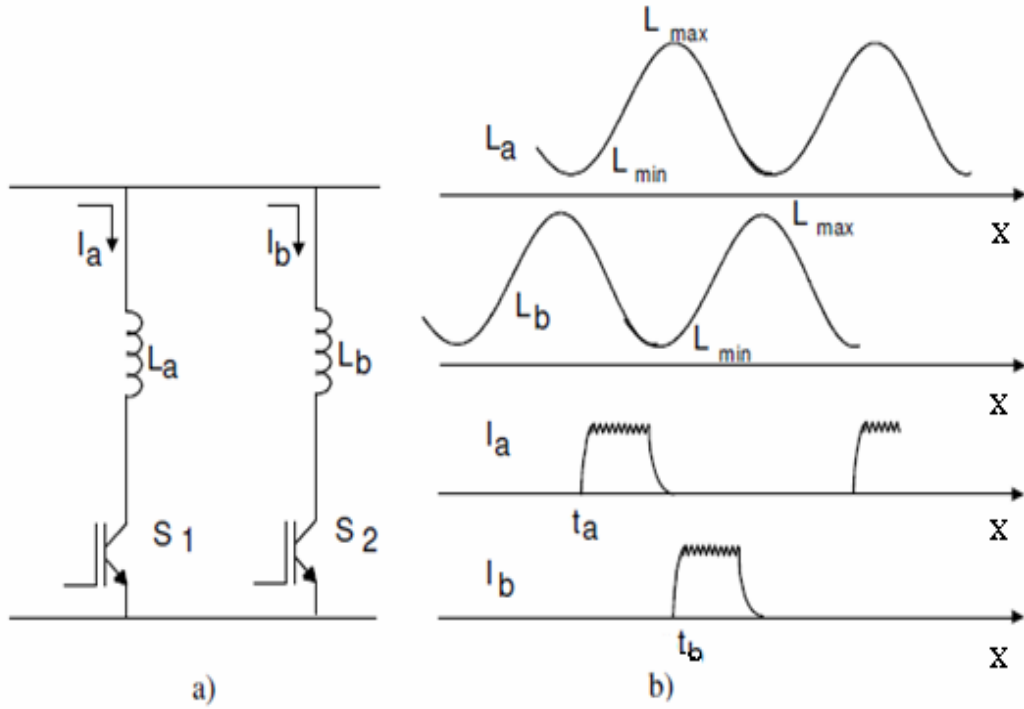
Şekil 3.10. LARM için çevirici devresi

LARM sürücü devre tasarımıındaki en büyük sorunlardan biri sargının enerjisi kesildikten sonra sargıda kalan artık enerjidir. Bu kalan enerjinin kendiliğinden sönmesi beklenmemelidir. Eğer, sargıdaki enerji bitmeden motor çakışık pozisyonundan ayrık pozisyona hareket etmeye başlarsa, o sargı statoru kendine çekmek isteyecektir. Bu durum motorunda frenleme etkisi yaratır. Bu olumsuz durumun önüne geçmek için sargıda enerjinin mümkün olduğunca kısa sürede bitirilmesi gerekmektedir. Bunun için çeşitli yöntemler vardır. Bunlardan en uygun olanı ve Şekil 3.10’ da görülen aktif toparlama metodudur. Bu yöntemde sargı üzerindeki enerji kondansatörü şarj etmek için kullanılır.

3.7. LARM’de Komütasyon

Kullanılan besleme devresinden bağımsız olarak, bir sargıdan diğerine komütasyon, depo edilmiş ve boşaltılması gereken yüksek seviye enerjili bir akım komütasyonudur. Bu durum komütasyon işleminde yüksek değerli motor endüktansından kaynaklanmaktadır. ARM’lerde bir fazdan diğerine komütasyon Şekil 3.11’de görülen devre ve dalga şekilleri ile açıklanabilir. Burada A fazından B fazına komütasyon dikkate alınmaktadır [60].

Pozitif çekme kuvveti üretmek amacıyla A sargısı, endüktansının yükselmeye başladığı anda enerjilendirilmektedir. S1 anahtarı t_a anında ilettime geçmekte ve t_b anında kesime gitmektedir. Bu anda, S2 anahtarı B sargısına enerji sağlamak için ilettime geçirilmektedir. t_b anında S1 anahtarı kesime götürüldüğü zaman, A sargısının endüktansı ise L_{max} ya da L_{max} 'a yakın olmaktadır.



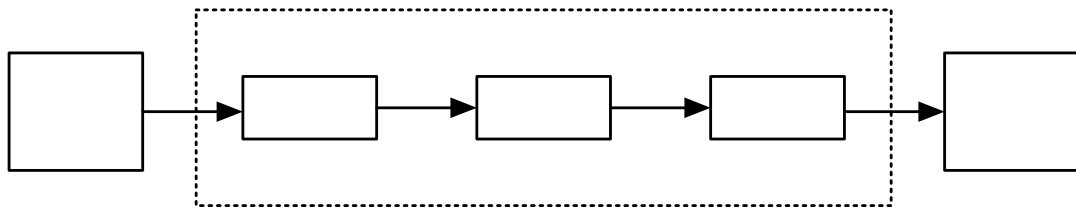
Sekil 3.11. ARM'de komütasyon işlemi (a) Basitleştirilmiş devre b) Dalga şekilleri

Negatif çekme kuvveti üretmekten kaçınmak için akım düşme zamanını azaltmak gerekmektedir. Bunun için de sargılarda depo edilen bu enerjinin hızlı bir şekilde tahliye edilmesi veya yok edilmesi gerekir. Bu problem için değişik çözüm sekileri vardır [61].

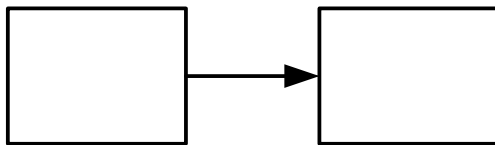
3.8. Otomatik Kapı Tahriki

3.8.1. LARM ile asansör kapısı tahrik sistemi tasarımı

Klasik kapı tahrik sisteminin blok diyagramı Şekil 3.12’de verilmiştir. Burada verilen blok diyagramında görüldü gibi doğrusal hareket eden bir kapı dairesel bir motorla redüktör ve kayış kasnak sistemi kullanılarak tahrik edilmektedir. Bu şekilde hem kapının tepki hızının azalmasına hem de güç aktarma organlarının sürtünmesi nedeniyle verimin düşmesine neden olmaktadır. Şekil 3.13’de ise tasarımı yapılan çift taraflı LARM’li bir asansör kapısı tahrik sistemi görülmektedir. Sistemde hava aralığının gücü direk olarak kayar kapı mekanizmasına aktarılarak sürtünmeler en aza inmesi amaçlanmıştır. Bu sistemde motorda da fırça ve kolektör olmadığı için sürtünmeler az, motor verimi yüksektir. Ayrıca güç aktarımında kayış, kasnak ve redüktör den kaynaklanan kayıplar önlenmiş hem de fazladan kullanılan güç aktarma elemanları kaldırılarak maliyet ucuzlatılmıştır.



Şekil 3.12. Klasik kapı tahrik sisteminin blok diyagramı



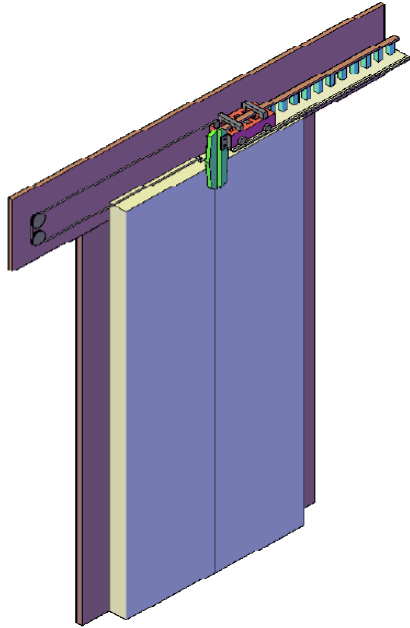
Şekil 3.13. Lineer ARM Kullanılan kapı tahrik sisteminin blok diyagramı

Tasarımda kullanılan çift taraflı LARM’de kapıyı translator hareket ettirmektedir. Aynı zamanda translator kayar kapıya doğrudan bağlanmış ve sargılar translator kutupları üzerine yerleştirilmiştir. Sistemin analizi ve simülasyonunun doğruluğu için sargıların bağlandığı translatorun pozisyonuna göre motorun endüktans eğrisinin

bilinmesi gerekir. Bu nedenle tasarımı yapılan motorun translator pozisyonuna göre 5 bölgeli endüktans eğrisi çıkarılmıştır. Bölgeler belirlenirken motorun geometrik ölçülerinden yararlanılmıştır.

Asansör kapısının tahriki için **EN 81** standardına göre 150 N., kapıyı hareket ettirmek için de 100 N.'luk kuvvet gerekmektedir. Bu standarda uygun bir motor tasarımı için Ansoft Maxwell 3D programı kullanılarak, sonlu elemanlar metoduna göre manyetik analizi yapılarak ölçülendirilen bir lineer ARM örnek alınmıştır [62,63].

Tasarımda kayar kapı kanadının toplam ağırlığı 25 kg olarak alınmıştır. Klasik sistemlerde kapının kapanma süresi 4 s' dir. Sürtünme kuvvetini yenmek için deneyle bulunan 100 N'luk bir kuvvet, kayıp olarak kabul edilmiştir. İlgili standarda göre kapının kapanma sırasında net olarak 150 N.'dan fazla bir kuvvete izin vermediğinden motorun indükleyeceği çekme kuvveti 250 N. olarak belirlenmiştir. Şekil 3.14' de tasarımı yapılarak kayar kapıya yerleştirilen LARM' nin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.14. Kayar kapı sistemine yerleştirilen LARM' nin görüntüsü

4. LARM'NİN TASARIMI VE ANALİZİ

4.1. LARM'nin Analitik Analizi

Bu çalışmada tasarlanan motorun translatorunda altı, statorunda dört adet çıkık kutup bulunmaktadır. Böylece kontrol devresi için gereken ve motorun faz sayısı ile doğru orantılı olarak artan anahtarlama elemanlarının sayısı da minimum seviyede tutulmaktadır.

Asansör kapısının tahriki için tasarımı yapılan lineer anahtarlama relüktans motorun temel parametrelerinde güç 250W, akım max. 8 A ve nominal çekme kuvveti 250 N olarak alınmıştır.

Motor parametreleri doğrultusunda motordaki her faz sargısı için uygulanan manyeto motor kuvveti (MMK) Eş. 4.1 ile hesaplanır;

$$F = F_g + F_s + F_r \quad (4.1)$$

Buradaki F , her faz için uygulanan toplam manyeto motor kuvvetini göstermektedir. F_g , F_s ve F_r terimleri ise sırasıyla, hava aralığındaki kuvvet düşümünü, translator nüvesindeki kuvvet düşümünü ve stator nüvesindeki kuvvet düşümünü göstermektedir.

Eş. 4.1 ve Eş. 4.2' den yararlanılarak manyetik alan şiddeti bulunabilir;

$$F = N_f i = \sum H_g l_g + \sum H_s l_s + \sum H_r l_r \quad (4.2)$$

Buradaki N_f , her faz sargısı için sarım sayısını, i ise, sargıdan geçen akımı göstermektedir. H_g , H_s , H_r , l_g , l_s , l_r terimleri ise sırasıyla, hava aralığındaki, translator nüvesindeki ve stator nüvesindeki manyetik alan şiddetlerini ve akı yolu uzunluklarını göstermektedir.

LAR motorun statorunda üretilen toplam akı;

$$\varphi_s(i, x) = B_s(i, x) A_s \quad (4.3)$$

şeklinde yazılır. Burada $B_s(i, x)$, i akımı altında ve x pozisyonunda iken stator kutbu akı yoğunluğunu, A_s ise stator kutbu alanını ifade eder.

Eş. 4.3 kullanılarak akı yoğunluğu bulunur ve nüvelerde kullanılan metallerin B-H karakteristik eğrilerinden manyetik alan şiddetleri(H) elde edilir. Motorun relüktansı, translator kutupları, stator kutupları ve hava aralığı için elde edilen manyetik alan şiddetleri ve ortalama uzunluklar yardımıyla Eş. 4.4 ile hesaplanır;

$$\mathfrak{R} = \frac{Hl}{\varphi} \quad (4.4)$$

Bir fazın endüktansı ise toplam manyetik akı yolları kullanılarak Eş. 4.5'ten bulunur.

$$L(i, x) = \sum L(i, x) = \frac{N_f}{i} \sum \varphi(i, x) \quad (4.5)$$

Her bir konum değeri için akı yollarının belirlenmesinin gerekli olması bu yöntemin büyük bir dezavantajıdır. Fakat başka bir analitik yöntemi bu yöntemle birleştirerek bunun üstesinden gelinebilir. Bu yöntemle göre herhangi bir andaki endüktans değeri Eş. 4.6'da verildiği gibi Fourier serisinin ilk üç terimi kullanılarak hesaplanabilir [64,65].

$$L(i, \theta) = L_0(i) + L_1(i) \cos(N_r \theta) + L_2(i) \cos(2N_r \theta) \quad (4.6)$$

Bu eşitlikle;

$$L_0(i) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (L_a + L_u) + L_m \right] \quad (4.7)$$

$$L_1(i) = \frac{1}{2} (L_a - L_u) \quad (4.8)$$

$$L_2(i) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (L_a + L_u) - L_m \right] \quad (4.9)$$

şeklinde ifade edilebilir. Böylece herhangi bir akım değeri ve konum için faz endüktansının hesaplanabilmesinde çakışık(L_a), ayrık(L_u) ve bu ikisinin arasındaki orta konuma(L_m) ait endüktans değerlerinin bilinmesi yeterlidir. Önceki yöntemde Eş. 4.7, Eş. 4.8 ve Eş. 4.9 ifadelerinden bu üç endüktans değeri hesaplandığında diğer konumlar için hesap gereksinimi duymadan Eş. 4.6 kullanılarak herhangi bir akım değeri için faz endüktansı analitik olarak hesaplanabilmektedir.

Doğrusal motorlarda çekme, yan ve normal kuvvet bileşenleri olmak üzere üç kuvvetin varlığı söz konusudur. Bu kuvvetler sırasıyla x, y ve z yönlerinde oluşan kuvvet bileşenleridir [66]. Hareket ettirecek kuvvet x yönünde olduğu varsayılırsa mekanik iş değişimi Eş. 4.10'da verildiği gibi ifade edilebilir.

$$dW_{m_x} = f_x dx \quad (4.10)$$

Burada f_x , motor tarafından üretilen çekme kuvvetini ifade etmektedir. Aynı ifade y ve z yönlerindeki kuvvet bileşenleri için de yazılabilir. Bu durumda hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu Eş. 4.11'de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$B_g = \frac{\phi}{XY} \quad (4.11)$$

Buradaki X ve Y ifadeleri, sırasıyla x ve y yönlerindeki meydana gelen translator ve statorun örtüşme miktarlarını ifade etmektedir. Eş. 4.11’de yer alan akı değerleri, Eş. 4.12’de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\phi = B_g XY = \mu_0 H_g XY = \frac{\mu_0 N_f i XY}{Z} \quad (4.12)$$

Böylece MMK için Eş. 4.13’te verilen ifade seçilir.

$$F = N_f i = \frac{\phi Z}{\mu_0 XY} \quad (4.13)$$

Motor giriş gücündeki değişim ise Eş. 4.14’te verildiği gibi ifade edilir.

$$dW_e = id(N_f \phi) = N_f id\phi = \frac{\phi Z}{\mu XY} d\phi \quad (4.14)$$

Manyetik alanda depo edilen enerji de Eş. 4.15’te verildiği gibi ifade edilebilir.

$$W_f = \frac{B_g^2}{2\mu_0} V_g \quad (4.15)$$

Burada V_g , translator ve stator kutuplarına ait örtüşen hacmi belirtmekte olup Eş. 4.16’da verildiği gibi ifade edilir.

$$V_g = XYZ \quad (4.16)$$

Eş. 4.15 ve Eş. 4.16 birlikte kullanılacak olursa, hava aralığında depo edilen enerji Eş. 4.17’de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$W_f = \frac{B_g^2 XYZ}{2\mu_0} = \left(\frac{\phi}{XY} \right)^2 \frac{XYZ}{2\mu_0} = \frac{\phi^2 Z}{2\mu_0 XY} \quad (4.17)$$

Böylece x yönündeki değişime karşılık gelen manyetik alan enerjisindeki değişim, Eş. 4.18’de ifade edildiği gibidir.

$$dW_{f_x} = -\frac{\phi^2 Z}{2\mu_0 X^2 Y} dx + \frac{\phi Z}{\mu_0 XY} d\phi \quad (4.18)$$

Bu değişime karşılık mekanik enerjideki değişim ise Eş. 4.19’da ifade edilmiştir.

$$dW_{m_x} = dW_e - dW_{f_x} = \frac{\phi^2 Z}{2\mu_0 X^2 Y} dx \quad (4.19)$$

LARM tarafından üretilen çekme kuvveti mekanik enerji değişiminin mesafe değişimine oranı olacağından bu kuvvet Eş. 4.20’de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$f_x = \frac{dW_{m_x}}{dx} = \frac{B_g^2}{2\mu_0} YZ \quad (4.20)$$

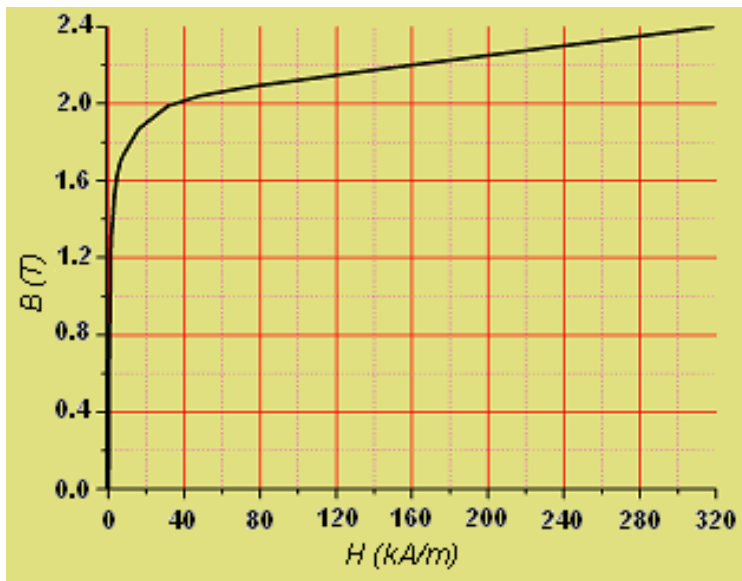
Aynı ifade y ve z yönlerindeki yan ve normal kuvvet bileşenleri olan f_y ve f_z için de sırasıyla Eş. 4.21 ve Eş. 4.22’de verildiği gibi ifade etmek mümkündür [66].

$$f_y = \frac{dW_{m_y}}{dy} = \frac{B_g^2}{2\mu_0} XZ \quad (4.21)$$

$$f_z = -\frac{dW_{m_z}}{dz} = -\frac{B_g^2}{2\mu_0} XY \quad (4.22)$$

4.2. LARM'nin Manyetik Analizi

LARM'nin translatoru ve statoru Steel 1010 karakteristiğindeki çelik malzeme ile tasarlanmıştır. Steel 1010 malzemesinin B-H eğrisi Şekil 4.1'de verilmiştir. Translator sargılarında ise bakır kullanılarak, modelin dış bölgesi hava olarak atanmıştır.

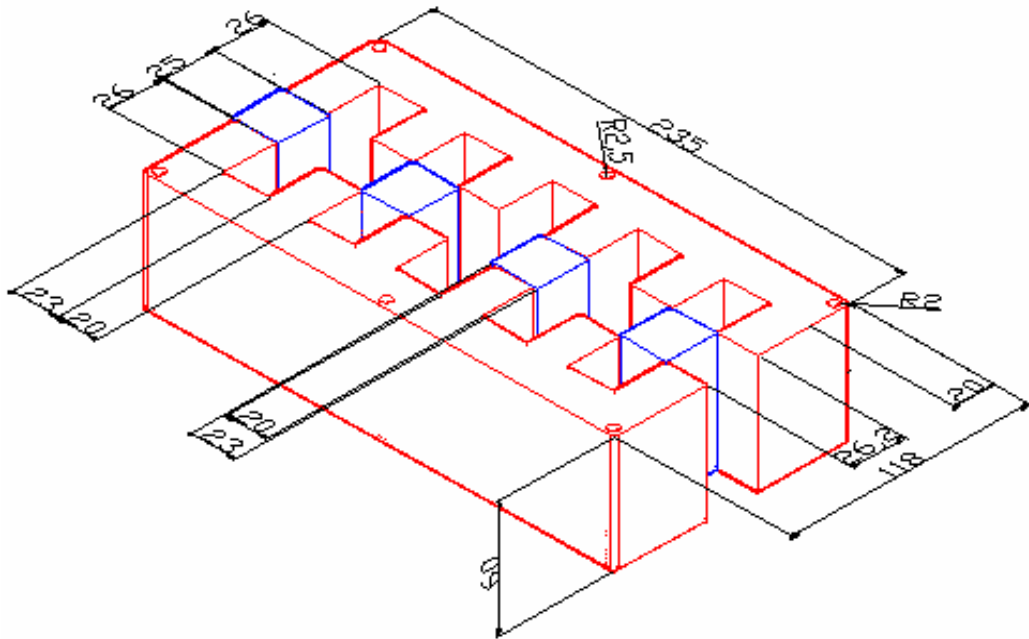


Şekil 4.1 Steel 1010 BH Eğrisi

Motorun tasarıma uygun olarak mekanik ve elektriksel parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu parametreler doğrultusunda Şekil 4.2' de görüldüğü gibi motor 3 boyutlu olarak bilgisayar ortamında görselleştirilmiştir.

Çizelge 4.1. LAR motoruna ait mekanik ve elektriksel parametreler

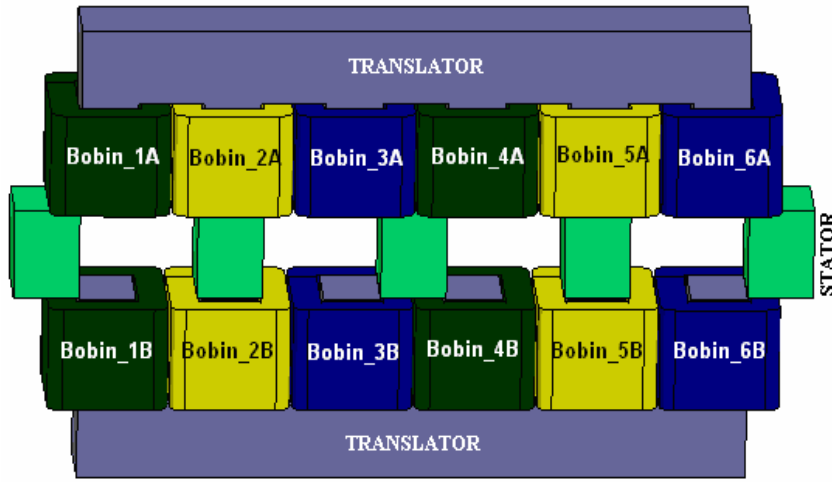
Faz Sayısı	3
Translator Kutbu Genişliği	20 mm
Translator Kutbu Aralığı	23 mm
Translator Kutup Yüksekliği	26 mm
Translator Derinliği	60 mm
Stator Kutup Genişliği	23 mm
Stator Derinliği	60 mm
Toplam Uzunluk	235 mm
Toplam Genişlik	118 mm
Hava Aralığı	0.6 mm
Çelik tipi	Steel 1010



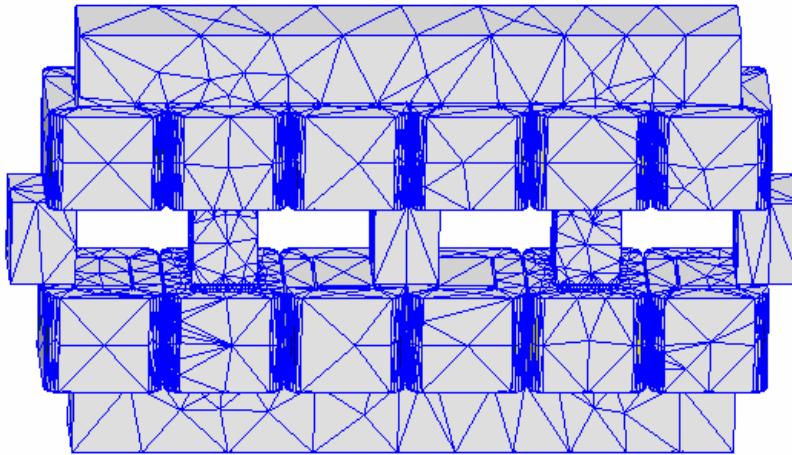
Şekil 4.2. Tasarlanan motorun 3 boyutlu olarak görselleştirimi

Tasarımı tamamlanan motorun Ansoft Maxwell 3D yazılımı aracılığı ile benzetim aşamasına gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu olarak çizimi gerçekleştirilen motorun benzetimi yapılmıştır. LARM'nin statoru üzerinde oluşan elektromanyetik çekme

kuvveti, sargılarının ortak endüktans ve kaçak endüktans analizi, manyetik akı ve akı yoğunluğu ile manyetik akı ve akı yoğunluğu vektörleri elde edilmiştir. Bu elde edilen değerler, statorun konumuna ve akıma göre değiştiği için lineer olmayan fonksiyonlardır. Bu nedenle motorun performans analizinin gerçekleştirilmesinde en uygun yöntem sonlu elemanlar analizidir. Şekil 4.3’ de manyetik analizi yapılan motorun üç boyutlu modelinin benzetimi ve sonlu elemanlar yüzeyi verilmiştir.



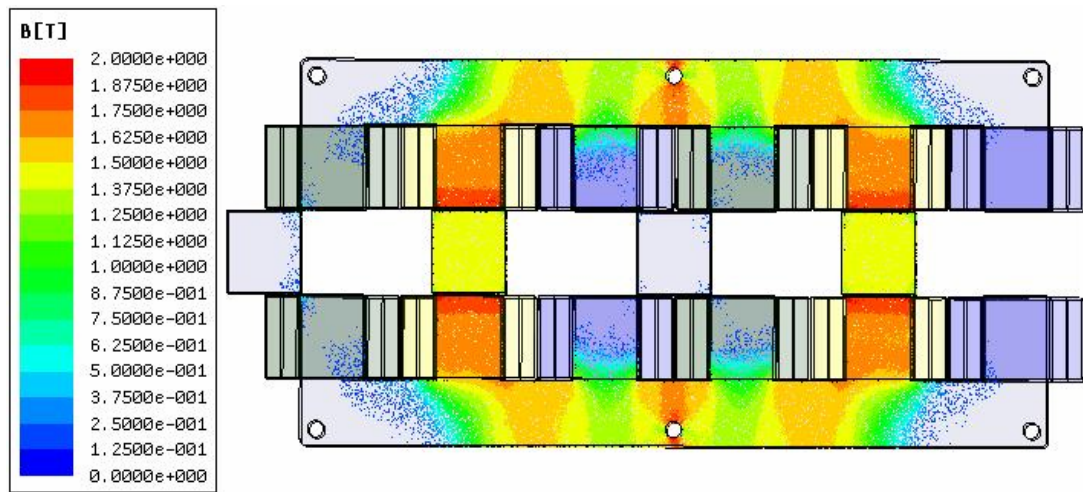
(a)



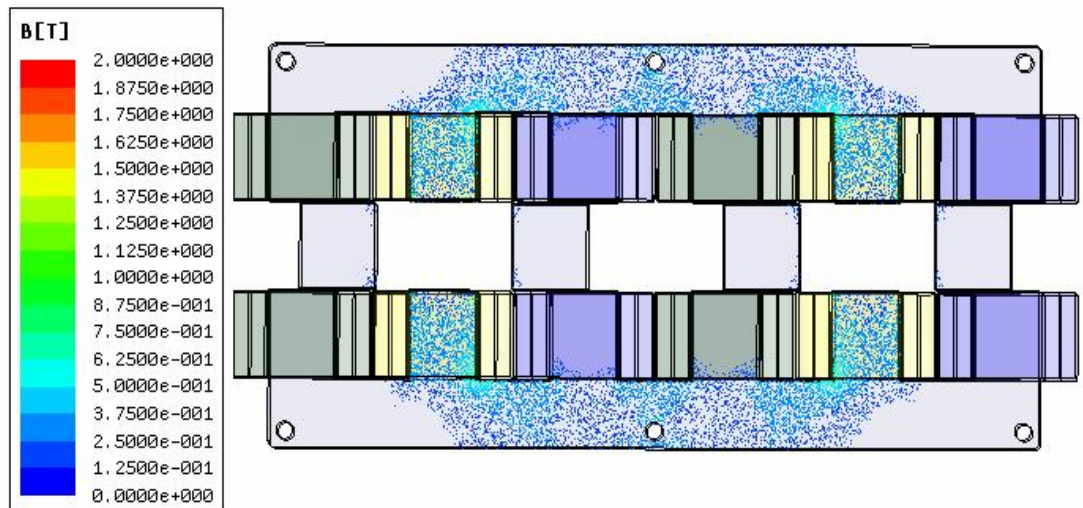
(b)

Şekil 4.3. Tasarlanan LAR Motora ait (a) Üç boyutlu modelinin benzetimi
(b) Sonlu elemanlar yüzeyi

Motorun manyetik analizindeki değişkenler, statorun konumu ve sargı akımlarıdır. Kullanılan Ansoft Maxwell 3D yazılımı ile stator konumuna bağlı olarak motorun sonlu elemanlar yüzeyini oluşturmakta ve ardından faz endüktansları, çekme kuvveti, manyetik akı ve akı yoğunluğu gibi temel çıkış parametrelerini hesaplamaktadır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de sırasıyla çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve ayrık durumdaki manyetik akı yoğunluğu verilmektedir.

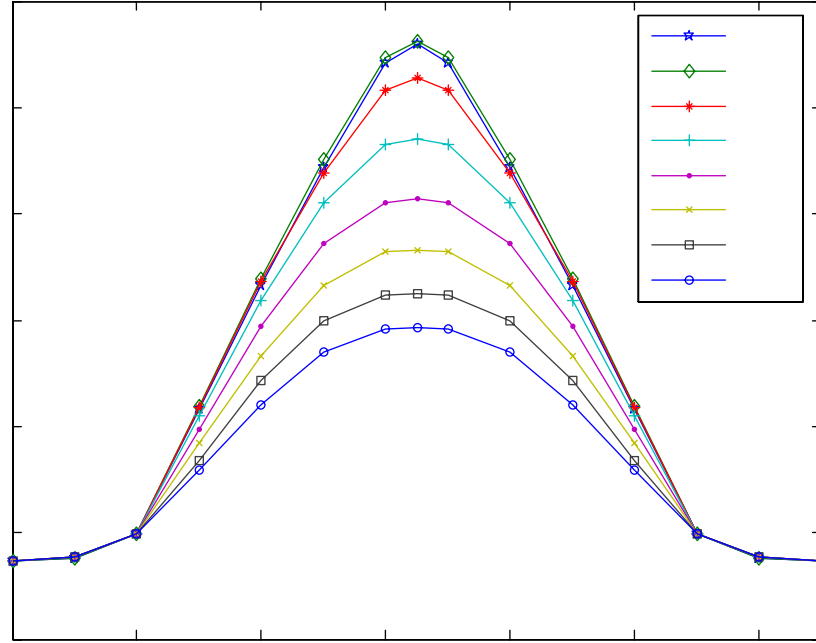


Şekil 4.4. Çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu



Şekil 4.5. Ayrık durumdaki manyetik akı yoğunluğu

LARM'nin en önemli karakteristik eğrileri, stator konumu-kuvvet ve sargı akımı-endüktans değişimleridir. Motorun dinamik performansı bu eğriler yardımı ile elde edilir. Tasarımı yapılan motorun manyetik analizi sırasında sargılara 8 A akım uygulanmıştır. Bu durumda stator durumuna göre elde edilen endüktans değişimi ve kuvvet Newton cinsinden Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekildeki grafik stator ve translatorun sonlu elamanlar yöntemi ile motorun farklı uyarma ve stator konumları için tamamen ayrık konumundan çakışık durumuna kadar olan kuvvet değişimini göstermektedir. LARM'nin bir fazına ait farklı akım ve farklı stator konumlarına göre endüktans değişimi Çizelge 4.2'de verilmiştir.

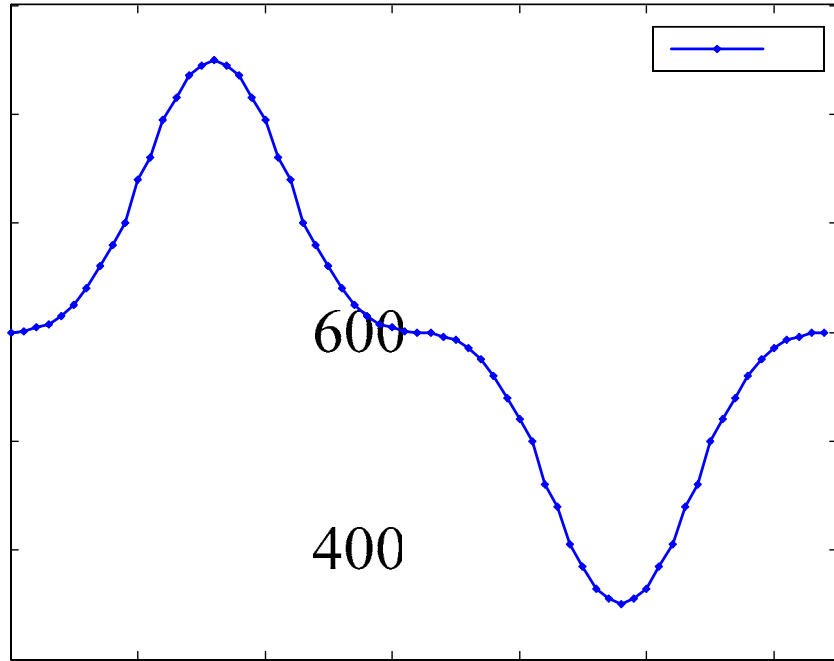


Şekil 4.6. Pozisyona göre Akım-Endüktans değişimi

0.012

0.010

0.008



Şekil 4.7. Pozisyona göre kuvvet değişimi

Çizelge 4.2. Bir faza ait akım-pozisyon değişimine göre endüktans değerleri

Pozisyon(mm)	L(1A) mH	L(2A) mH	L(3A) mH	L(4A) mH	L(5A) mH	L(6A) mH	L(7A) mH	L(8A) mH
Ayrık(0)	0,001462	0,001463	0,001464	0,001466	0,001468	0,001469	0,001471	0,001472
5	0,001531	0,001532	0,001533	0,001535	0,001538	0,001539	0,001541	0,001542
10	0,001973	0,001976	0,001979	0,001984	0,001986	0,001984	0,001985	0,001978
15	0,004336	0,004377	0,004351	0,004189	0,003947	0,003697	0,003364	0,003182
20	0,006661	0,006790	0,006722	0,006368	0,005895	0,005335	0,004856	0,004409
25	0,008867	0,009024	0,008771	0,008204	0,007430	0,006662	0,005985	0,005407
30	0,010831	0,010931	0,010331	0,009314	0,008197	0,007283	0,006462	0,005825
Çakışık(32.5)	0,011200	0,011253	0,010548	0,009410	0,008282	0,007313	0,006498	0,005851
35	0,010831	0,010931	0,010331	0,009314	0,008197	0,007283	0,006462	0,005825
40	0,008867	0,009024	0,008771	0,008204	0,007430	0,006662	0,005985	0,005407
45	0,006661	0,006790	0,006722	0,006368	0,005895	0,005335	0,004856	0,004409
50	0,004336	0,004377	0,004351	0,004189	0,003947	0,003697	0,003364	0,003182
55	0,001973	0,001976	0,001979	0,001984	0,001986	0,001984	0,001985	0,001978
60	0,001531	0,001532	0,001533	0,001535	0,001538	0,001539	0,001541	0,001542
Ayrık(65)	0,001462	0,001463	0,001464	0,001466	0,001468	0,001469	0,001471	0,001472

LARM'nin en önemli karakteristik eğrileri, stator konumu-kuvvet ve sargı akımı-endüktans değişimleridir. Motorun dinamik performansı bu eğriler sayesinde elde edilir. Manyetik analizi yapılan motorun çakışık durumdaki 5A akımda fazlar arası endüktans matrisi Çizelge 4.3'te verilmiştir. Ayrık durumdaki fazlar arası endüktans matrisi ise Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Çakışık durumdaki fazlar arası endüktans (mH) matrisi

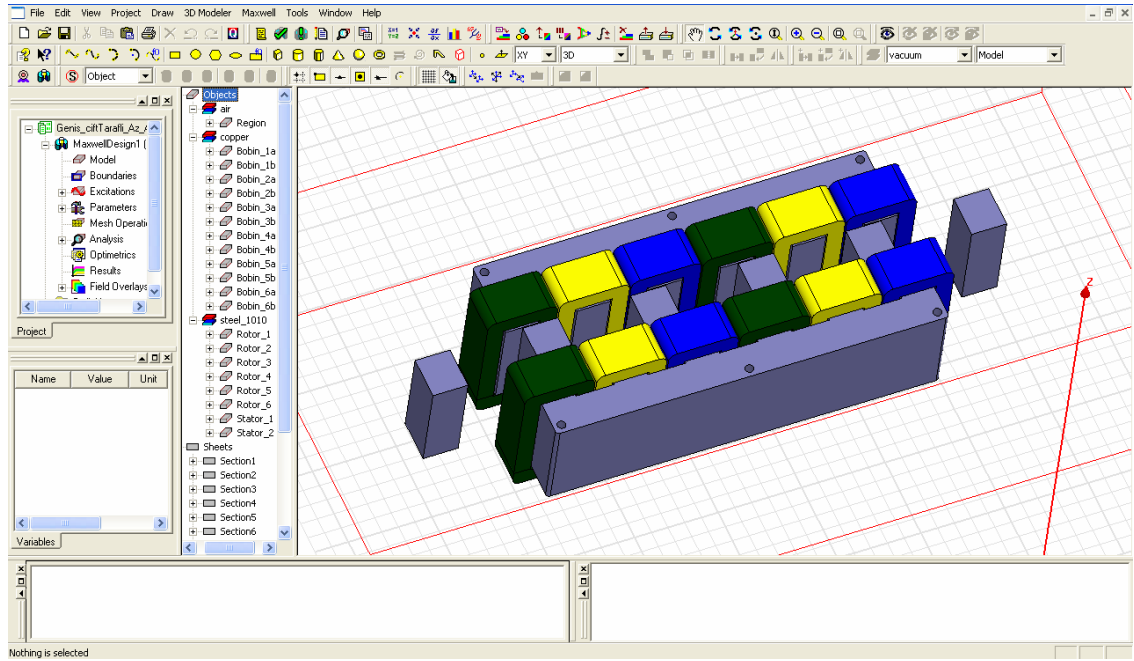
	L (Bobin 1A) mH	L (Bobin 2A) mH	L (Bobin 3A) mH	L (Bobin 4A) mH	L (Bobin 5A) mH	L (Bobin 6A) mH	L (Bobin 1B) mH	L (Bobin 2B) mH	L (Bobin 3B) mH	L (Bobin 4B) mH	L (Bobin 5B) mH	L (Bobin 6B) mH
Bobin 1A	0.0002531	0.0001036	-0,747740	-0,218610	-0,309660	-0,232190	0,240360	0,245810	0,305580	0,304850	0,189880	0,183890
Bobin 2A	0.0001036	0.0002517	-0,221140	-0,766610	-0,024750	-0,287090	0,228260	0,252890	0,300860	0,302960	0,186810	0,182840
Bobin 3A	-0,747740	-0,221140	0.0003484	0.0001959	-0,759570	-0,242910	0,426450	0,401390	0,521680	0,517980	0,323220	0,313330
Bobin 4A	-0,218610	-0,766610	0.0001959	0.0003549	-0,264510	-0,743370	0,380180	0,045980	0,523060	0,052940	0,325750	0,318560
Bobin 5A	-0,309660	-0,024750	-0,759570	-0,264510	0.0003779	0,696980	0.0001353	-0,061040	0,453020	0,398070	0,268920	2.52E-005
Bobin 6A	-0,232190	-0,287090	-0,242910	-0,743370	0,696980	0.0003608	-0,513740	0.0001310	0,368860	0,422040	0,240320	0,243280
Bobin 1B	0,240360	0,228260	0,426450	0,380180	0.0001353	-0,513740	0.0003682	0,726570	-0,074690	-0,024910	-0,312850	-0,247690
Bobin 2B	0,245810	0,252890	0,401390	0,045980	-0,061040	0.0001310	0,726570	0.0003753	-0,275370	-0,077460	-0,270550	-0,320460
Bobin 3B	0,305580	0,300860	0,521680	0,523060	0,453020	0,368860	-0,074690	-0,275370	0.0003530	0.0001966	-0,795620	-0,242980
Bobin 4B	0,304850	0,302960	0,517980	0,052940	0,398070	0,422040	-0,024910	-0,077460	0.0001966	0.0003533	-0,251230	-0,779720
Bobin 5B	0,189880	0,186810	0,323220	0,325750	0,268920	0,240320	-0,312850	-0,270550	-0,795620	-0,251230	0.0002662	0.0001127
Bobin 6B	0,183890	0,182840	0,313330	0,318560	2.52E-005	0,243280	-0,247690	-0,320460	-0,242980	-0,779720	0.0001127	0.0002570

Çizelge 4.4. Ayırık durumdaki fazlar arası endüktans (mH) matrisi

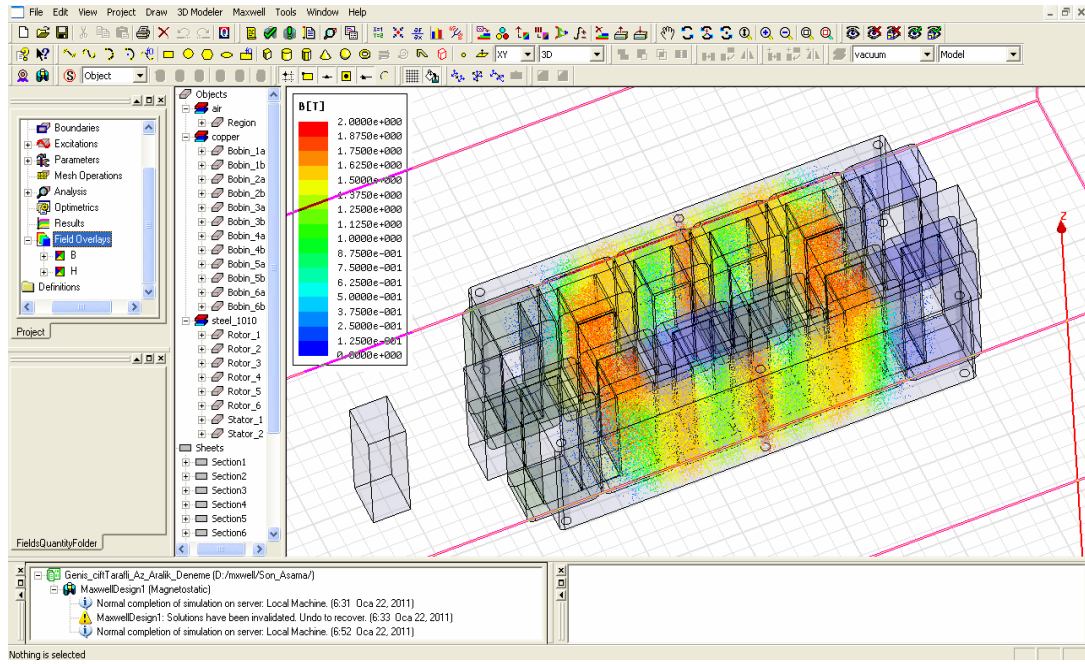
	L (Bobin 1A) mH	L (Bobin 2A) mH	L (Bobin 3A) mH	L (Bobin 4A) mH	L (Bobin 5A) mH	L (Bobin 6A) mH	L (Bobin 1B) mH	L (Bobin 2B) mH	L (Bobin 3B) mH	L (Bobin 4B) mH	L (Bobin 5B) mH	L (Bobin 6B) mH
Bobin 1A	0.0005329	0.0003905	-0,813060	-0,254190	-0,727980	-0,654760	0.0001779	0.0001767	0,363020	3.36E-005	0,519760	0,553460
Bobin 2A	0.0003905	0.0005337	-0,256020	-0,812230	-6.51E-005	-0,736120	0.0001773	0.0001778	0,036240	0,337840	0,519880	0,555250
Bobin 3A	-0,813060	-0,256020	0.0002706	0,363330	-0,884080	0,470510	0,429710	0,383110	0,085207	0,074819	0,119410	0,125770
Bobin 4A	-0,254190	-0,812230	0,363330	0.0002715	0,462110	-0,903380	0,380150	0,425510	0,079964	0,078627	0,116890	0,126250
Bobin 5A	-0,727980	-6.51E-005	-0,884080	0,462110	0.0003689	0.0001102	0.0001123	0,522490	0,016740	0,126490	0,219820	0,225780
Bobin 6A	-0,654760	-0,736120	0,470510	-0,903380	0.0001102	0.0003731	0,526780	0.0001125	0,138340	0,158020	0,021370	0,236680
Bobin 1B	0.0001779	0.0001773	0,429710	0,380150	0.0001123	0,526780	0.0005927	0.0004127	-0,826040	-0,251640	-0,717350	-0,687370
Bobin 2B	0.0001767	0.0001778	0,383110	0,425510	0,522490	0.0001125	0.0004127	0.0005916	-0,286440	-0,788270	-0,646160	-0,766120
Bobin 3B	0,363020	0,036240	0,085207	0,079964	0,016740	0,138340	-0,826040	-0,286440	0.0002663	0,383680	-0,825460	0,478450
Bobin 4B	3.36E-005	0,337840	0,074819	0,078627	0,126490	0,158020	-0,251640	-0,788270	0,383680	0.0002685	0,389340	-0,943960
Bobin 5B	0,519760	0,519880	0,119410	0,116890	0,219820	0,021370	-0,717350	-0,646160	-0,825460	0,389340	0.0003026	0,983310
Bobin 6B	0,553460	0,555250	0,125770	0,126250	0,225780	0,236680	-0,687370	-0,766120	0,478450	-0,943960	0,983310	0.0003297

5. BENZETİM VE DENEY SONUÇLARI

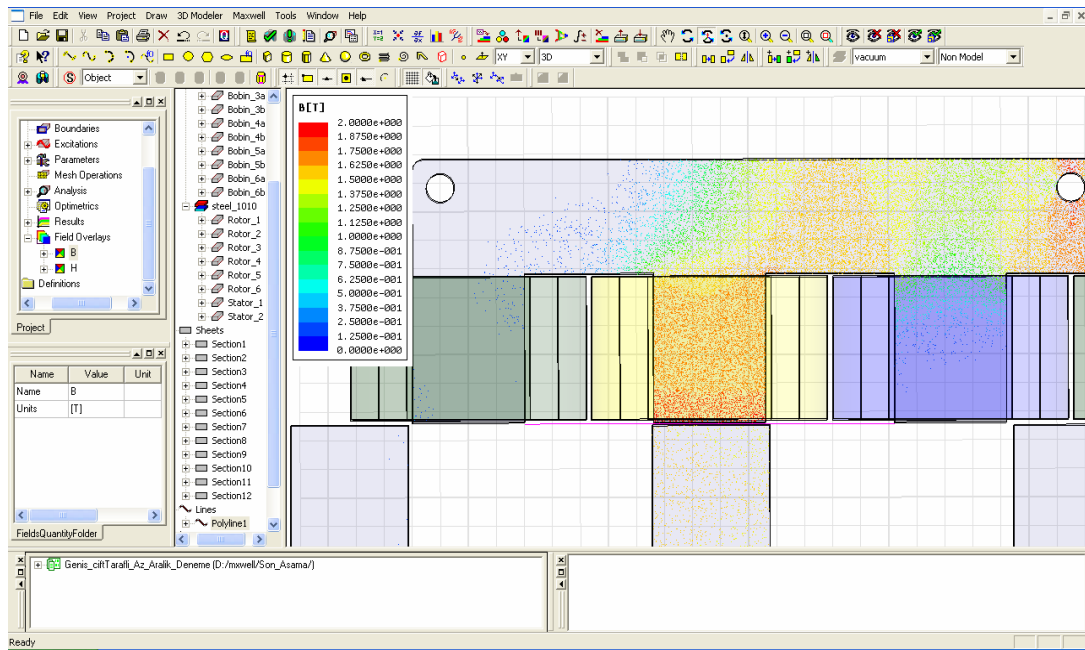
Bu çalışmada, Lineer Anahtarlama Relüktans Motorun manyetik analizleri Ansoft Maxwell 3D benzetim programı kullanılarak yapılmıştır. Farklı akım ve stator pozisyonlarında, benzetim programı ile sonlu elemanlar metodu yöntemi kullanılarak manyetik analizler yapılmıştır. Elde edilen manyetik akı yoğunlukları ve manyetik alan şiddetleri ile endüktans değerleri ve çekme kuvvetleri sunulmuştur.



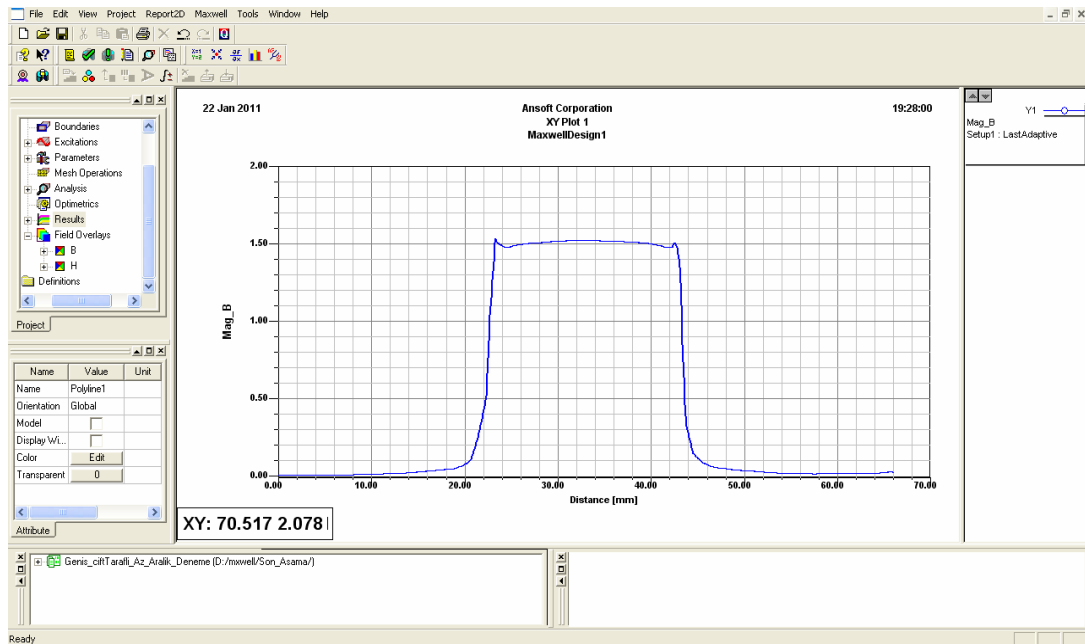
Şekil 5.1. Ansoft Maxwell 3D programının ara yüzü



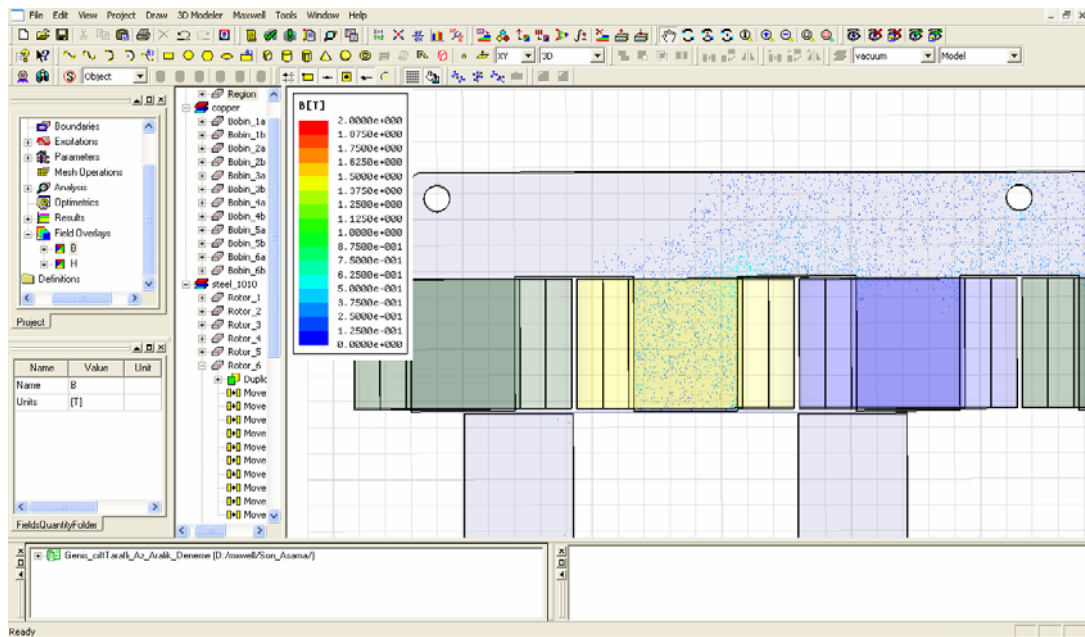
Şekil 5.2. Manyetik akı yoğunluğunun 3 boyutlu olarak benzetimi



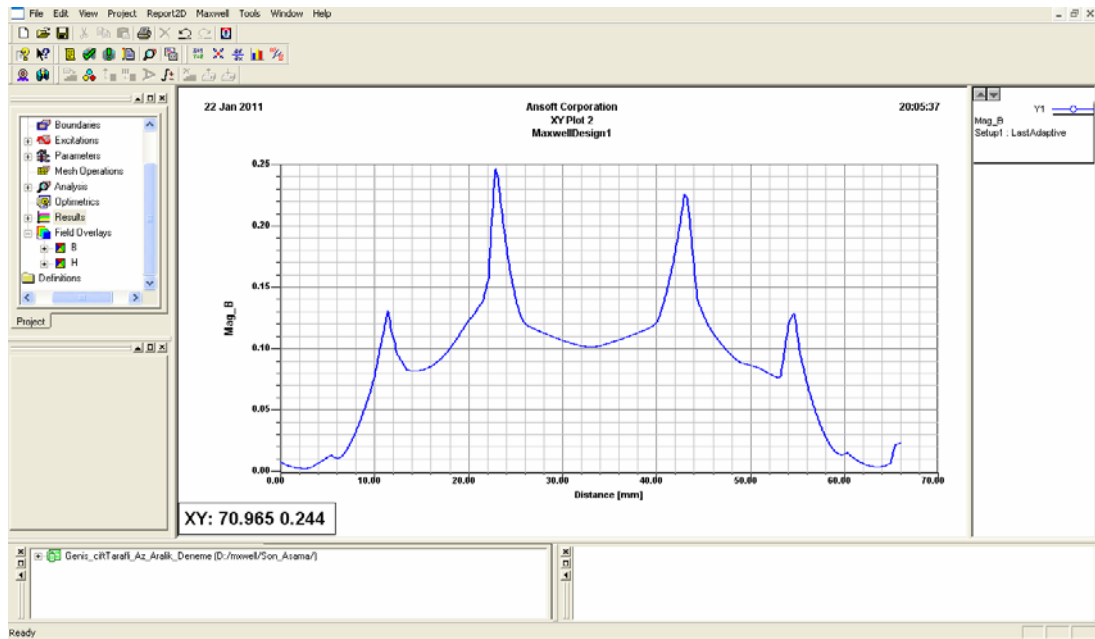
Şekil 5.3. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun bulunması (Çakışık)



Şekil 5.4. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu (Çakışık durumda)



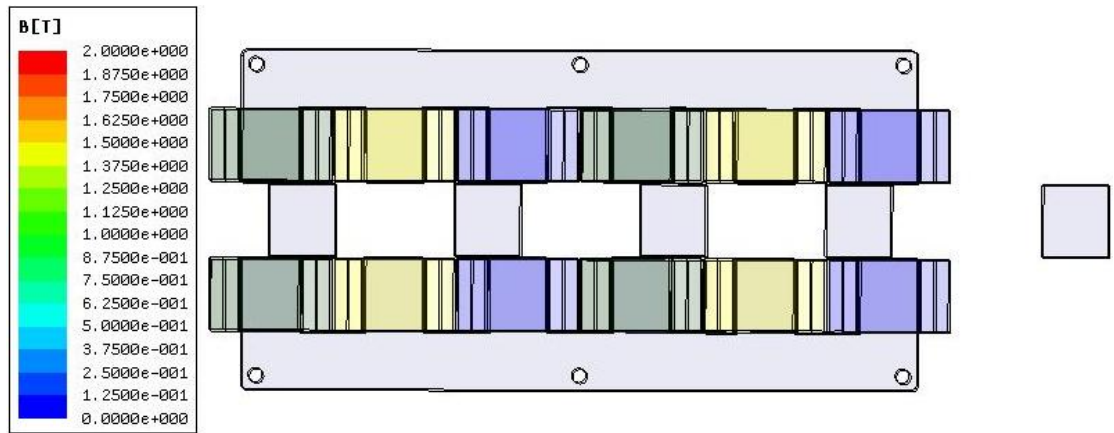
Şekil 5.5. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun bulunması (Ayrık)



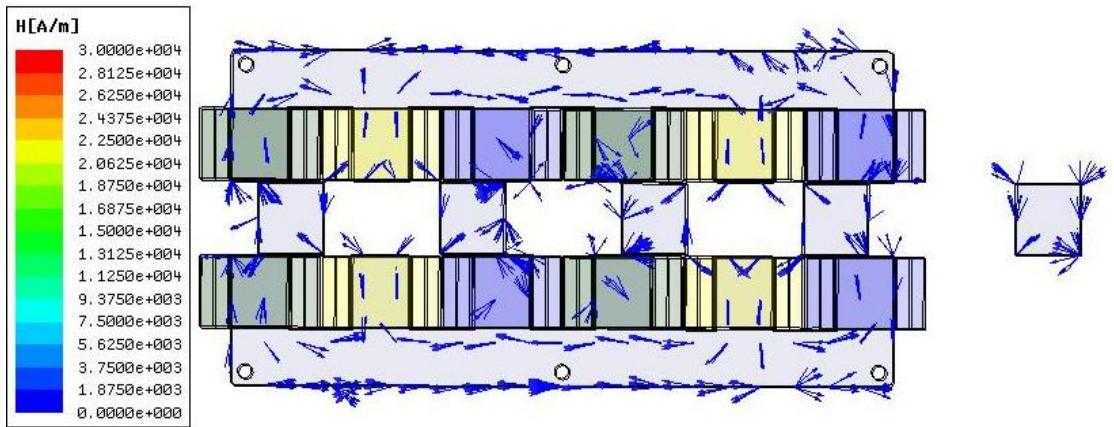
Şekil 5.6. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu (Ayrık durumda)

5.1. Sargı Akımı 1 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları

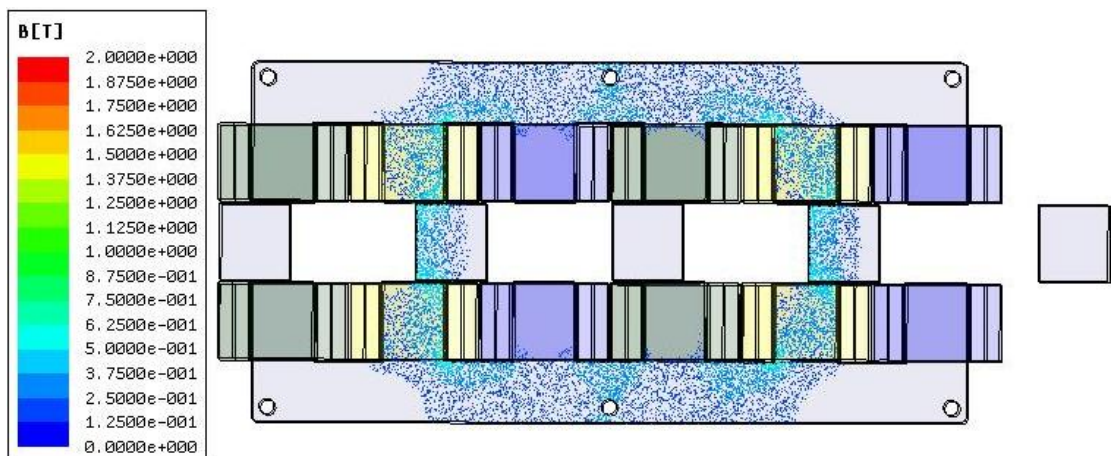
Motorun manyetik analizindeki değişkenler, statorun konumu ve sargı akımlarıdır. Kullanılan Ansoft Maxwell 3D yazılımı ile stator konumuna bağlı olarak motorun sonlu elemanlar yüzeyini oluşturmakta ve ardından faz endüktansları, çekme kuvveti, manyetik akı ve akı yoğunluğu gibi temel çıkış parametrelerini hesaplamaktadır. LARM'nin bir faz sargısına 1 amper akım verilerek, ayrık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti sunulmuştur.



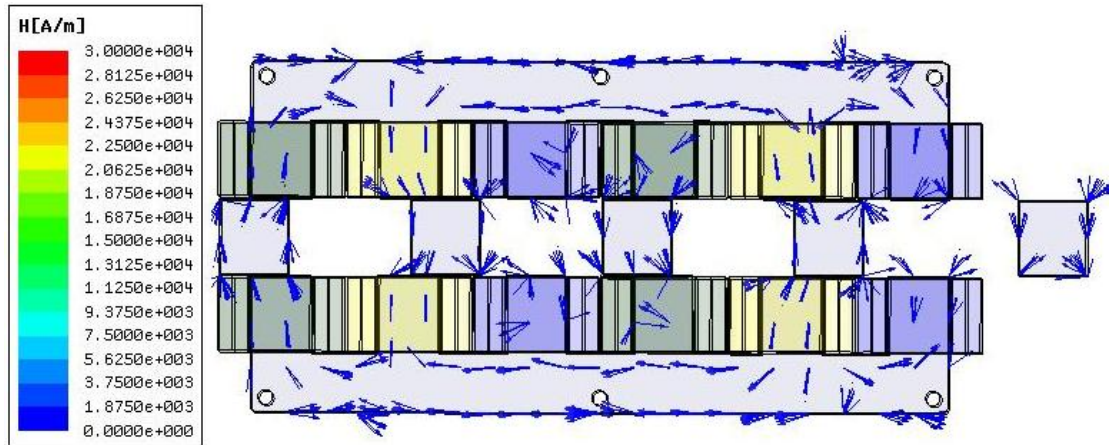
Şekil 5.7. Ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (1A)



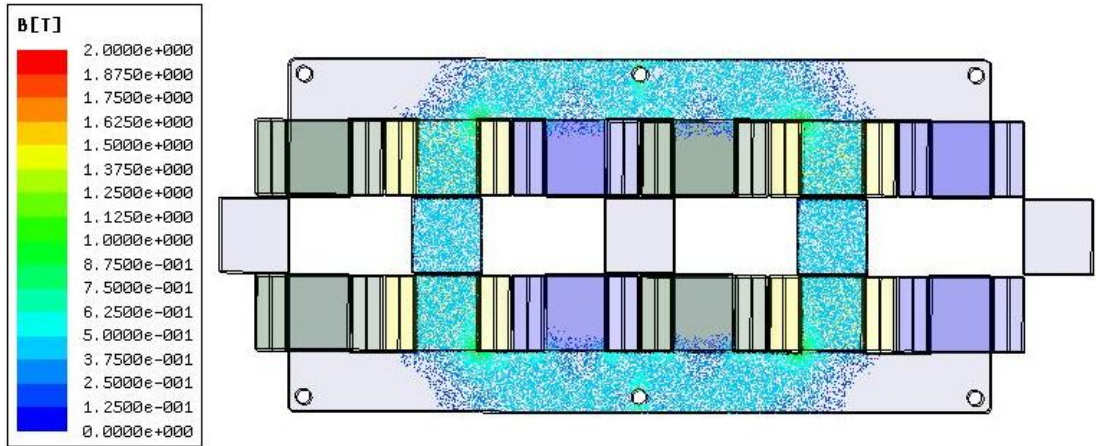
Şekil 5.8. Ayırık durumdaki manyetik alan şiddeti (1A)



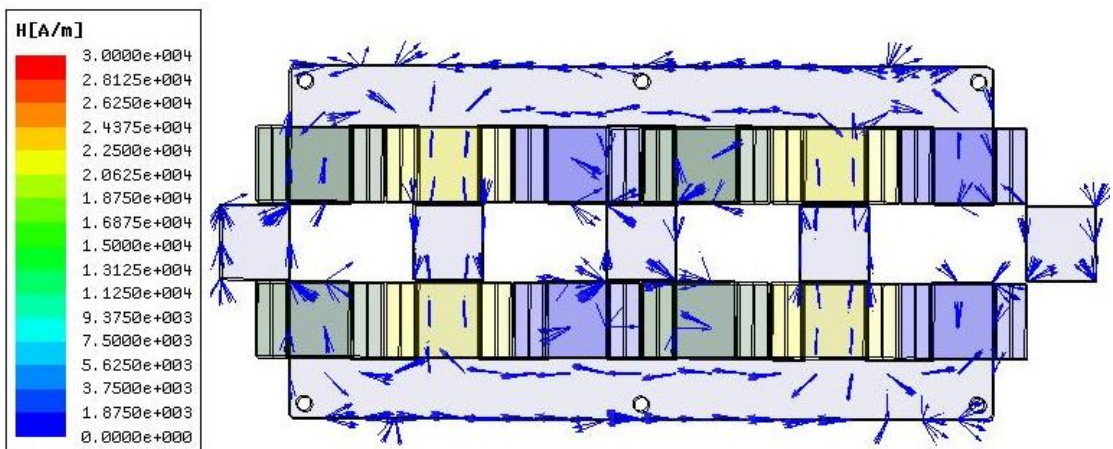
Şekil 5.9. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (1A)



Şekil 5.10. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik alan şiddeti (1A)



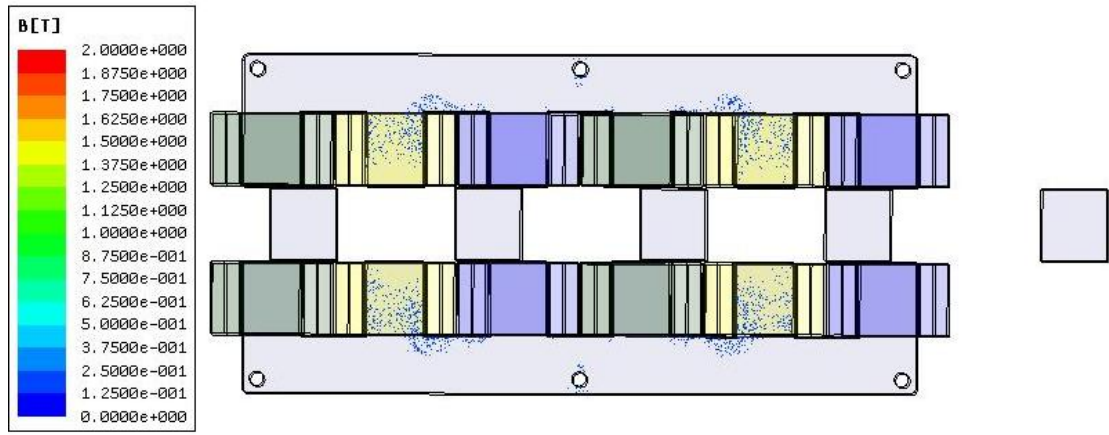
Şekil 5.11. Çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (1A)



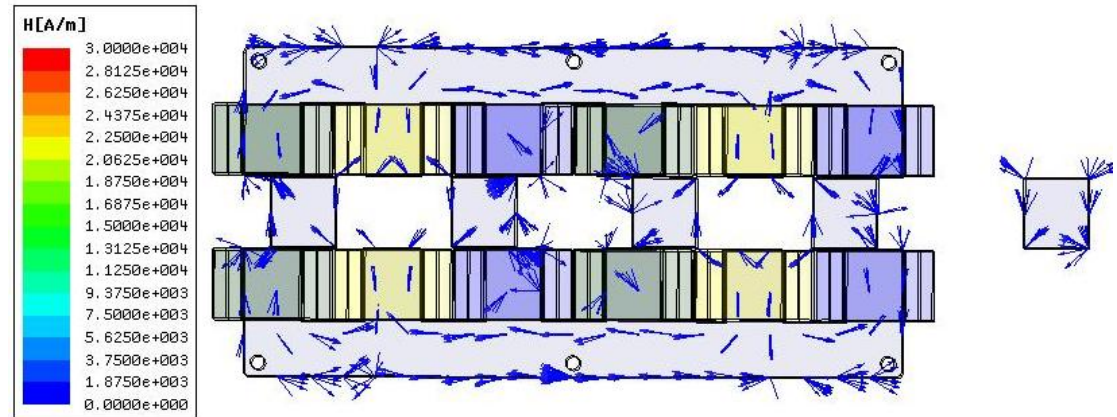
Şekil 5.12. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (1A)

5.2. Sargı Akımı 2 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları

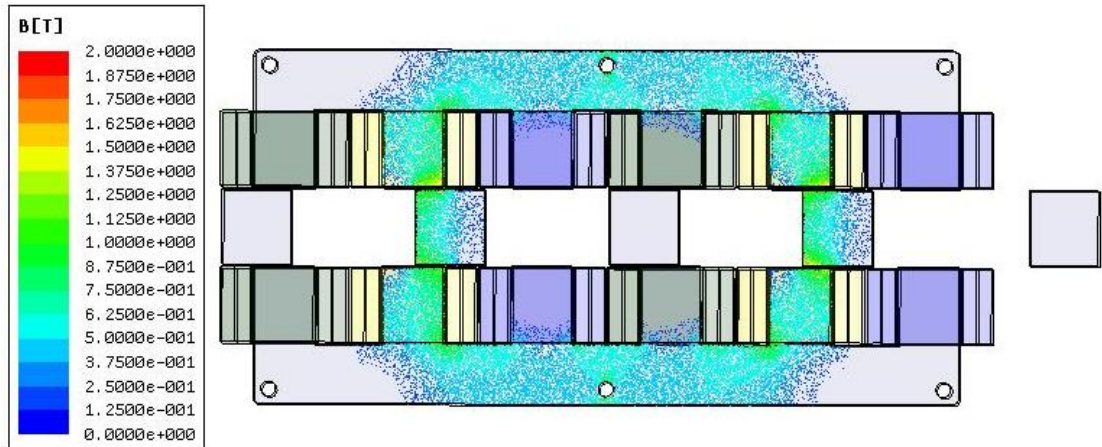
LARM'nin bir faz sargısına 2 amper akım verilerek, ayrık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti sunulmuştur.



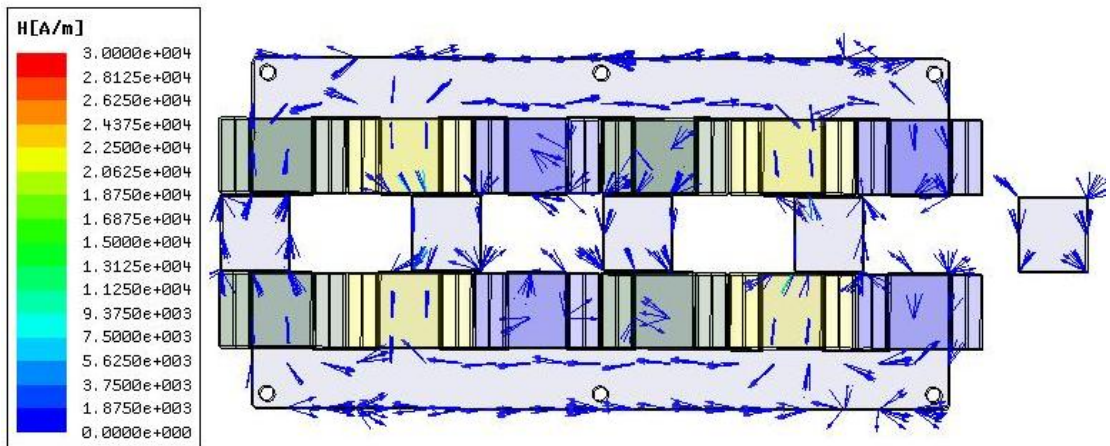
Şekil 5.13. Ayrık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (2A)



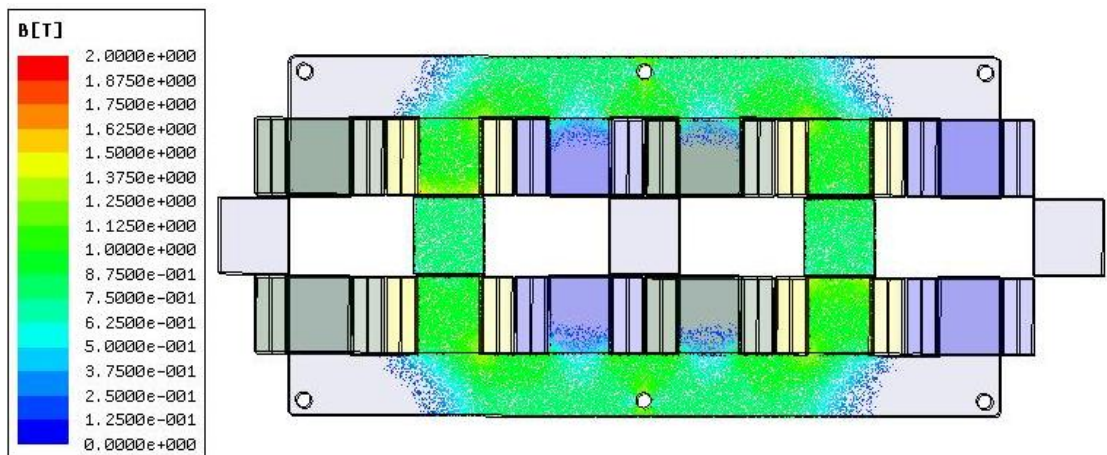
Şekil 5.14. Ayrık durumdaki manyetik alan şiddeti (2A)



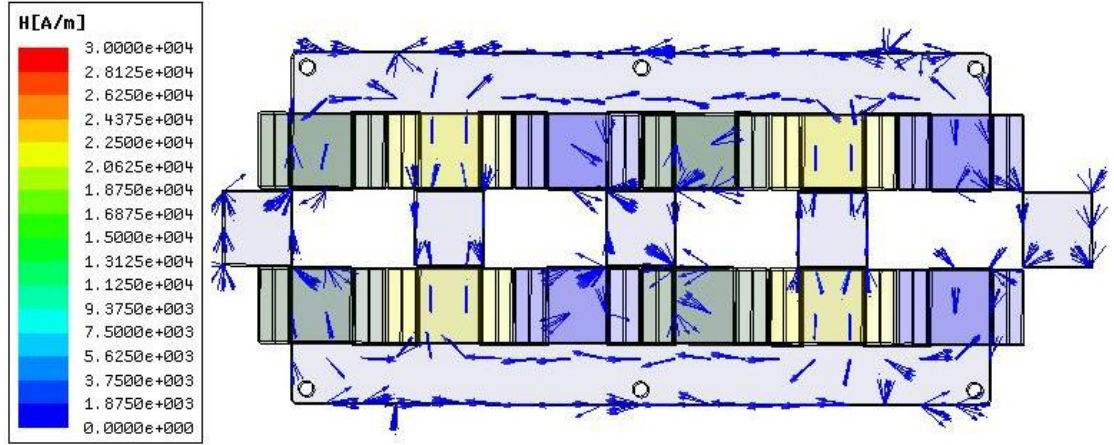
Şekil 5.15. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (2A)



Şekil 5.16. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik alan şiddeti (2A)



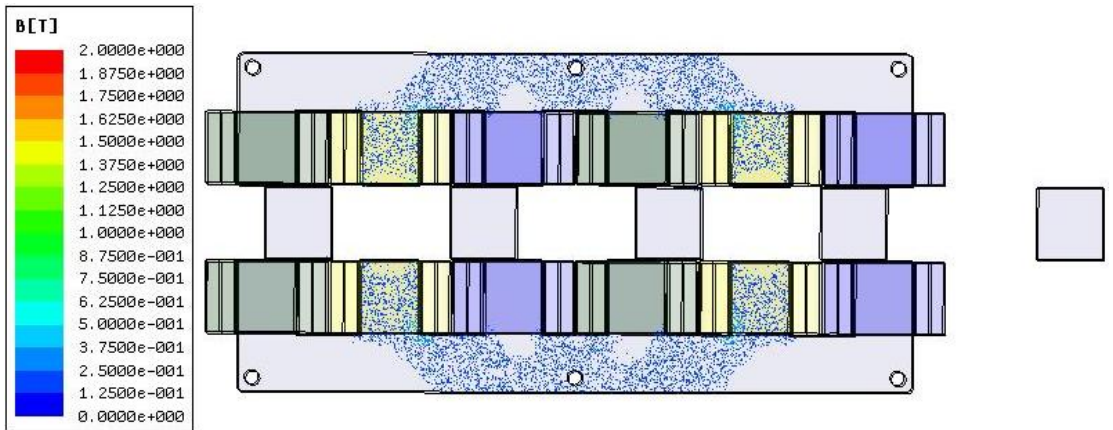
Şekil 5.17. Çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (2A)



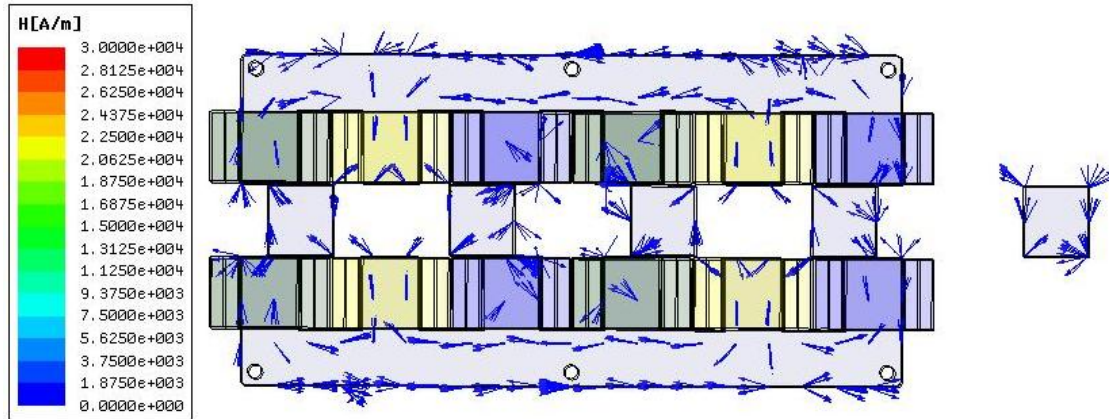
Şekil 5.18. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (2A)

5.3. Sargı Akımı 3 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları

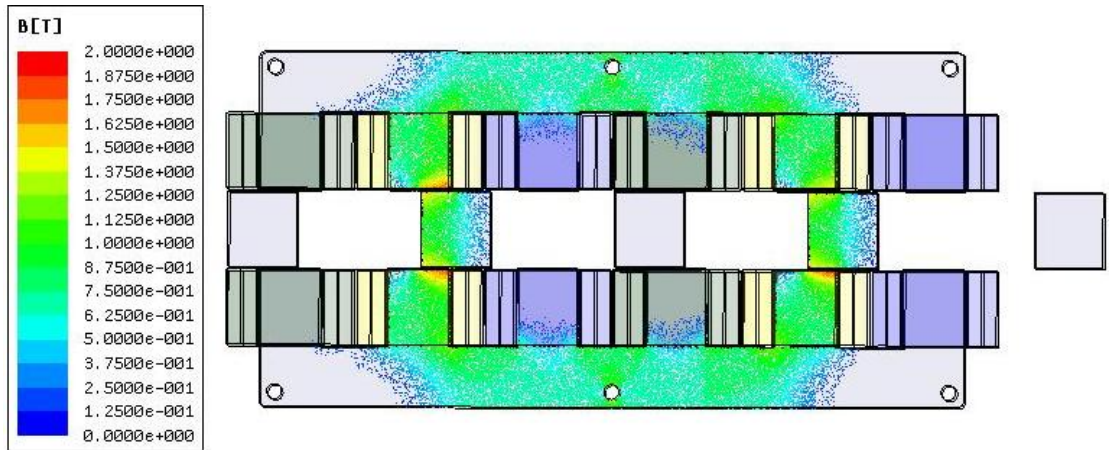
LARM'nin bir faz sargısına 3 amper akım verilerek, ayrık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti sunulmuştur.



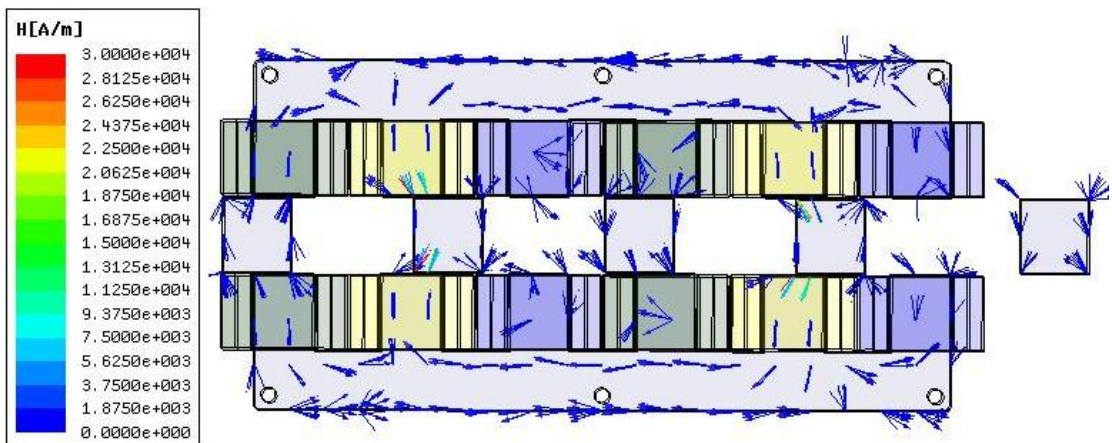
Şekil 5.19. Ayrık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (3A)



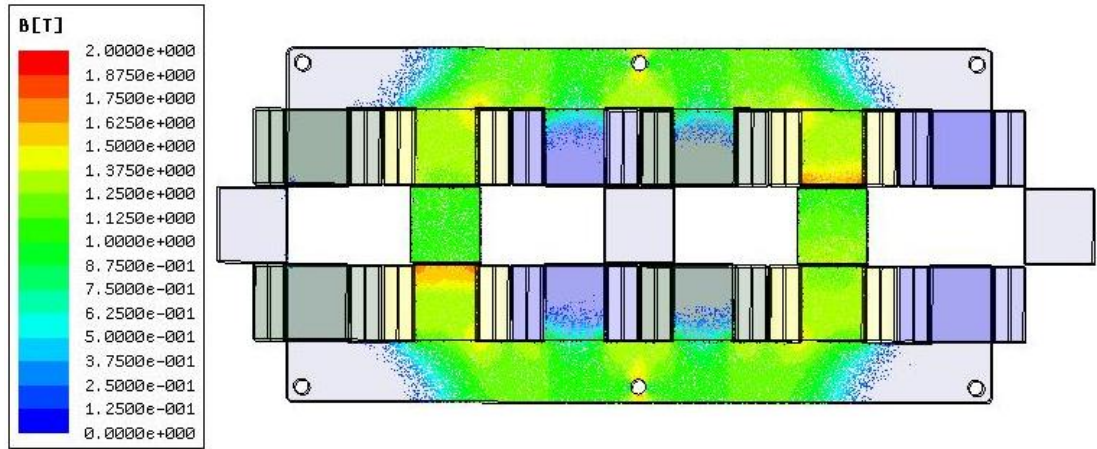
Şekil 5.20. Ayırık durumdaki manyetik alan şiddeti (3A)



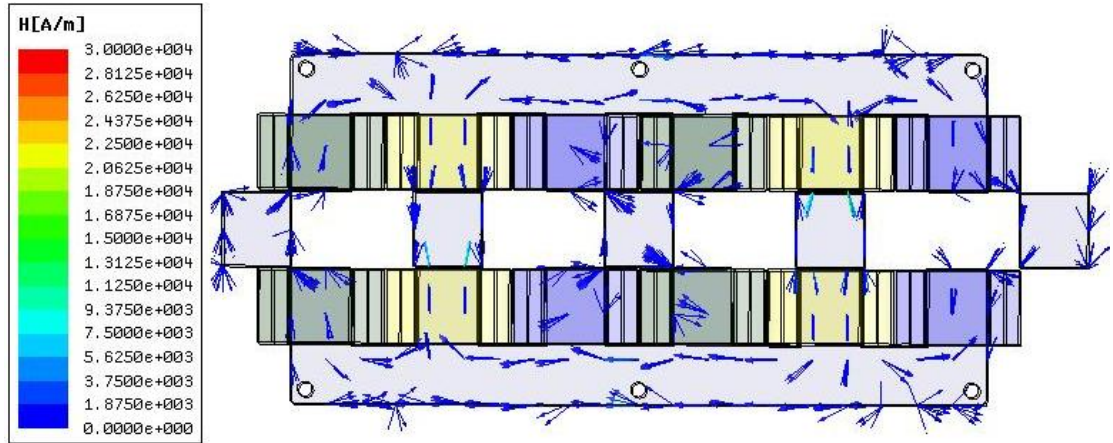
Şekil 5.21. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (3A)



Şekil 5.22. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik alan şiddeti (3A)



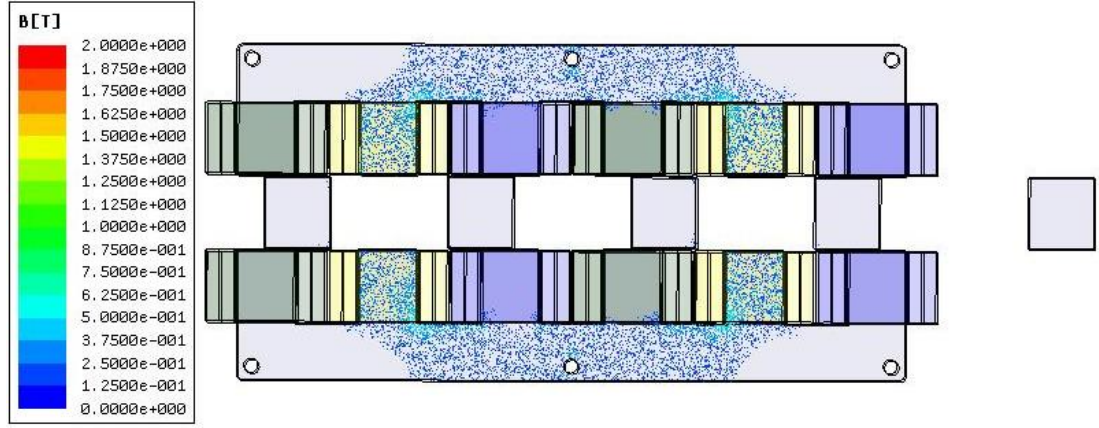
Şekil 5.23. Çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (3A)



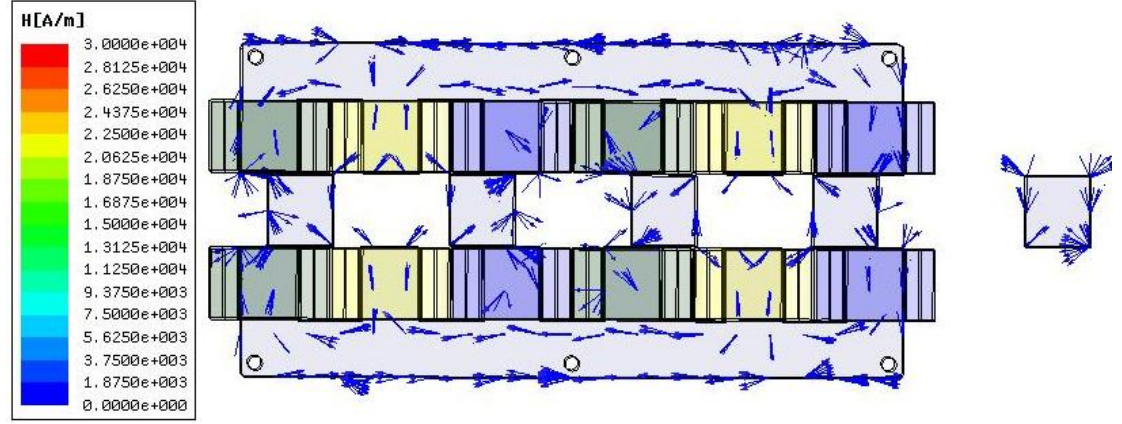
Şekil 5.24. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (3A)

5.4. Sargı Akımı 4 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları

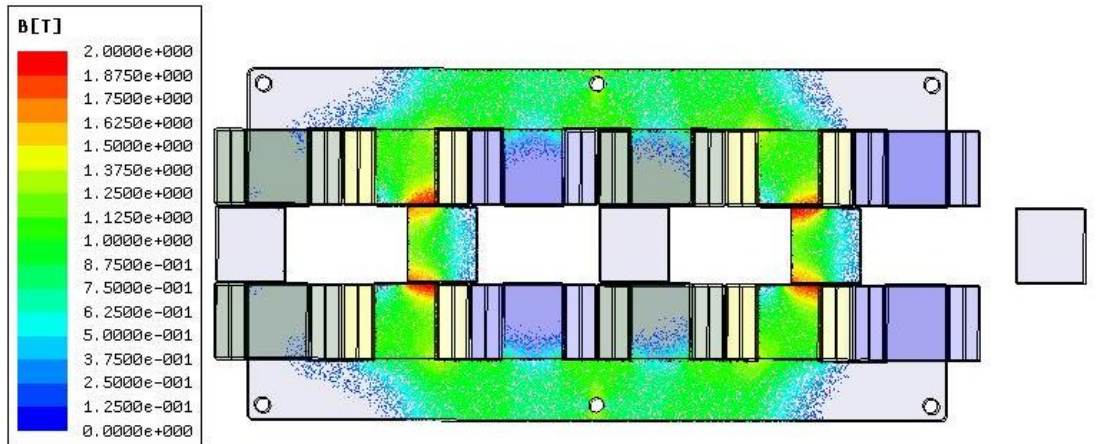
LARM'nin bir faz sargısına 4 amper akım verilerek, ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti sunulmuştur.



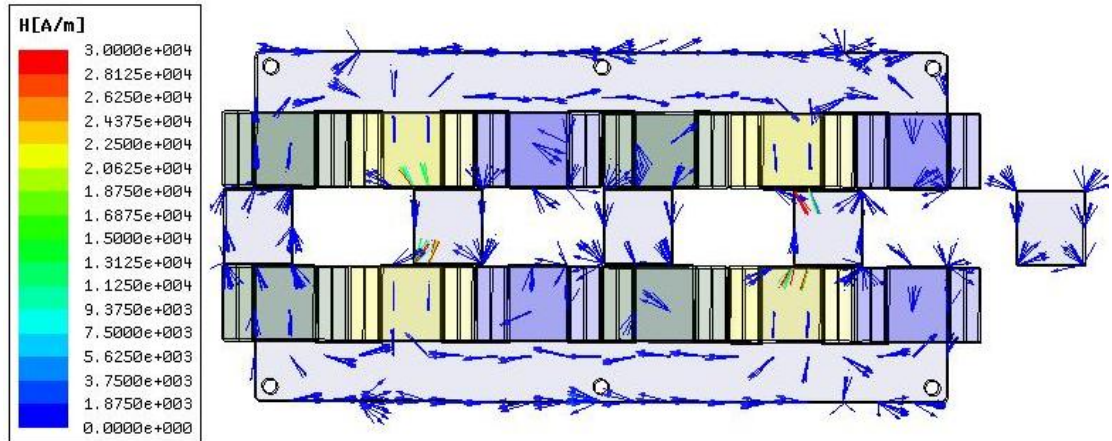
Şekil 5.25. Ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (4A)



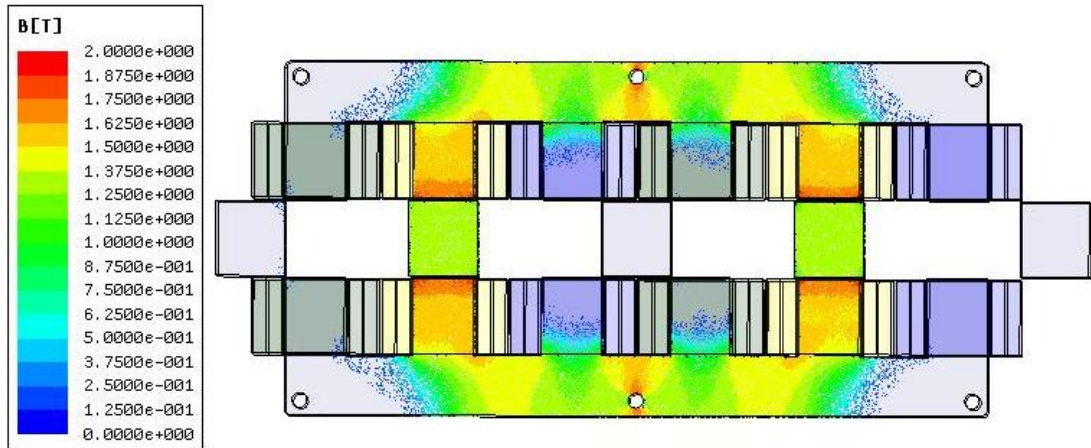
Şekil 5.26. Ayırık durumdaki manyetik alan şiddeti (4A)



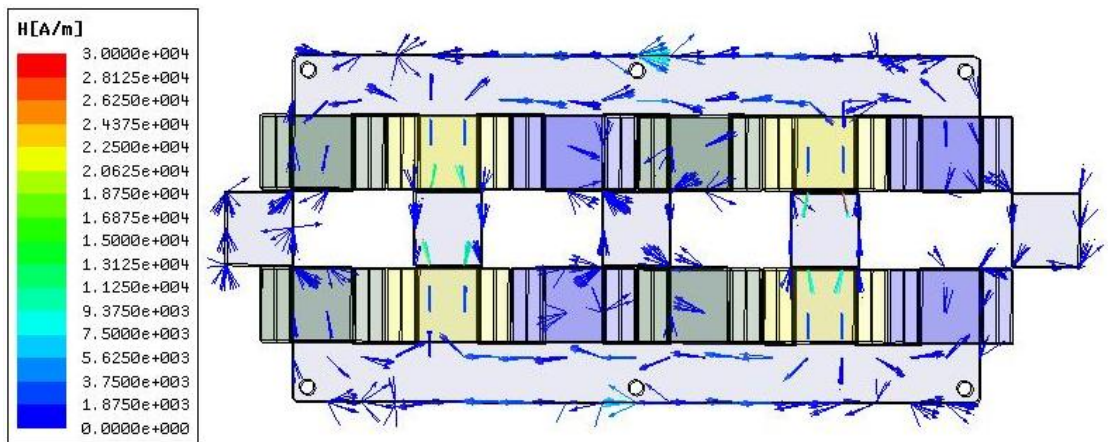
Şekil 5.27. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (4A)



Şekil 5.28. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik alan şiddeti (4A)



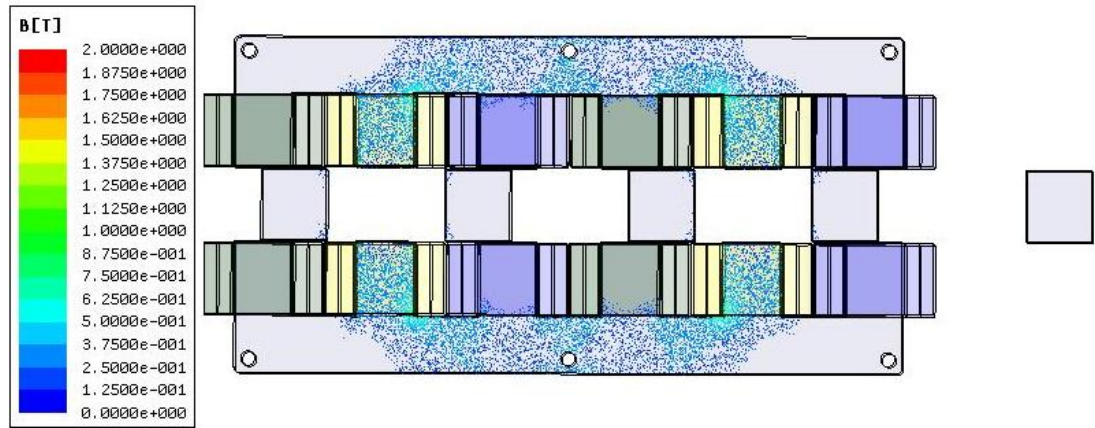
Şekil 5.29. Çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (4A)



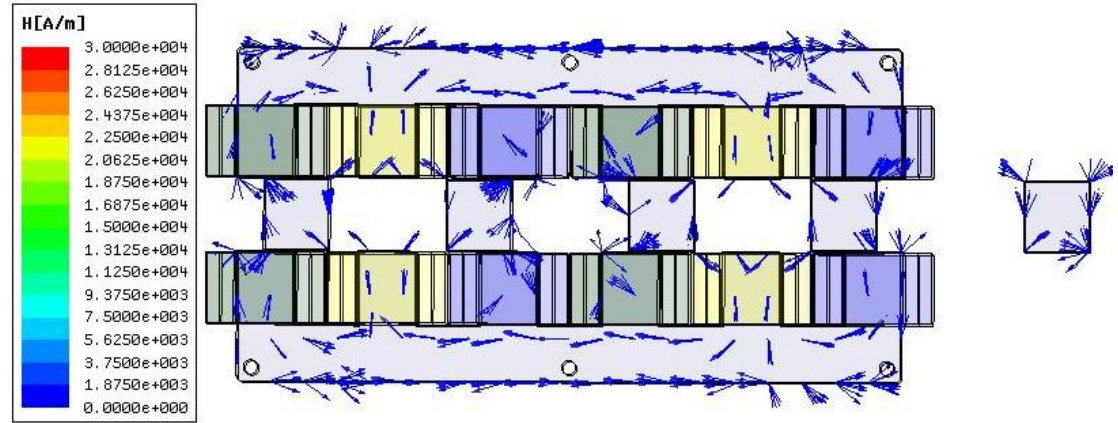
Şekil 5.30. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (4A)

5.5. Sargı Akımı 5 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları

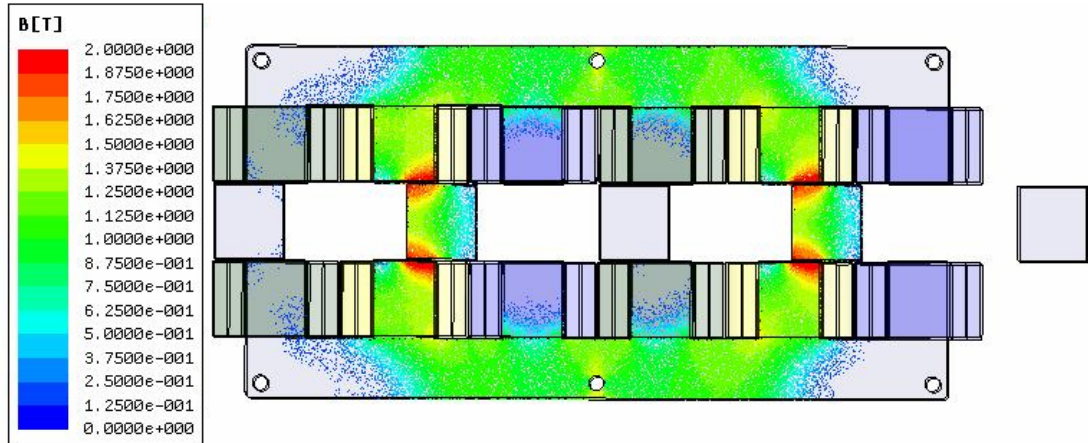
LARM'nin bir faz sargısına 5 amper akım verilerek, ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti sunulmuştur.



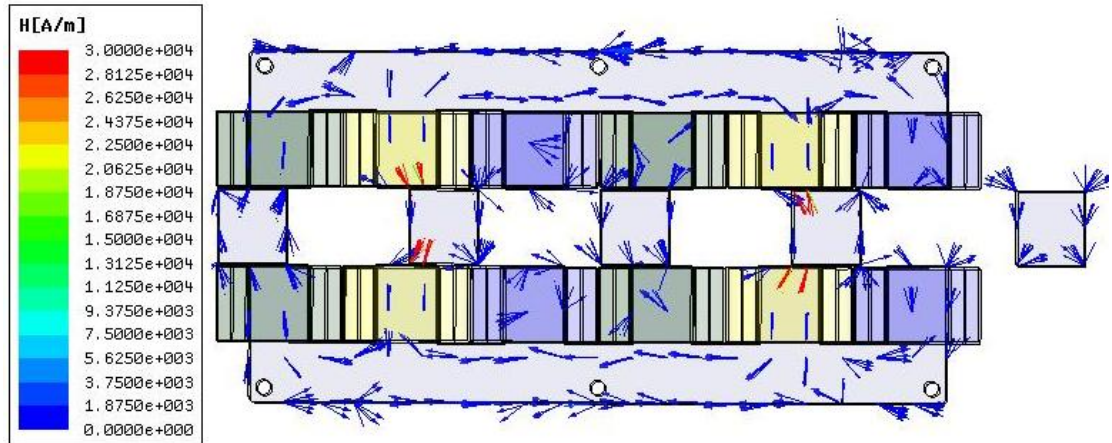
Şekil 5.31. Ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (5A)



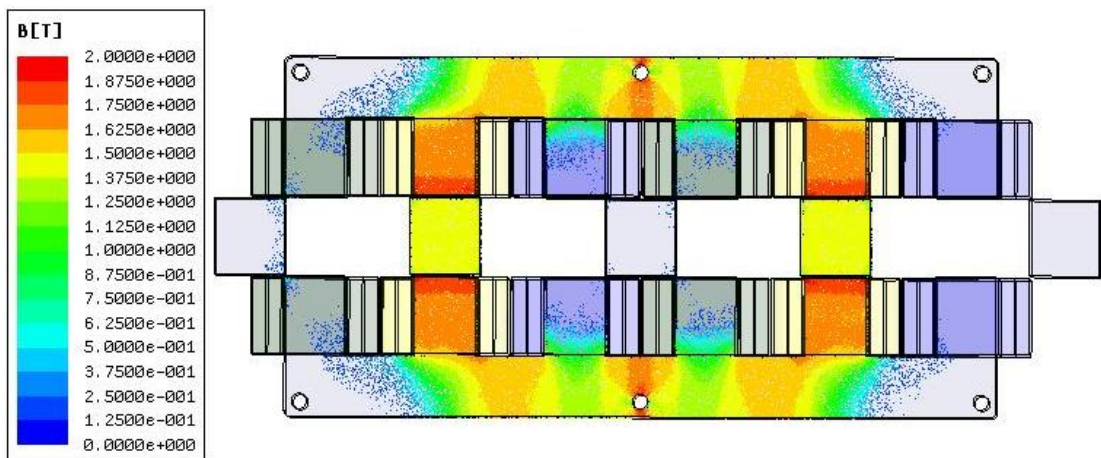
Şekil 5.32. Ayırık durumdaki manyetik alan şiddeti (5A)



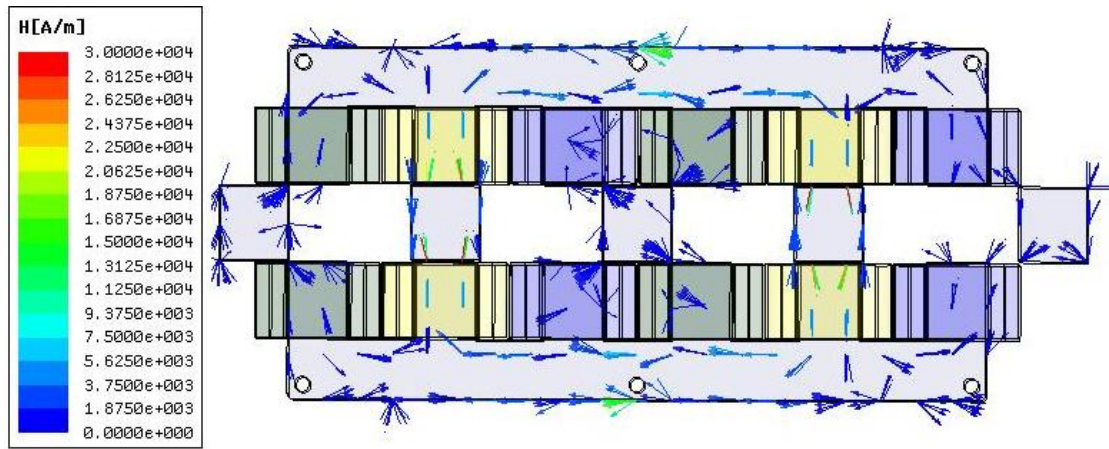
Şekil 5.33. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (5A)



Şekil 5.34. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik alan şiddeti (5A)



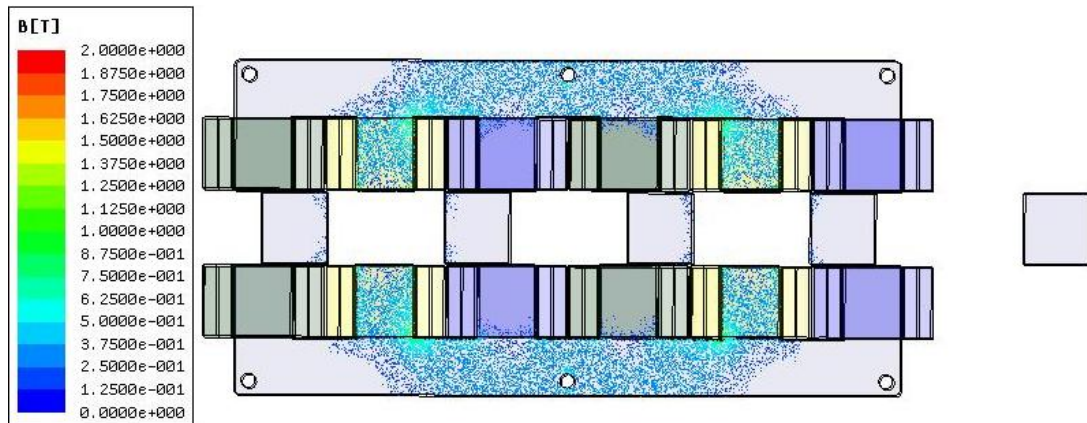
Şekil 5.35. Çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (5A)



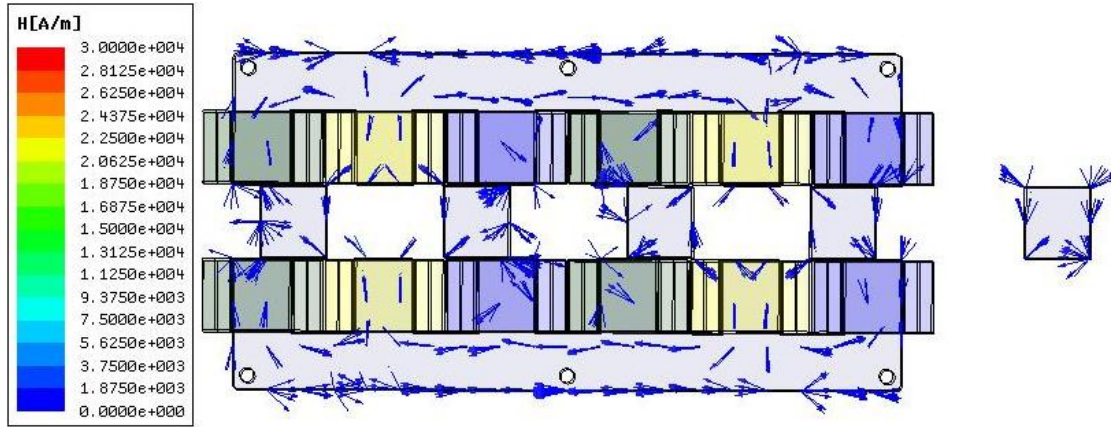
Şekil 5.36. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (5A)

5.6. Sargı Akımı 6 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları

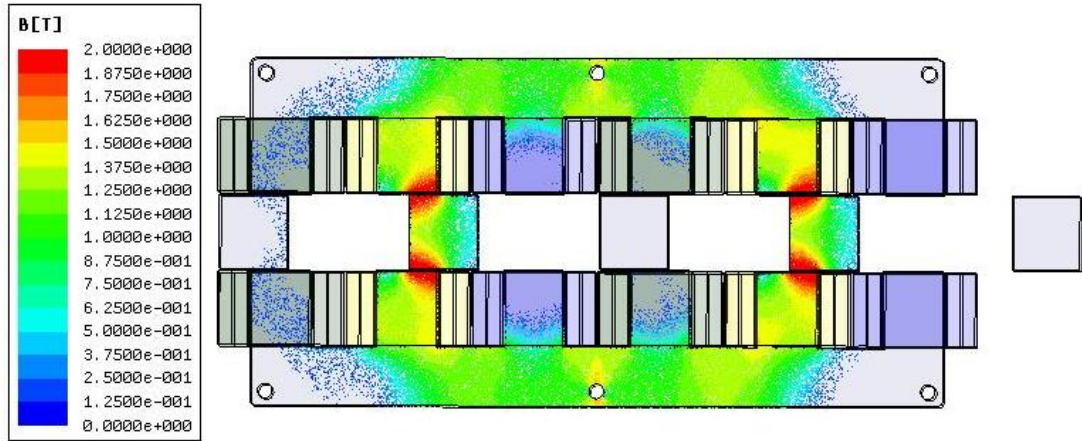
LARM'nin bir faz sargısına 6 amper akım verilerek, ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti sunulmuştur.



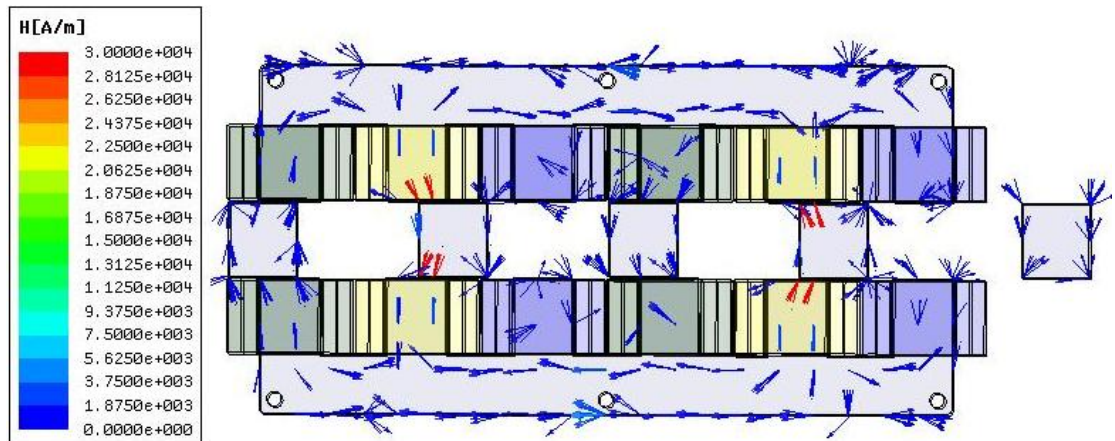
Şekil 5.37. Ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (6A)



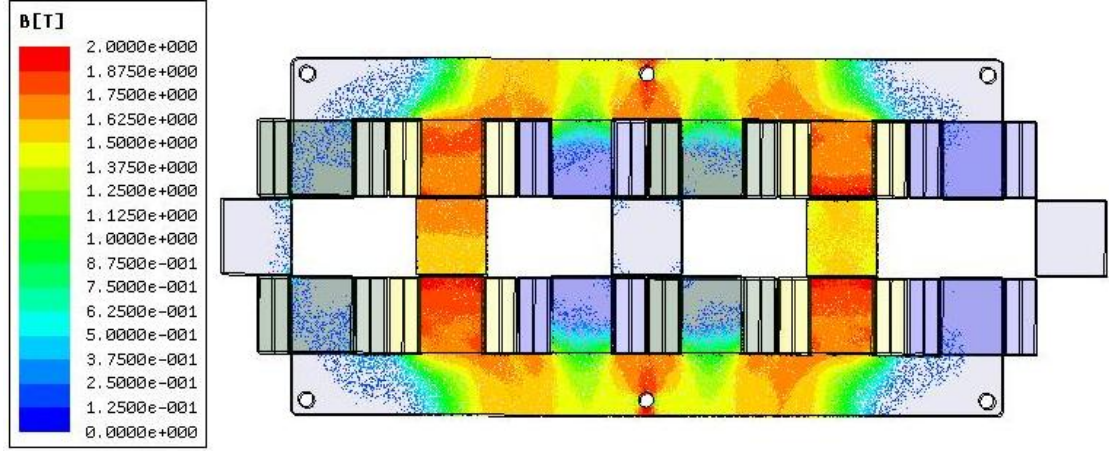
Şekil 5.38. Ayırık durumdaki manyetik alan şiddeti (6A)



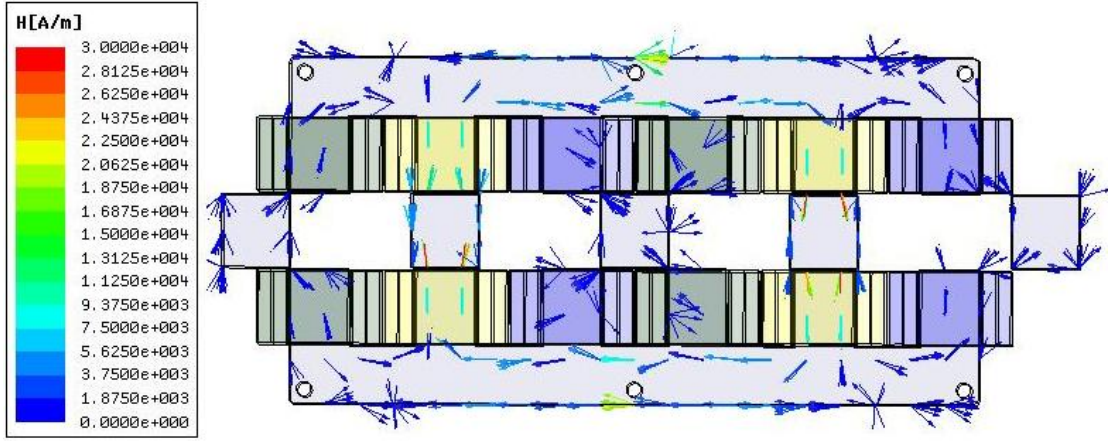
Şekil 5.39. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (6A)



Şekil 5.40. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik alan şiddeti (6A)



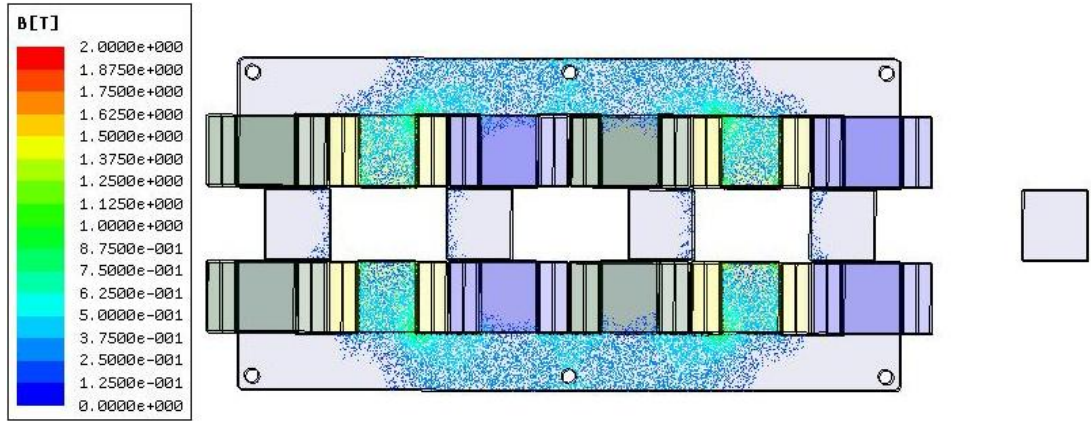
Şekil 5.41. Çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (6A)



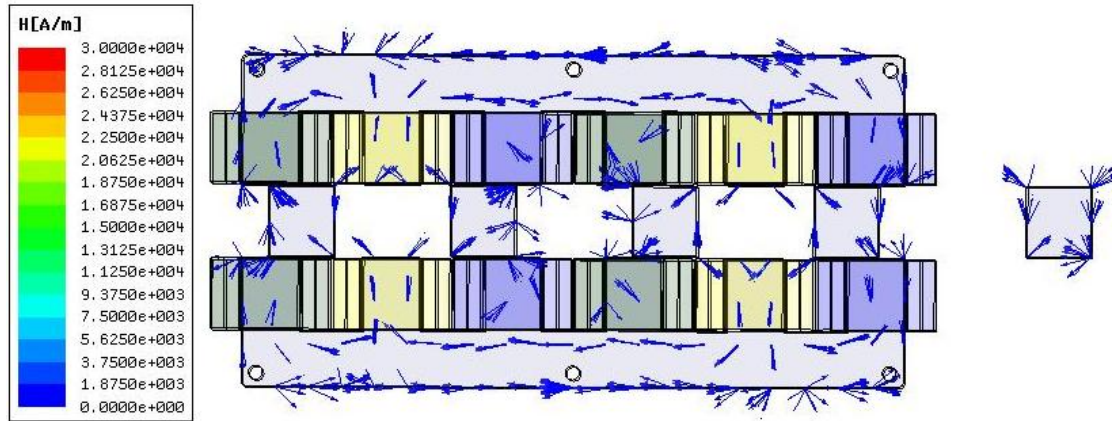
Şekil 5.42. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (6A)

5.7. Sargı Akımı 7 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları

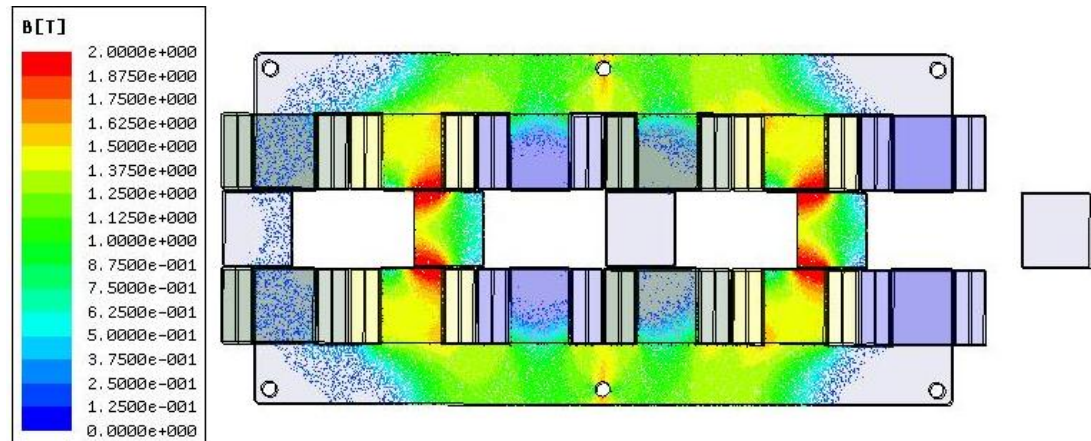
LARM'nin bir faz sargısına 7 amper akım verilerek, ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti sunulmuştur.



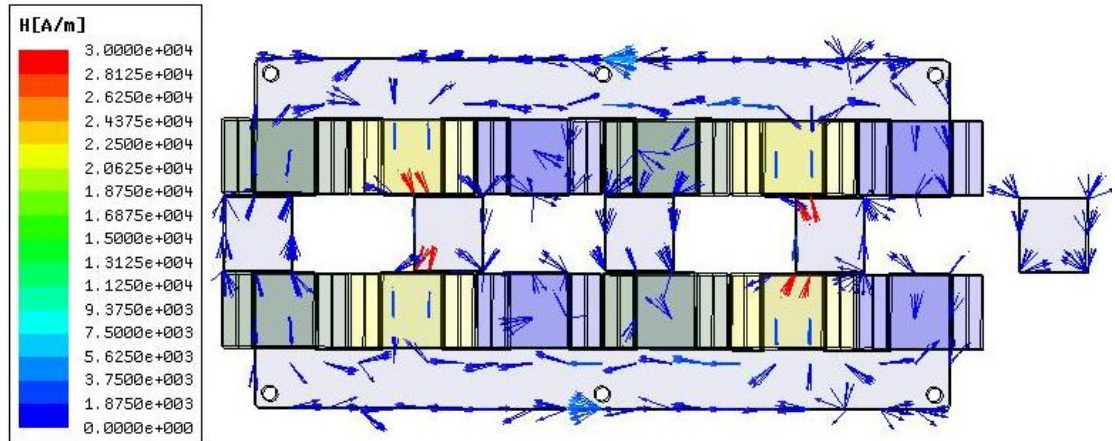
Şekil 5.43. Ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (7A)



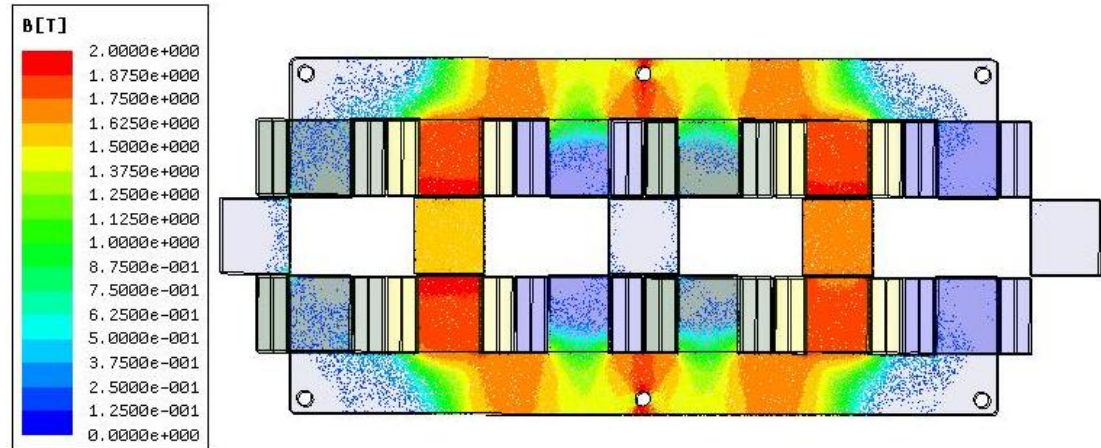
Şekil 5.44. Ayırık durumdaki manyetik alan şiddeti (7A)



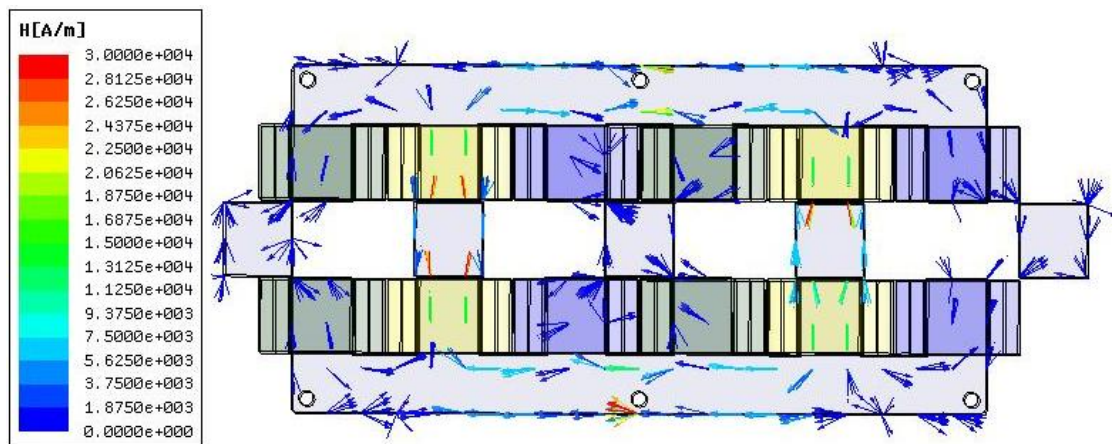
Şekil 5.45. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (7A)



Şekil 5.46. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik alan şiddeti (7A)



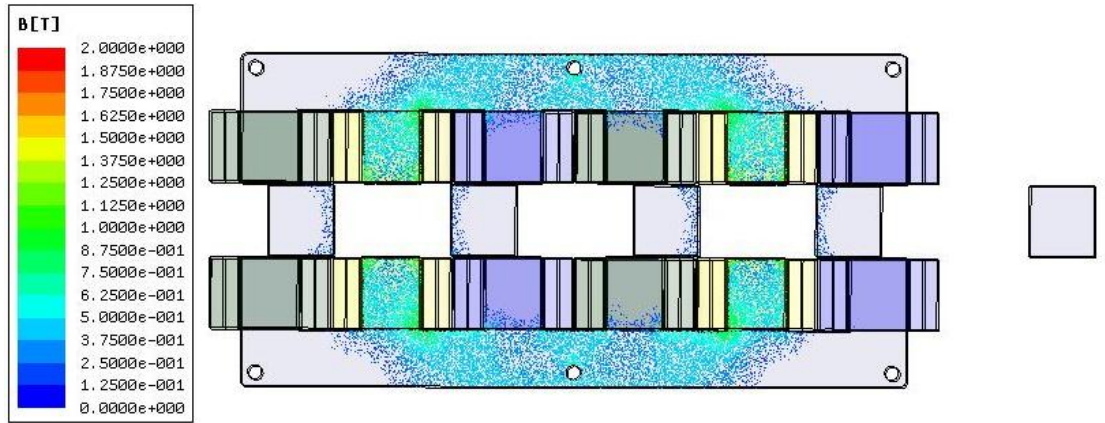
Şekil 5.47. Çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (7A)



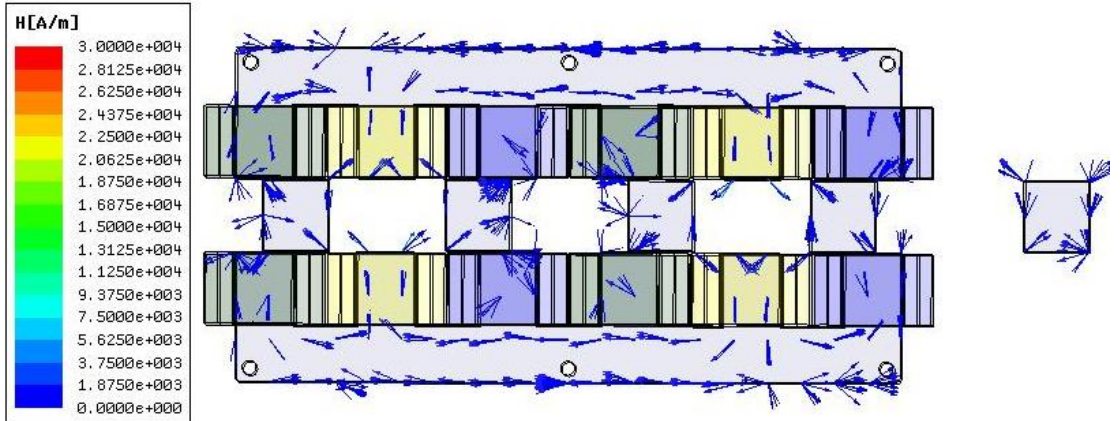
Şekil 5.48. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (7A)

5.8. Sargı Akımı 8 Amper İçin Benzetim ve Deney Sonuçları

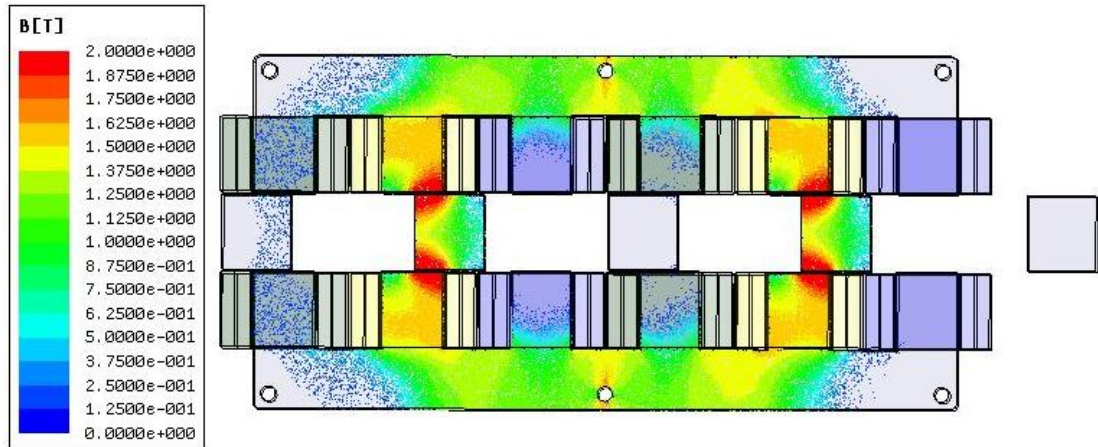
LARM'nin bir faz sargısına 8 amper akım verilerek, ayrık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti, çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti sunulmuştur.



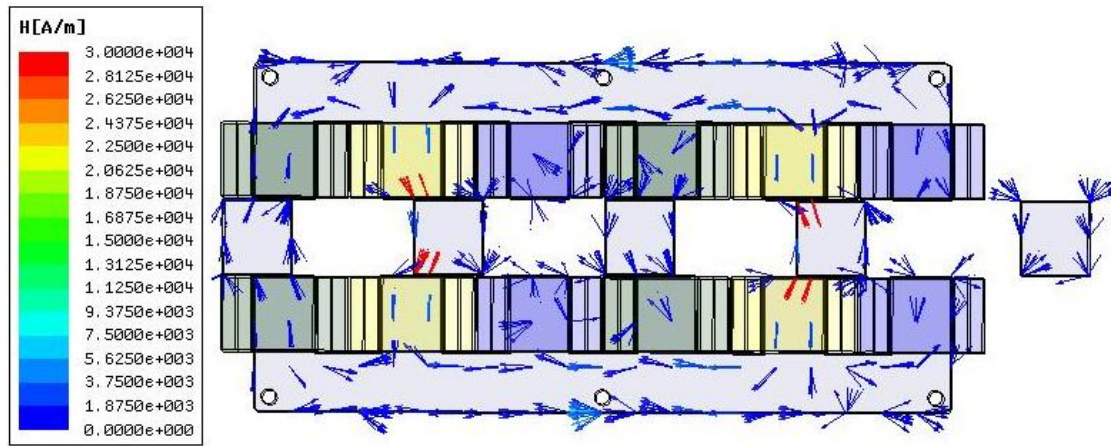
Şekil 5.49. Ayrık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (8A)



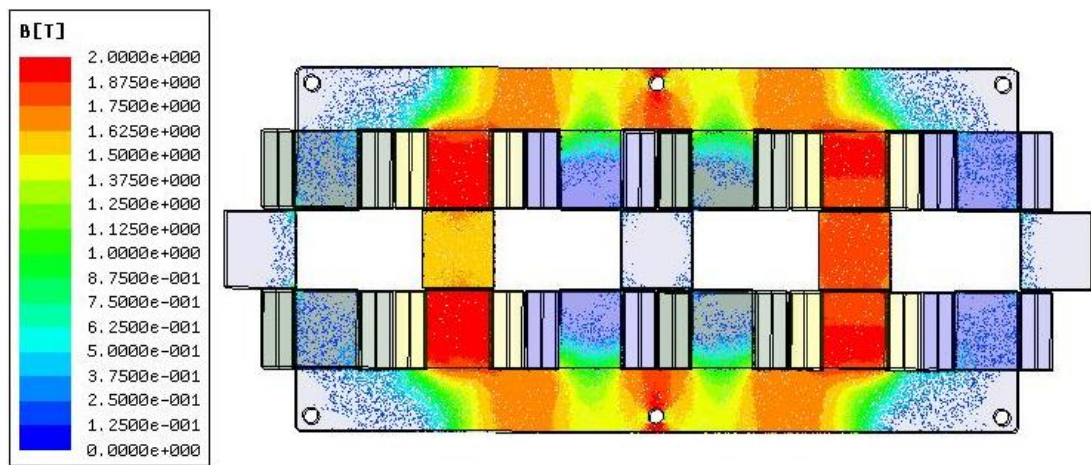
Şekil 5.50. Ayrık durumdaki manyetik alan şiddeti (8A)



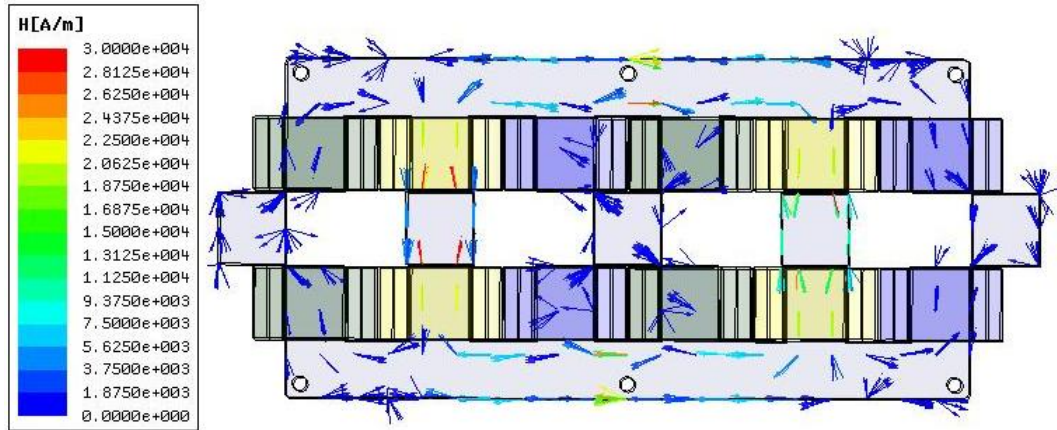
Şekil 5.51. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik akı yoğunluğu (8A)



Şekil 5.52. Çakışık duruma geçerken oluşan manyetik alan şiddeti (8A)



Şekil 5.53. Çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu (8A)



Şekil 5.54. Çakışık durumdaki manyetik alan şiddeti (8A)

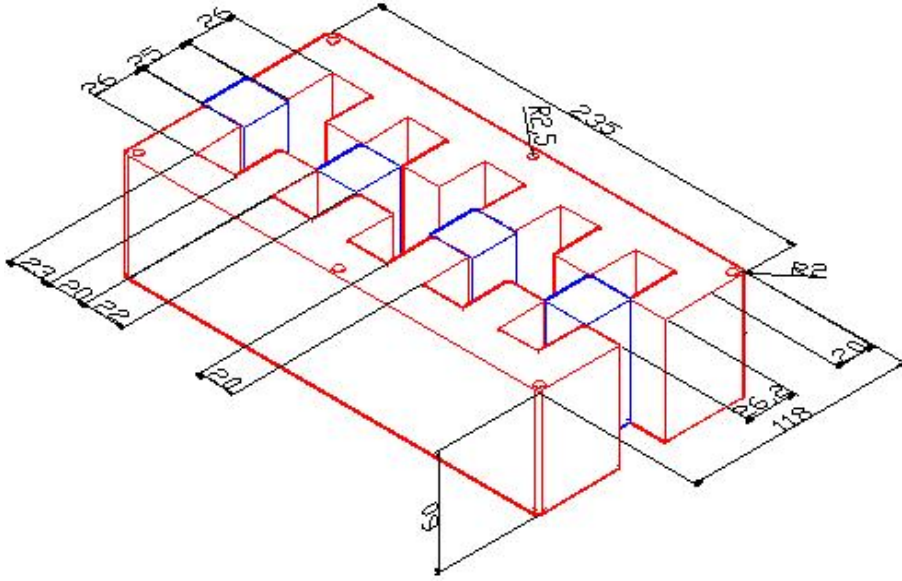
5.9. Farklı Kutup Başına Sahip LARM Analizleri

5.9.1. LARM-A modelinin incelenmesi

LARM-A modelinin tasarıma uygun olarak mekanik ve elektriksel parametreleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Bu parametreler doğrultusunda Şekil 5.55’ te görüldüğü gibi motor 3 boyutlu olarak bilgisayar ortamında görselleştirilmiştir. Bu modelde stator genişliği 22 mm ye düşürülmüştür.

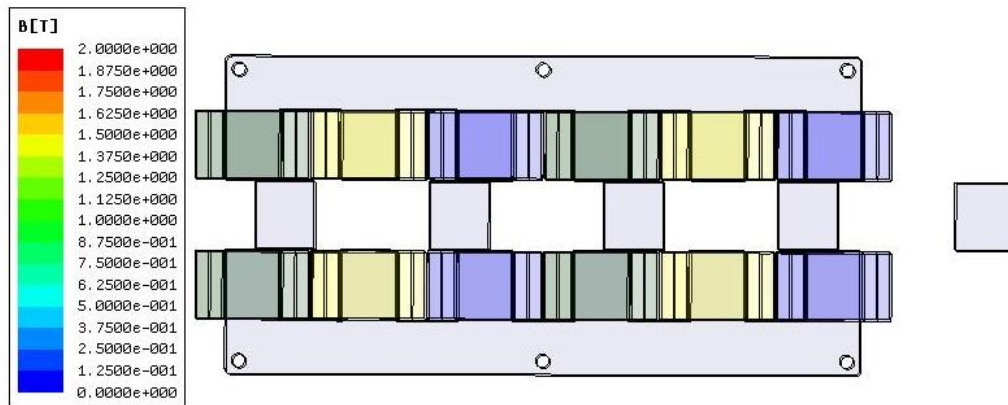
Çizelge 5.1. LARM-A modeline ait mekanik ve elektriksel parametreler

Faz Sayısı	3
Translator Kutbu Genişliği	20 mm
Translator Kutbu Aralığı	23 mm
Translator Kutup Yüksekliği	26 mm
Translator Derinliği	60 mm
Stator Kutup Genişliği	22 mm
Stator Derinliği	60 mm
Toplam Uzunluk	235 mm
Toplam Genişlik	118 mm
Hava Aralığı	0.6 mm
Çelik tipi	Steel 1010



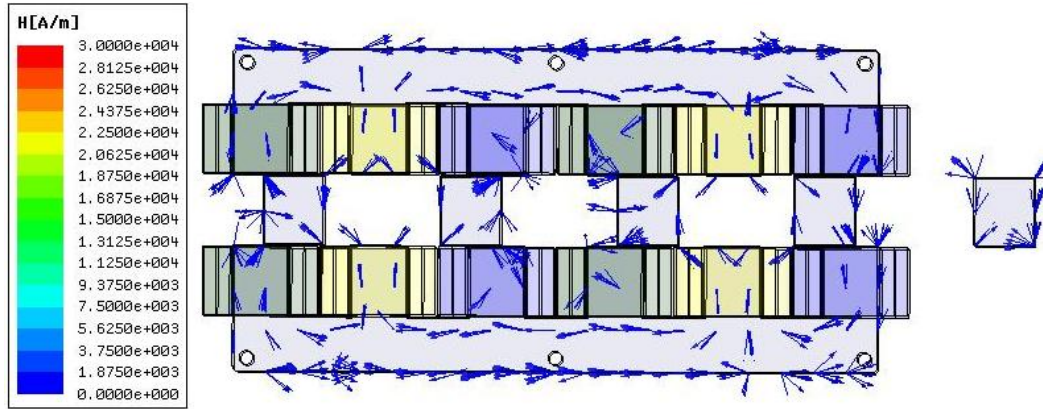
Şekil 5.55. LARM-A modelinin 3 boyutlu olarak görselleştirimi

Motorun manyetik analizindeki değişkenler, statorun konumu ve sargı akımlarıdır. Kullanılan Ansoft Maxwell 3D yazılımı ile stator konumuna bağlı olarak motorun sonlu elemanlar yüzeyini oluşturmakta ve ardından faz endüktansları, çekme kuvveti, manyetik akı ve akı yoğunluğu gibi temel çıkış parametrelerini hesaplamaktadır. Şekil 5.56 ve Şekil 5.57’de sırasıyla ayrık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, sargı akımı 1 amper için verilmektedir.



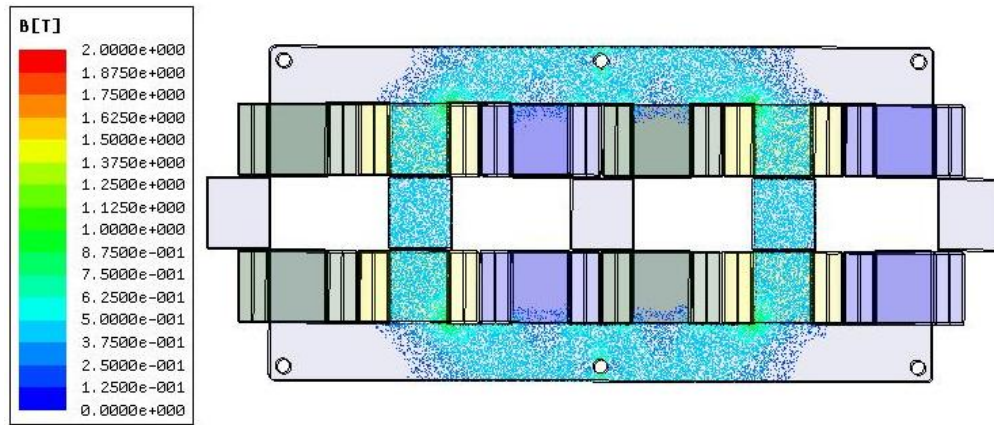
(a)

Şekil 5.56. LARM-A modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu

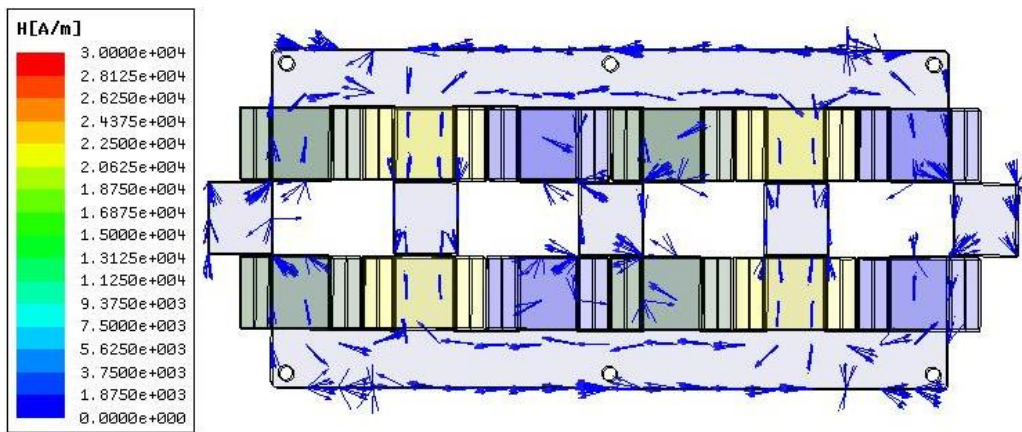


(b)

Şekil 5.56. LARM-A modelinin için, ayrık durumdaki (b) Manyetik alan şiddeti (1A)



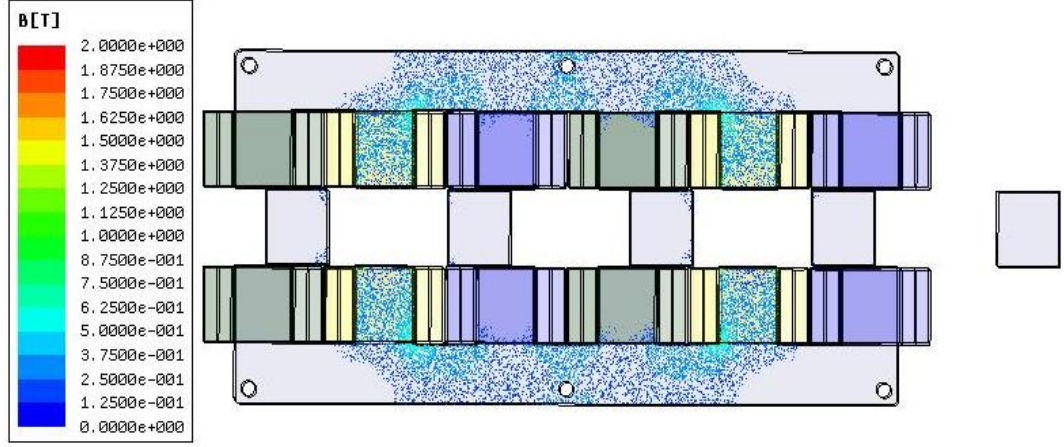
(a)



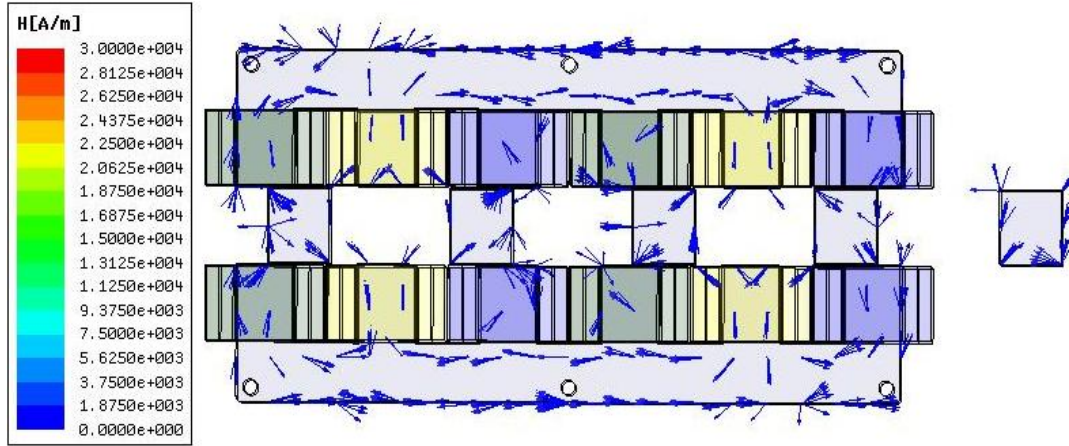
(b)

Şekil 5.57. LARM-A modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu
(b) Manyetik alan şiddeti (1A)

Şekil 5.58 ve Şekil 5.59’da sırasıyla ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, sargı akımı 5 amper için verilmektedir.

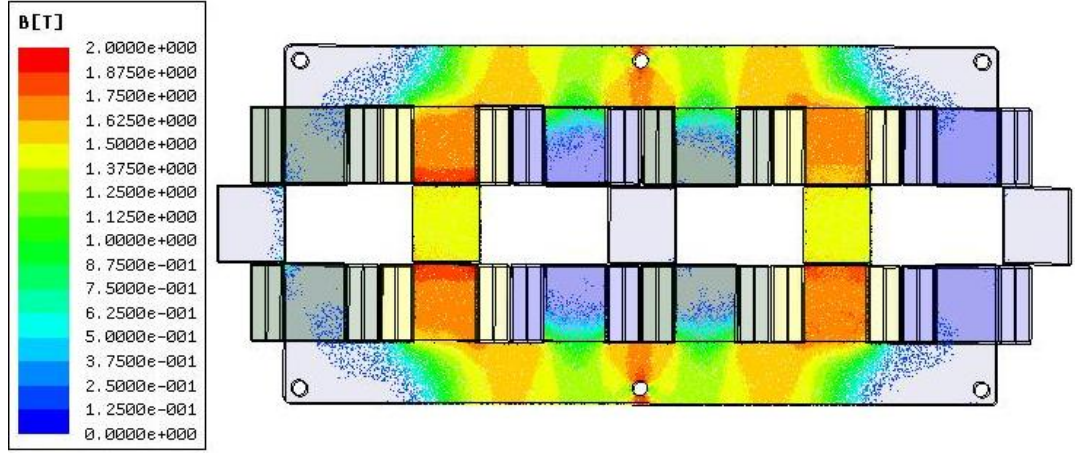


(a)

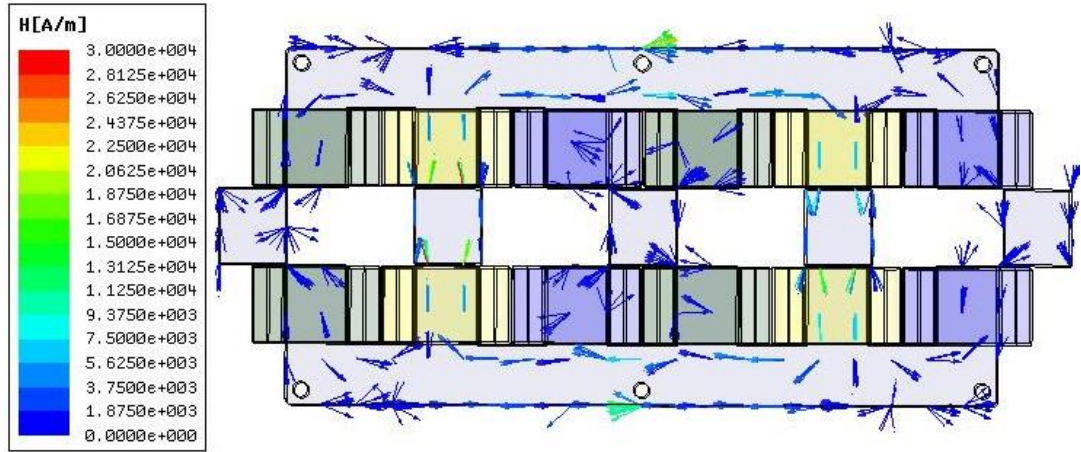


(b)

Şekil 5.58. LARM-A modelinin için, ayırık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (5A)



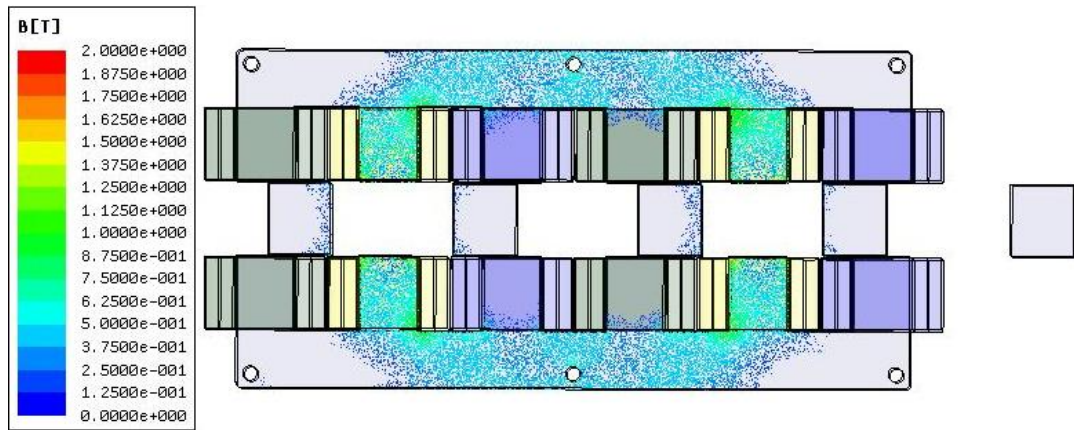
(a)



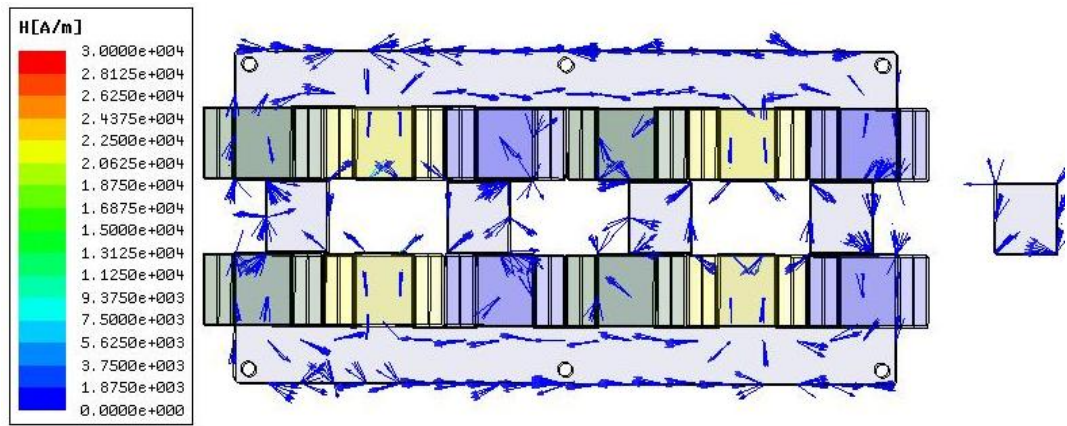
(b)

Şekil 5.59. LARM-A modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (5A)

Şekil 5.60 ve Şekil 5.61’de sırasıyla ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, sargı akımı 8 amper için verilmektedir.

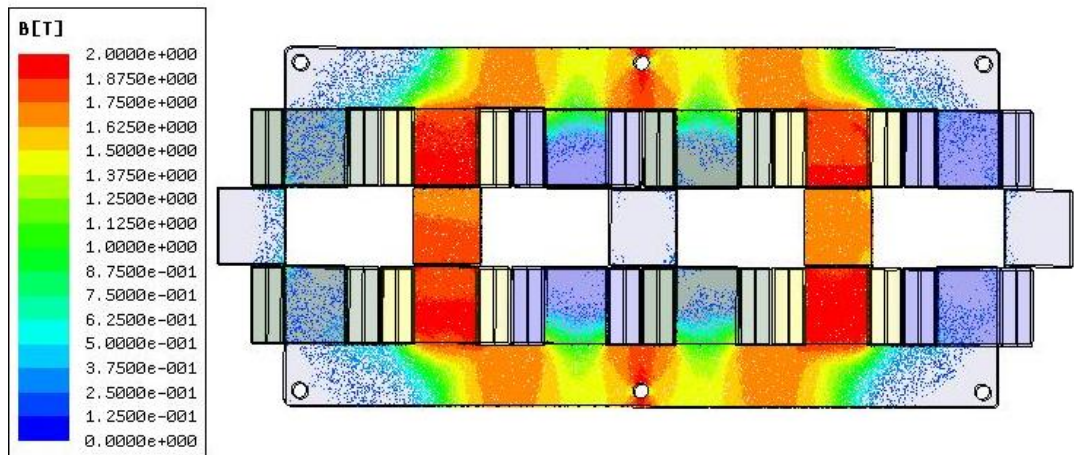


(a)



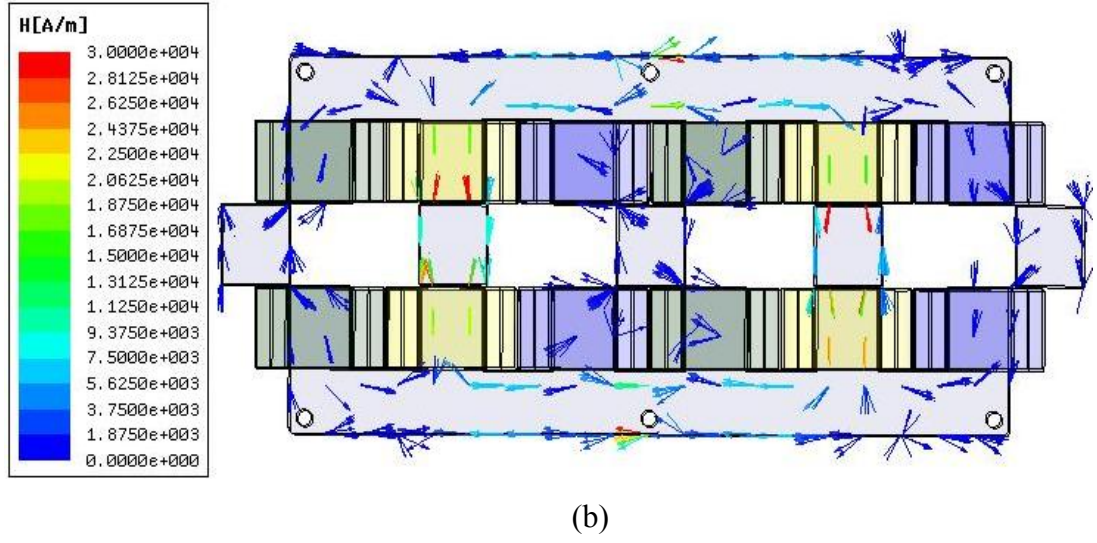
(b)

Şekil 5.60. LARM-A modelinin için, ayrıık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (8A)



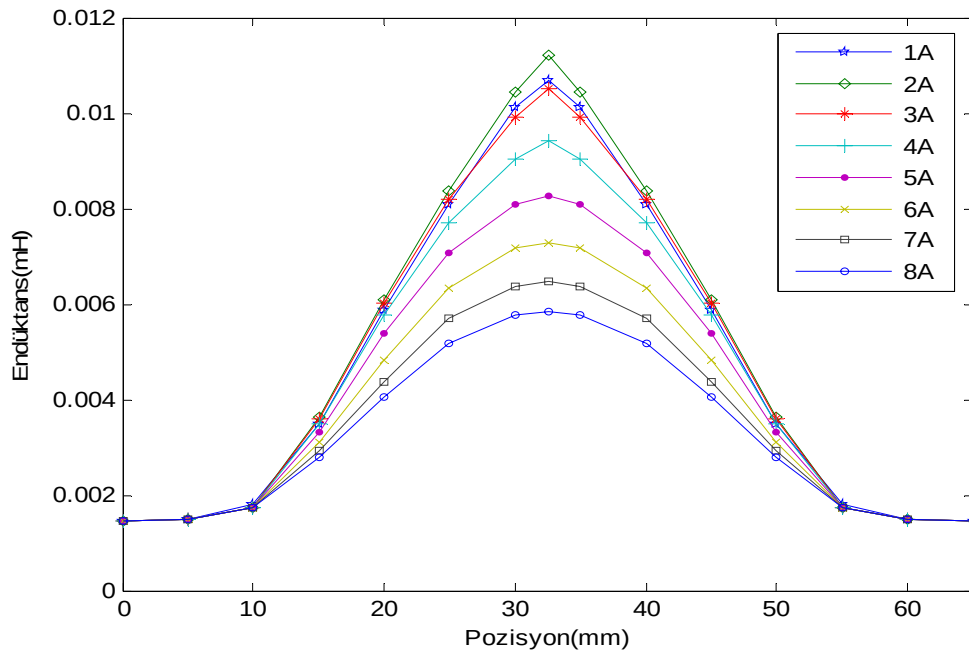
(a)

Şekil 5.61. LARM-A modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu



Şekil 5.61. LARM-A modelinin için, çakışık durumdaki (b) Manyetik alan şiddeti (8A)

LARM-A modelinin stator durumuna göre elde edilen endüktans değişimi Şekil 5.62’de verilmiştir. Şekildeki grafik stator ve translatorun sonlu elamanlar yöntemi ile motorun farklı uyarma ve stator konumları için tamamen ayrık konumundan çakışık durumuna kadar olan endüktans değişimini göstermektedir. LARM’nin bir fazına ait farklı akım ve farklı stator konumlarına göre endüktans değişimi Çizelge 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.62. LARM-A modelinin pozisyona göre akım-endüktans değişimi

Çizelge 5.2. LARM-A modeline ait akım-pozisyon değişimine göre endüktans değerleri

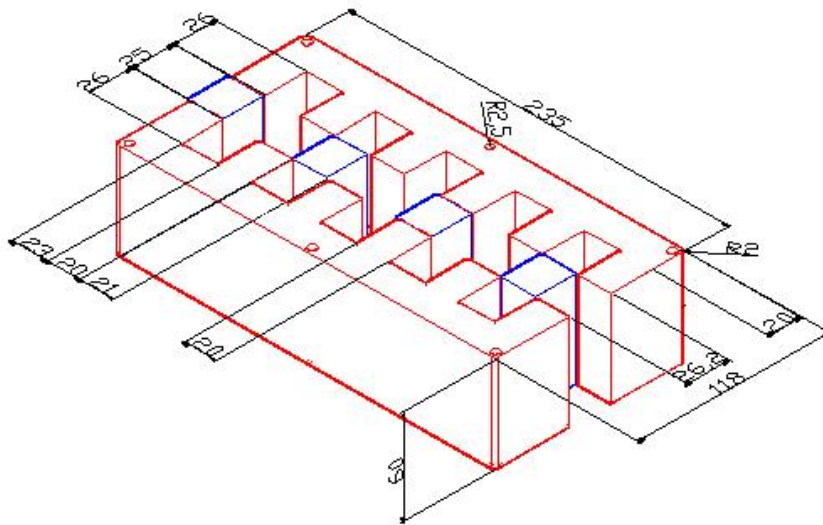
Pozisyon(mm)	L (1A) mH	L (2A) mH	L (3A) mH	L (4A) mH	L (5A) mH	L (6A) mH	L (7A) mH	L (8A) mH
Ayrık(0)	0,001445	0,001454	0,001456	0,001457	0,001459	0,001461	0,001462	0,001463
5	0,001501	0,001488	0,001489	0,001490	0,001492	0,001494	0,001496	0,001496
10	0,001801	0,001739	0,001741	0,001744	0,001747	0,001750	0,001751	0,001751
15	0,003490	0,003629	0,003601	0,003500	0,003324	0,003100	0,002928	0,002799
20	0,005866	0,006089	0,006018	0,005776	0,005373	0,004833	0,004385	0,004057
25	0,008095	0,008372	0,008196	0,007693	0,007056	0,006320	0,005709	0,005164
30	0,010124	0,010421	0,009911	0,009028	0,008071	0,007163	0,006380	0,005766
Çakışık(32.5)	0,010688	0,011224	0,010515	0,009425	0,008259	0,007282	0,006479	0,005829
35	0,010124	0,010421	0,009911	0,009028	0,008071	0,007163	0,006380	0,005766
40	0,008095	0,008372	0,008196	0,007693	0,007056	0,006320	0,005709	0,005164
45	0,005866	0,006089	0,006018	0,005776	0,005373	0,004833	0,004385	0,004057
50	0,003490	0,003629	0,003601	0,003500	0,003324	0,003100	0,002928	0,002799
55	0,001801	0,001739	0,001741	0,001744	0,001747	0,001750	0,001751	0,001751
60	0,001501	0,001488	0,001489	0,001490	0,001492	0,001494	0,001496	0,001496
Ayrık(65)	0,001445	0,001454	0,001456	0,001457	0,001459	0,001461	0,001462	0,001463

5.9.2. LARM-B modelinin incelenmesi

LARM-B modelinin tasarıma uygun olarak mekanik ve elektriksel parametreleri Çizelge 5.3'te verilmiştir. Bu parametreler doğrultusunda Şekil 5.63' te görüldüğü gibi motor 3 boyutlu olarak bilgisayar ortamında görselleştirilmiştir. Bu modelde stator genişliği 21 mm ye düşürülmüştür.

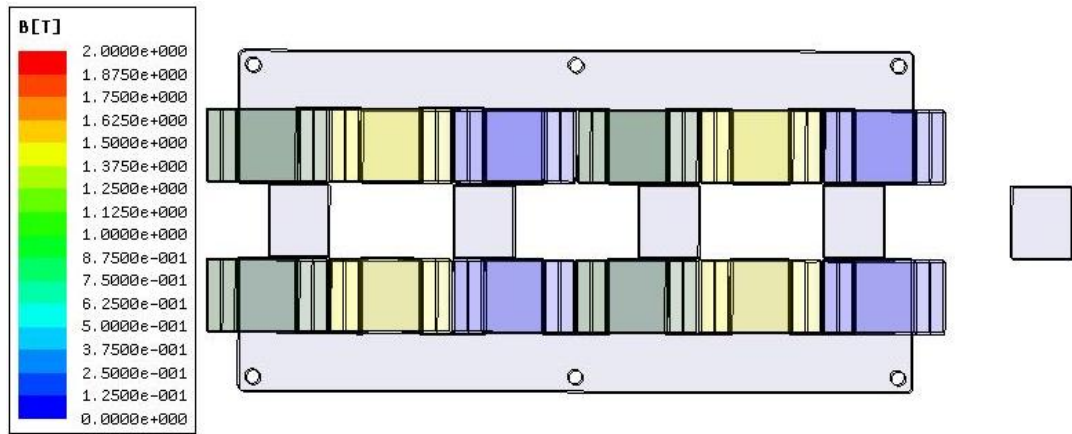
Çizelge 5.3. LARM-B modeline ait mekanik ve elektriksel parametreler

Faz Sayısı	3
Translator Kutbu Genişliği	20 mm
Translator Kutbu Aralığı	23 mm
Translator Kutup Yüksekliği	26 mm
Translator Derinliği	60 mm
Stator Kutup Genişliği	21 mm
Stator Derinliği	60 mm
Toplam Uzunluk	235 mm
Toplam Genişlik	118 mm
Hava Aralığı	0.6 mm
Çelik tipi	Steel 1010

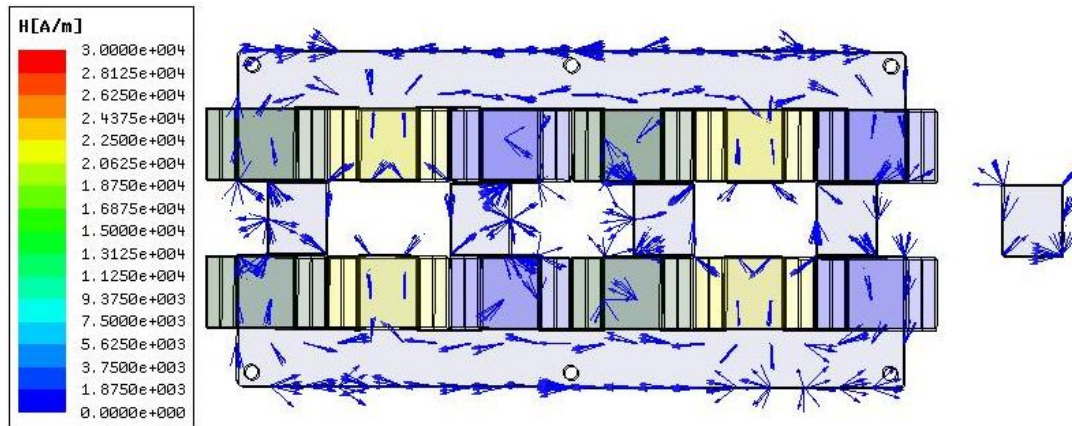


Şekil 5.63. LARM-B modelinin 3 boyutlu olarak görselleştirimi

Şekil 5.64 ve Şekil 5.65'te sırasıyla ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, sargı akımı 1 amper için verilmektedir.

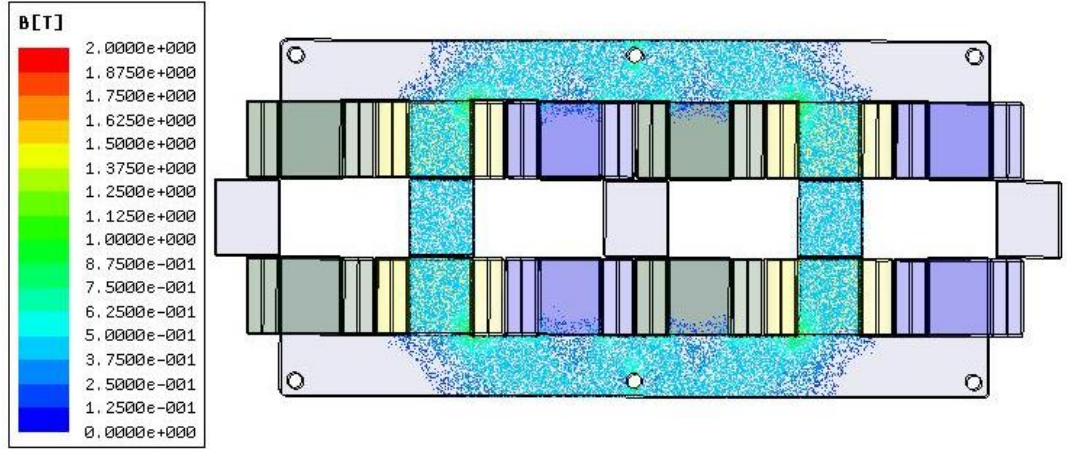


(a)

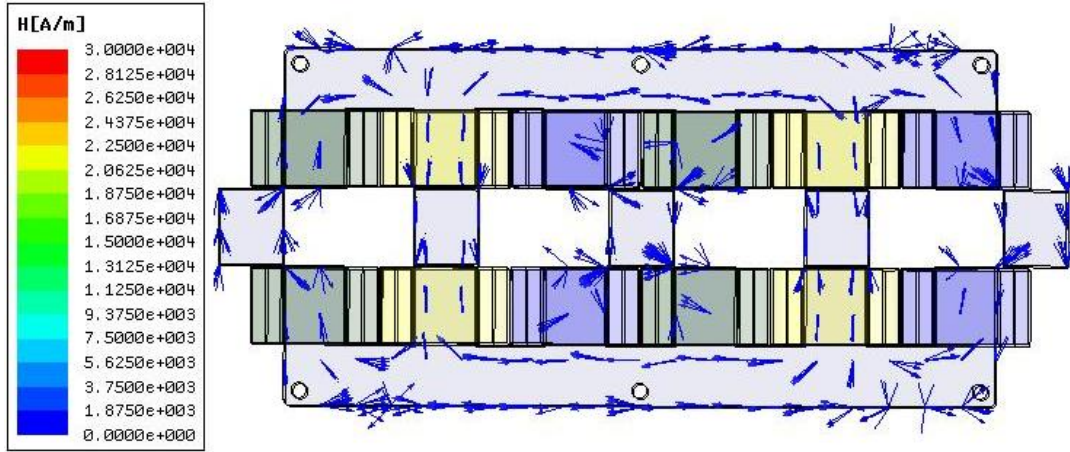


(b)

Şekil 5.64. LARM-B modelinin için, ayırık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A)



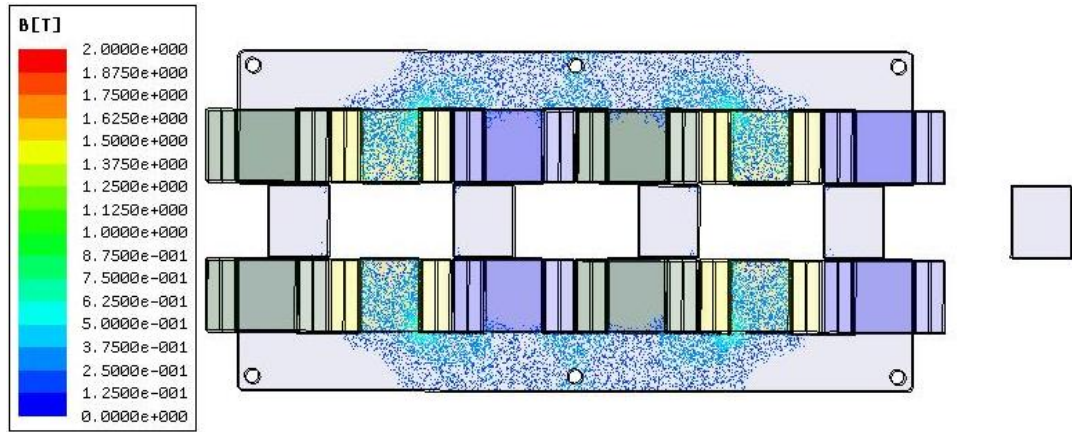
(a)



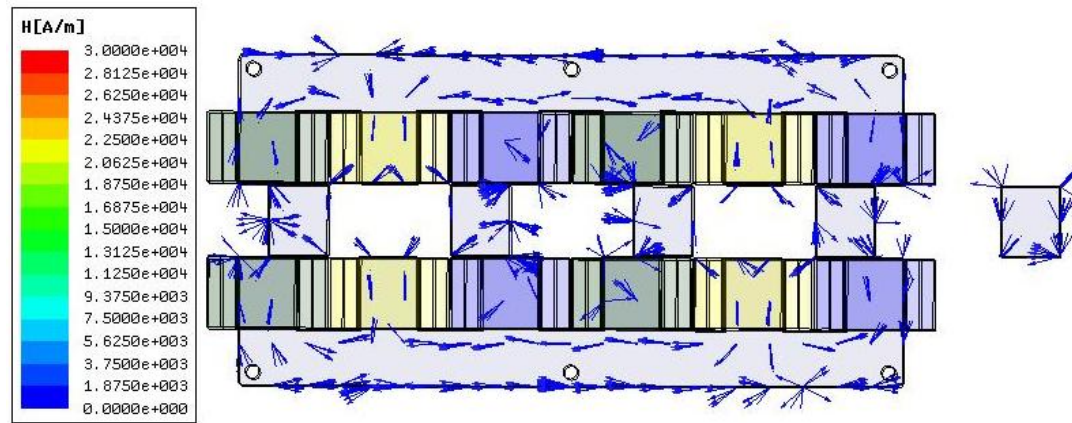
(b)

Şekil 5.65. LARM-B modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A)

Şekil 5.66 ve Şekil 5.67’de sırasıyla ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, sargı akımı 5 amper için verilmektedir.

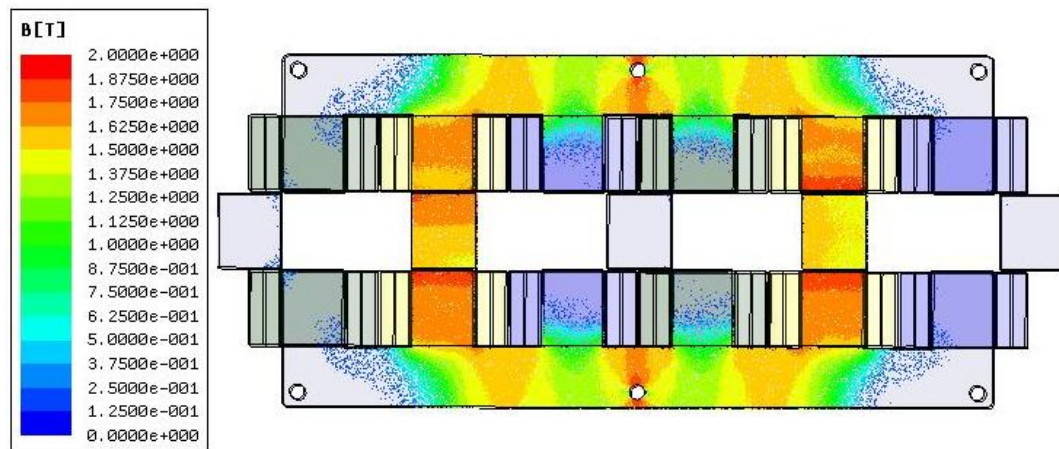


(a)



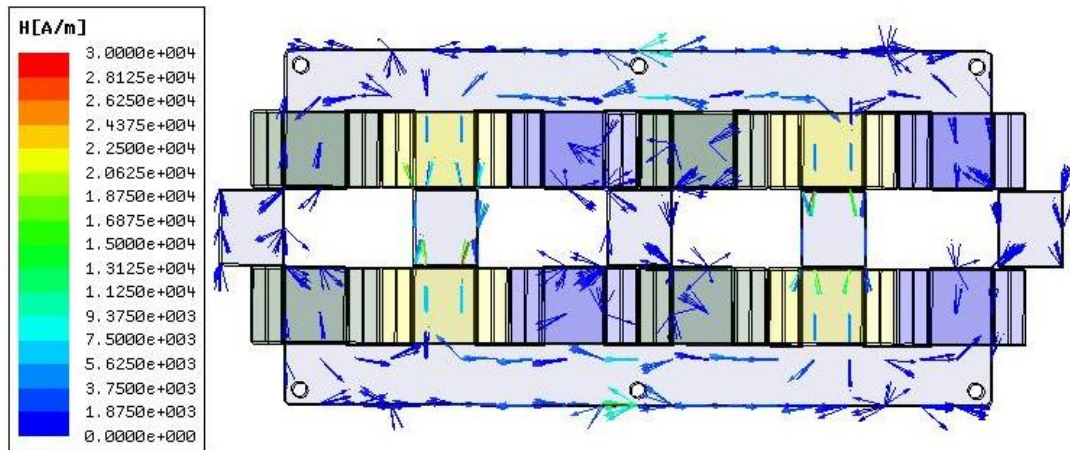
(b)

Şekil 5.66. LARM-B modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (5A)



(a)

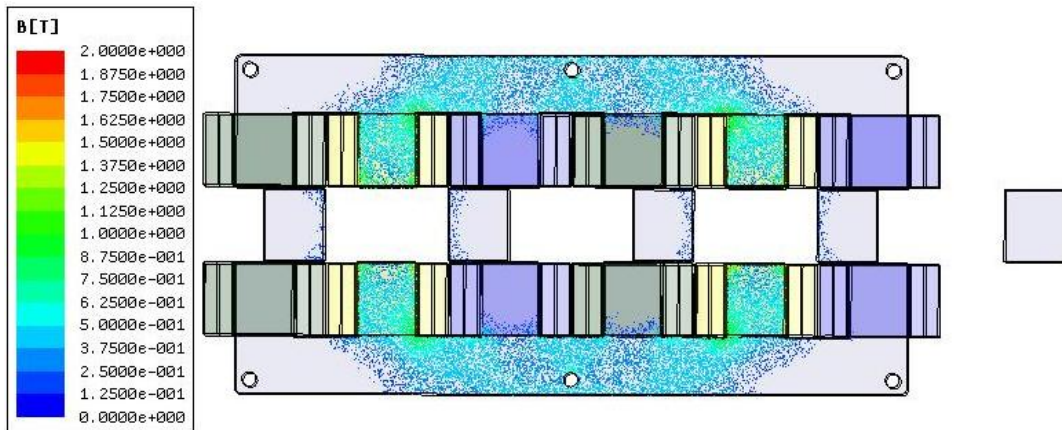
Şekil 5.67. LARM-B modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu



(b)

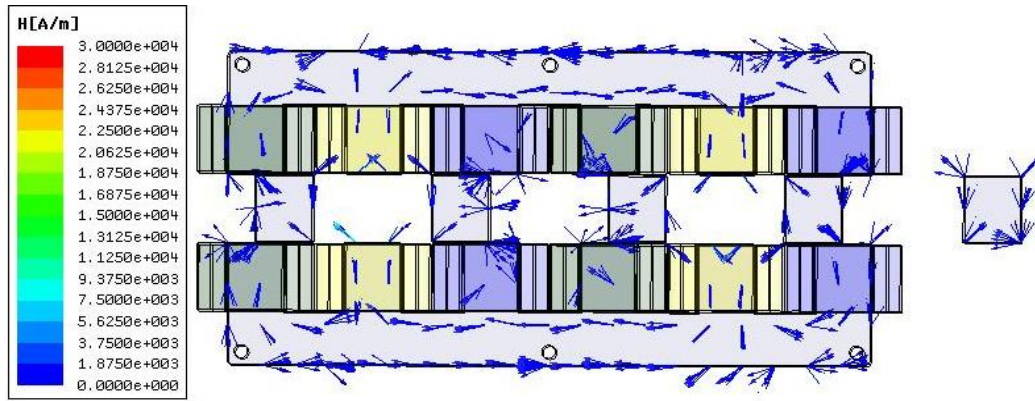
Şekil 5.67. LARM-B modelinin için, çakışık durumdaki (b) Manyetik alan şiddeti (5A)

Şekil 5.68 ve Şekil 5.69’da sırasıyla ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, sargı akımı 8 amper için verilmektedir.



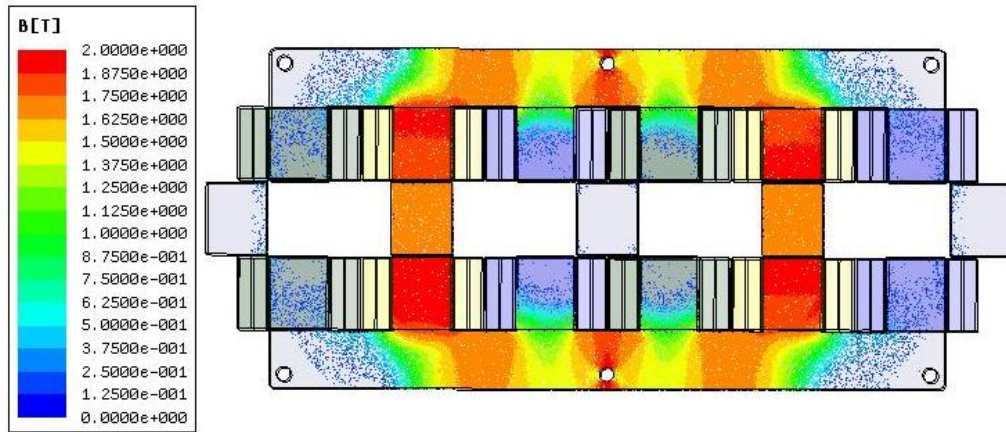
(a)

Şekil 5.68. LARM-B modelinin için, ayırık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu

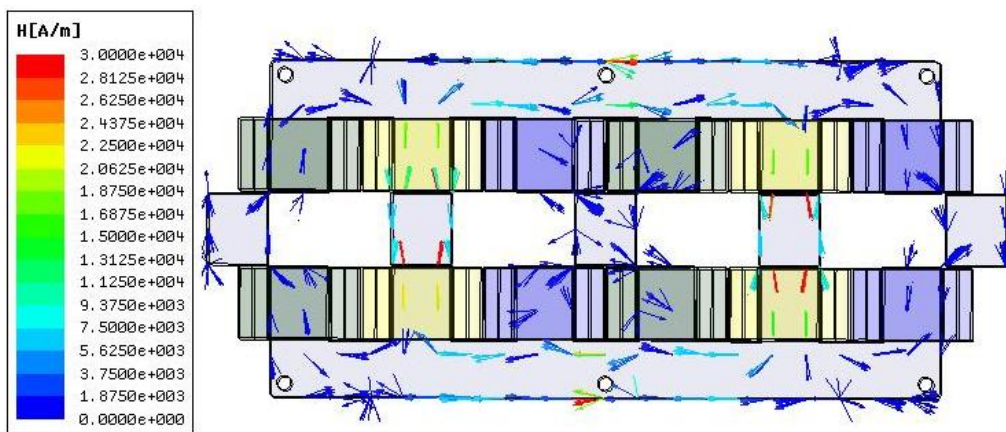


(b)

Şekil 5.68. LARM-B modelinin için, ayrıık durumdaki (b) Manyetik alan şiddeti (8A)



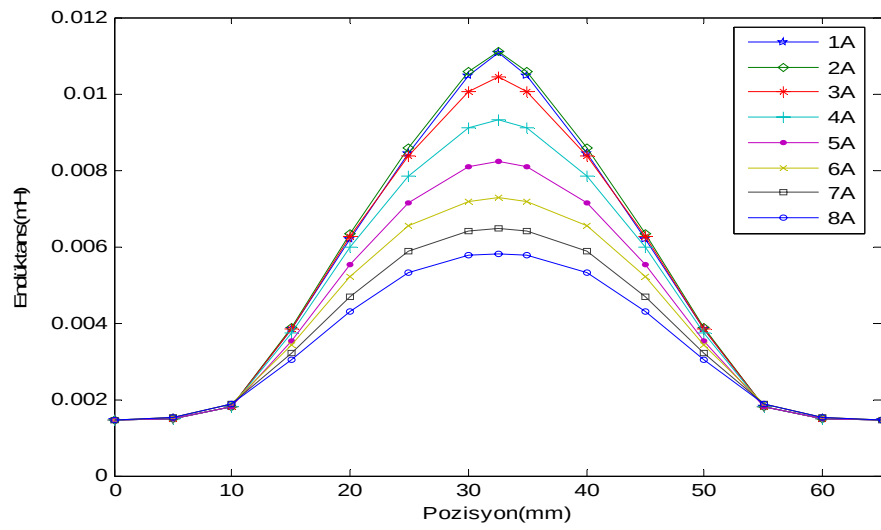
(a)



(b)

Şekil 5.69. LARM-B modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu
(b) Manyetik alan şiddeti (8A)

LARM-B modelinin stator durumuna göre elde edilen endüktans değişimi Şekil 5.70’te verilmiştir. Şekildeki grafik motorun sonlu elamanlar yöntemi ile farklı uyarma ve stator konumları için tamamen ayrık konumundan çakışık durumuna kadar olan endüktans değişimini göstermektedir. LARM’nin bir fazına ait farklı akım ve farklı stator konumlarına göre endüktans değişimi Çizelge 5.4’te verilmiştir.



Şekil 5.70. LARM-B modelinin pozisyona göre akım-endüktans değişimi

Çizelge 5.4. LARM-B modeline ait akım-pozisyon değişimine göre endüktans değerleri

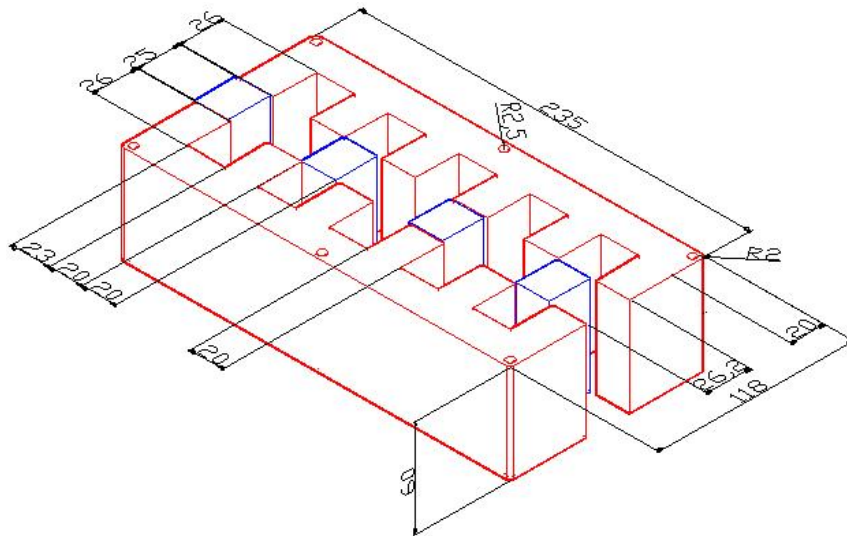
Pozisyon(mm)	L (1A) mH	L (2A) mH	L (3A) mH	L (4A) mH	L (5A) mH	L (6A) mH	L (7A) mH	L (8A) mH
Ayrık(0)	0,001439	0,001441	0,001442	0,001443	0,001444	0,001447	0,001448	0,001449
5	0,001494	0,001495	0,001496	0,001498	0,001500	0,001515	0,001517	0,001518
10	0,001795	0,001797	0,001800	0,001803	0,001807	0,001884	0,001883	0,001883
15	0,003846	0,003875	0,003850	0,003734	0,003535	0,003435	0,003215	0,003048
20	0,006206	0,006320	0,006253	0,005992	0,005527	0,005206	0,004676	0,004291
25	0,008432	0,008587	0,008376	0,007858	0,007152	0,006551	0,005894	0,005316
30	0,010461	0,010582	0,010047	0,009093	0,008095	0,007185	0,006403	0,005764
Çakışık(32.5)	0,011053	0,011122	0,010422	0,009312	0,008212	0,007267	0,006459	0,005797
35	0,010461	0,010582	0,010047	0,009093	0,008095	0,007185	0,006403	0,005764
40	0,008432	0,008587	0,008376	0,007858	0,007152	0,006551	0,005894	0,005316
45	0,006206	0,006320	0,006253	0,005992	0,005527	0,005206	0,004676	0,004291
50	0,003846	0,003875	0,003850	0,003734	0,003535	0,003435	0,003215	0,003048
55	0,001795	0,001797	0,001800	0,001803	0,001807	0,001884	0,001883	0,001883
60	0,001494	0,001495	0,001496	0,001498	0,001500	0,001515	0,001517	0,001518
Ayrık(65)	0,001439	0,001441	0,001442	0,001443	0,001444	0,001447	0,001448	0,001449

5.9.3. LARM-C modelinin incelenmesi

LARM-C modelinin tasarıma uygun olarak mekanik ve elektriksel parametreleri Çizelge 5.5’de verilmiştir. Bu parametreler doğrultusunda Şekil 5.71’de görüldüğü gibi motor 3 boyutlu olarak bilgisayar ortamında görselleştirilmiştir. Bu modelde Stator genişliği 20 mm ye düşürülmüştür.

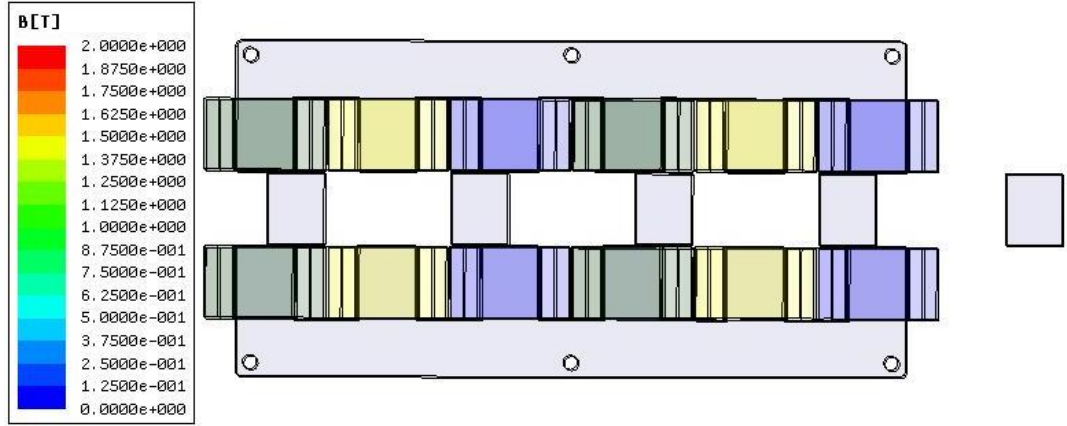
Çizelge 5.5. LARM-C modeline ait mekanik ve elektriksel parametreler

Faz Sayısı	3
Translator Kutbu Genişliği	20 mm
Translator Kutbu Aralığı	23 mm
Translator Kutup Yüksekliği	26 mm
Translator Derinliği	60 mm
Stator Kutup Genişliği	20 mm
Stator Derinliği	60 mm
Toplam Uzunluk	235 mm
Toplam Genişlik	118 mm
Hava Aralığı	0.6 mm
Çelik tipi	Steel 1010

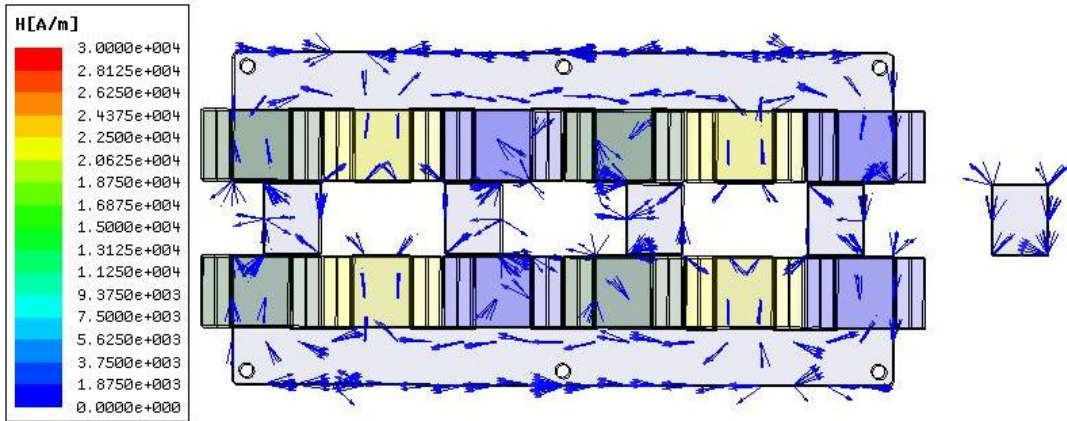


Şekil 5.71. LARM-C modelinin 3 boyutlu olarak görselleştirimi

Şekil 5.72 ve Şekil 5.73'te sırasıyla ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, sargı akımı 1 amper için verilmektedir.

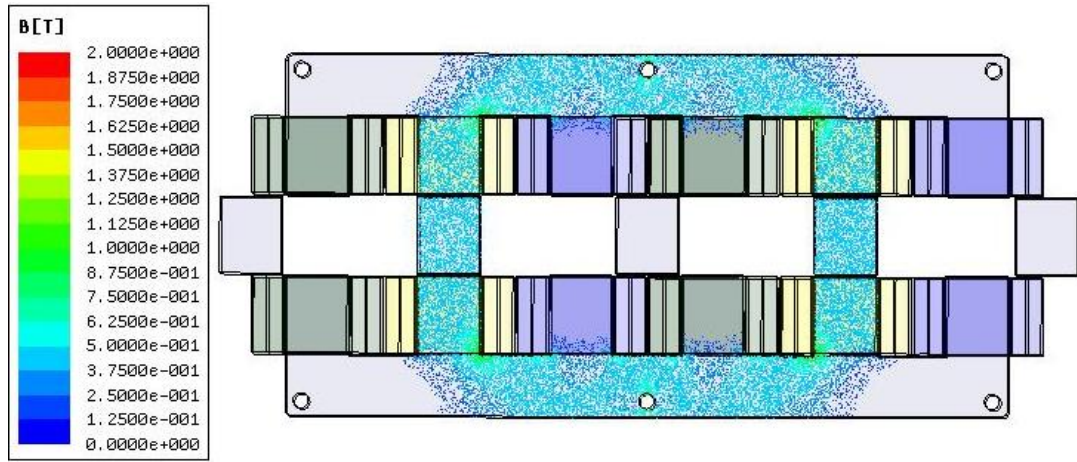


(a)

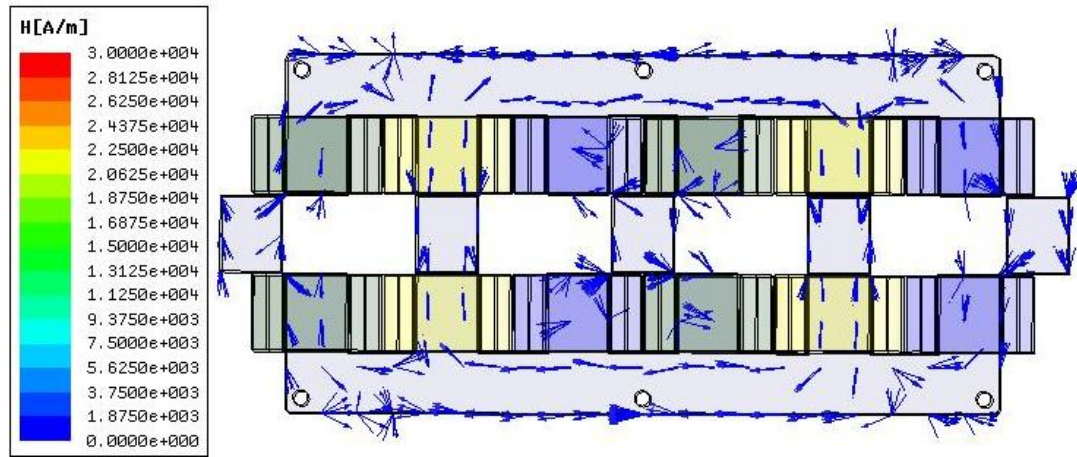


(b)

Şekil 5.72. LARM-C modelinin için, ayırık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A)



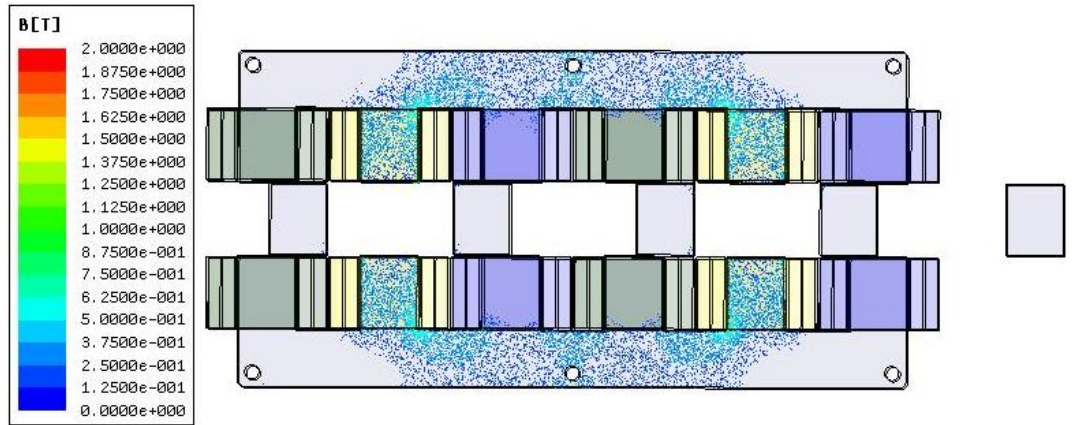
(a)



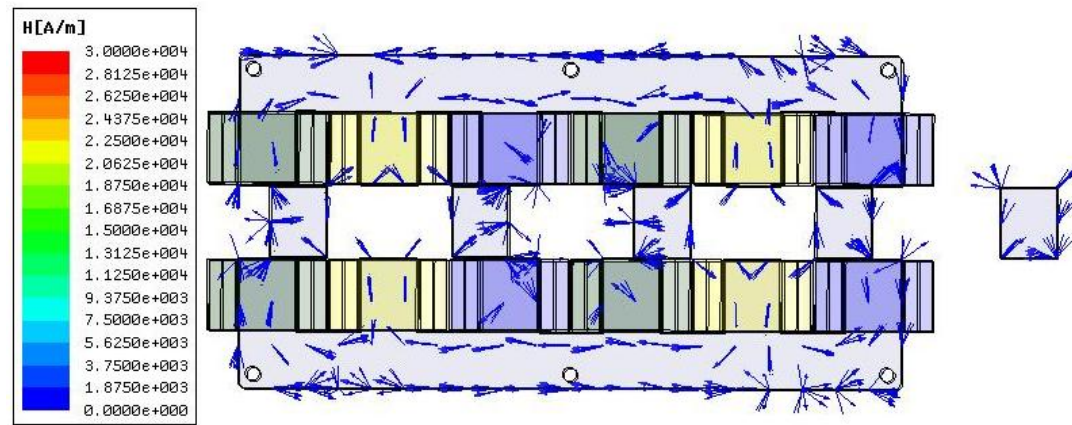
(b)

Şekil 5.73. LARM-C modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A)

Şekil 5.74 ve Şekil 5.75'te sırasıyla ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, sargı akımı 5 amper için verilmektedir.

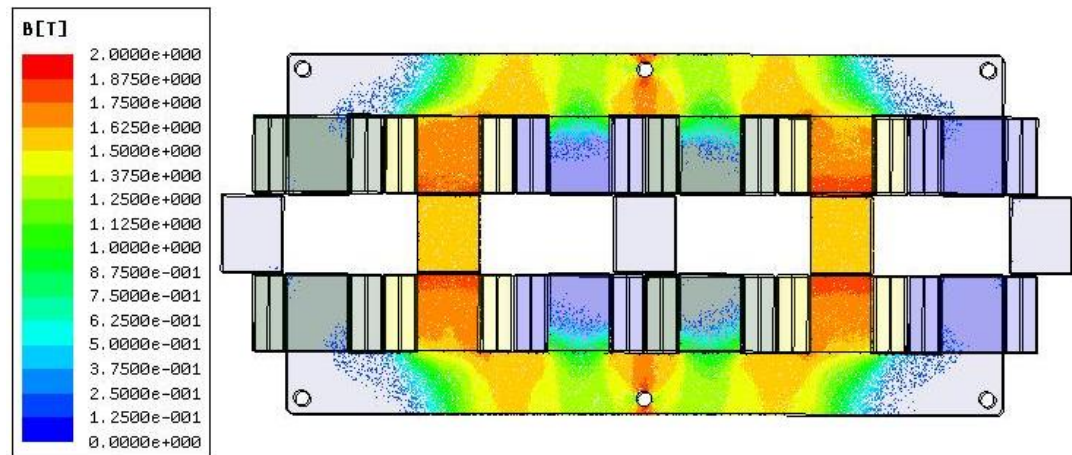


(a)



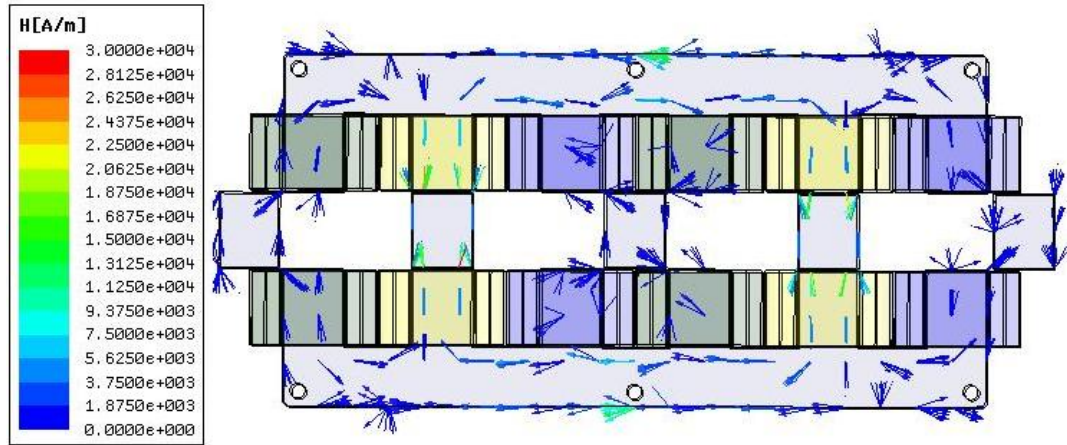
(b)

Şekil 5.74. LARM-C modelinin için, ayrık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (5A)



(a)

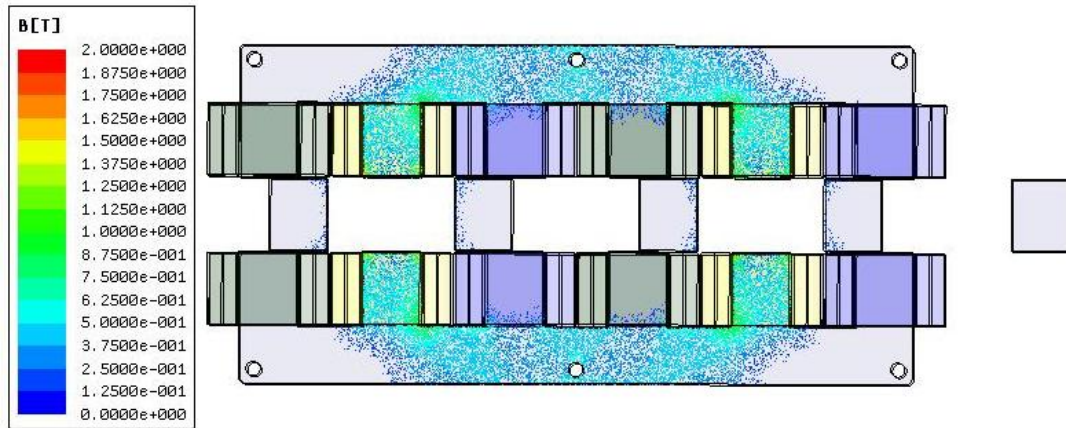
Şekil 5.75. LARM-C modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu



(b)

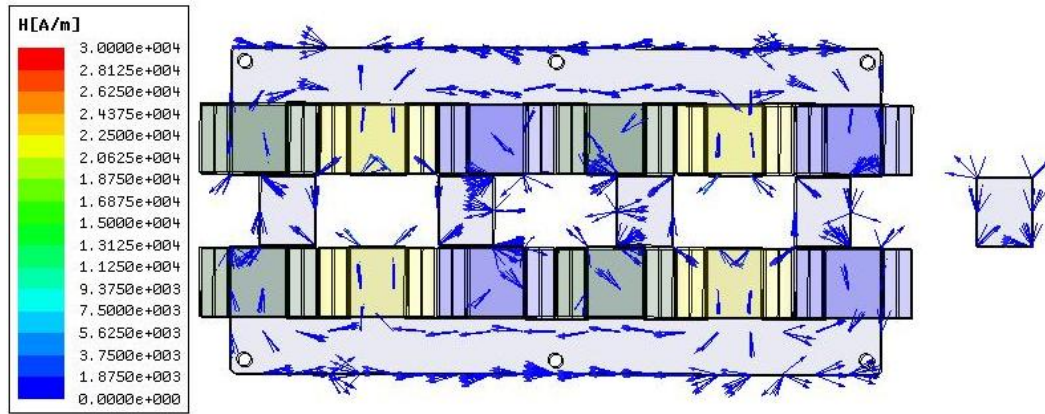
Şekil 5.75. LARM-C modelinin için, çakışık durumdaki (b) Manyetik alan şiddeti (5A)

Şekil 5.76 ve Şekil 5.77’de sırasıyla ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, sargı akımı 8 amper için verilmektedir.



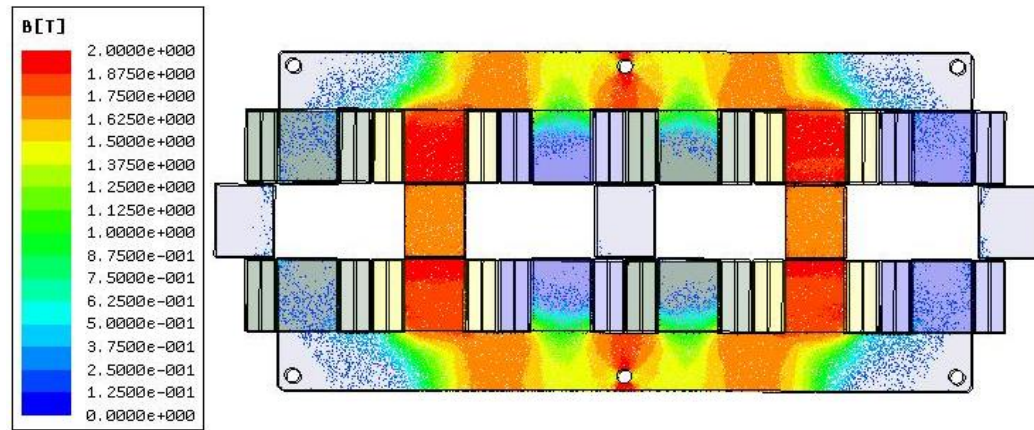
(a)

Şekil 5.76. LARM-C modelinin için, ayırık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu

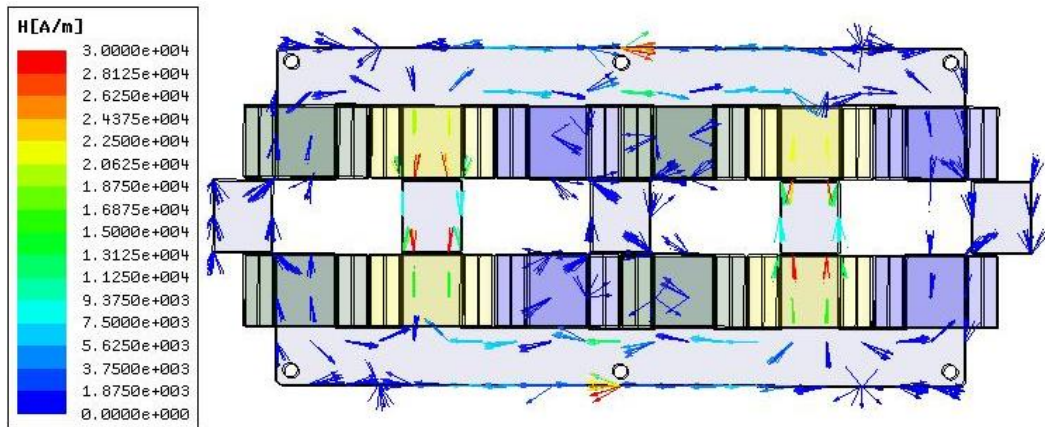


(b)

Şekil 5.76. LARM-C modelinin için, ayrık durumdaki (b) Manyetik alan şiddeti (8A)



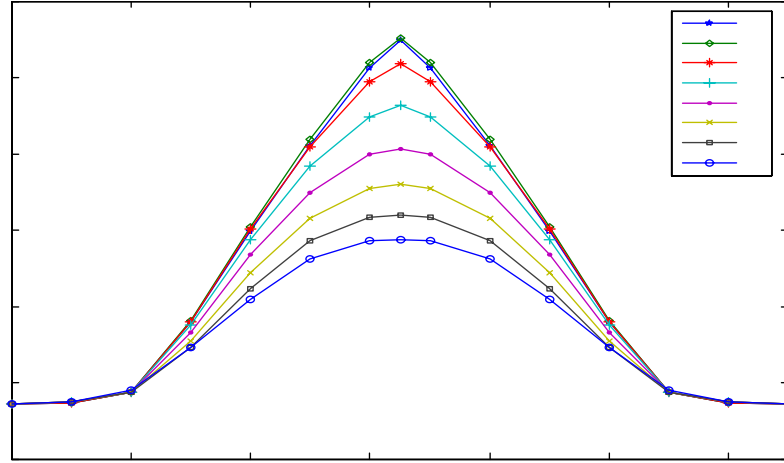
(a)



(b)

Şekil 5.77. LARM-C modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (8A)

LARM-C modelinin stator durumuna göre elde edilen endüktans değişimi Şekil 5.78’de verilmiştir. Şekildeki grafik motorun sonlu elamanlar yöntemi ile farklı uyarma ve stator konumları için tamamen ayrık konumundan çakışık durumuna kadar olan endüktans değişimini göstermektedir. LARM’nin bir fazına ait farklı akım ve farklı stator konumlarına göre endüktans değişimi Çizelge 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.78. LARM-C modelinin pozisyona göre akım-endüktans değişimi

0.012

Çizelge 5.6. LARM-C modeline ait akım-pozisyon değişimine göre endüktans değerleri

Pozisyon(mm)	L (1A) mH	L (2A) mH	L (3A) mH	L (4A) mH	L (5A) mH	L (6A) mH	L (7A) mH	L (8A) mH
Ayrık(0)	0,001430	0,001431	0,001432	0,001434	0,001435	0,001436	0,001438	0,001439
5	0,001479	0,001479	0,001481	0,001483	0,001483	0,001486	0,001488	0,001500
10	0,001735	0,001736	0,001739	0,001742	0,001744	0,001747	0,001749	0,001808
15	0,003599	0,003619	0,003601	0,003498	0,003308	0,003094	0,002926	0,002918
20	0,005974	0,006085	0,006018	0,005750	0,005343	0,004877	0,004472	0,004172
25	0,008209	0,008373	0,008190	0,007692	0,006986	0,006316	0,005708	0,005243
30	0,010258	0,010393	0,009884	0,008971	0,007985	0,007082	0,006335	0,005713
Çakışık(32.5)	0,010971	0,011028	0,010357	0,009259	0,008135	0,007202	0,006400	0,005747
35	0,010258	0,010393	0,009884	0,008971	0,007985	0,007082	0,006335	0,005713
40	0,008209	0,008373	0,008190	0,007692	0,006986	0,006316	0,005708	0,005243
45	0,005974	0,006085	0,006018	0,005750	0,005343	0,004877	0,004472	0,004172
50	0,003599	0,003619	0,003601	0,003498	0,003308	0,003094	0,002926	0,002918
55	0,001735	0,001736	0,001739	0,001742	0,001744	0,001747	0,001749	0,001808
60	0,001479	0,001479	0,001481	0,001483	0,001483	0,001486	0,001488	0,001500
Ayrık(65)	0,001430	0,001431	0,001432	0,001434	0,001435	0,001436	0,001438	0,001439

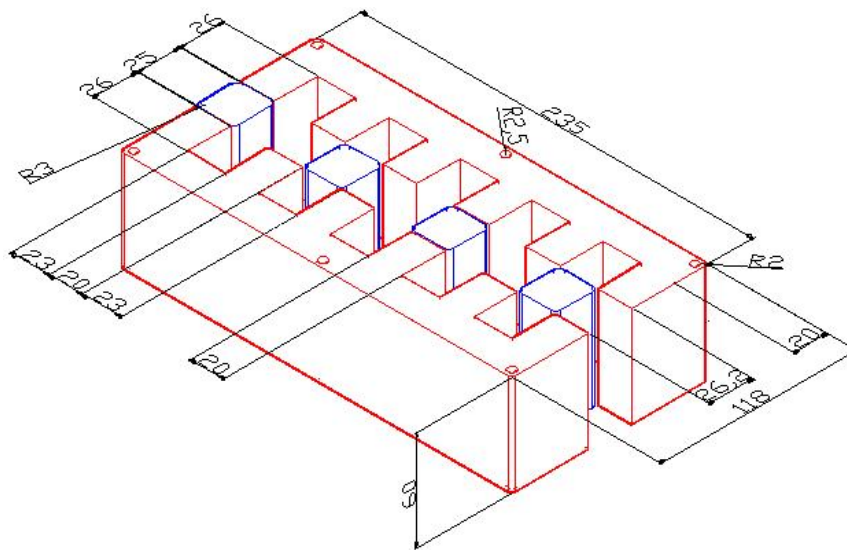
0.002

5.9.4. LARM-D modelinin incelenmesi

LARM-D modelinin tasarıma uygun olarak mekanik ve elektriksel parametreleri Çizelge 5.7’de verilmiştir. Bu parametreler doğrultusunda Şekil 5.79’da görüldüğü gibi motor 3 boyutlu olarak bilgisayar ortamında görselleştirilmiştir. Bu modelde stator kenarları 3 mm yarıçaplı pah kırılarak oval olarak tasarlanmıştır.

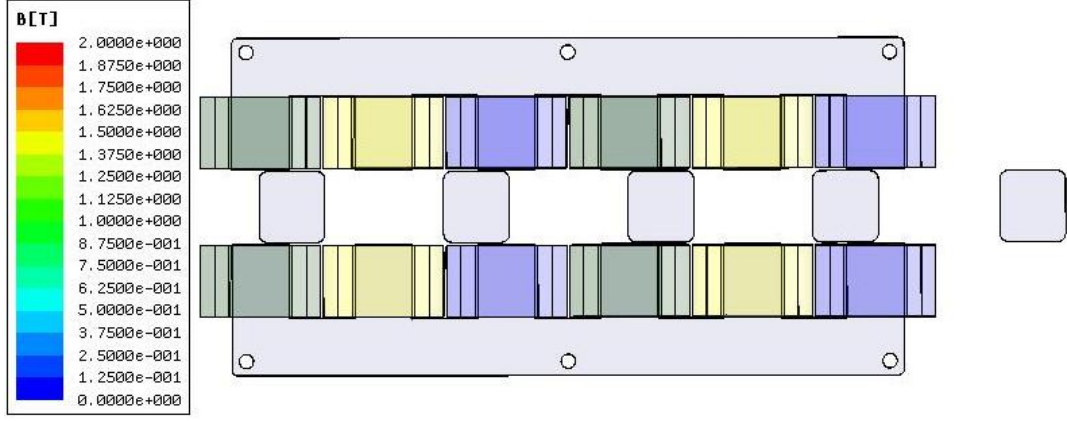
Çizelge 5.7. LARM-D modeline ait mekanik ve elektriksel parametreler

Faz Sayısı	3
Translator Kutbu Genişliği	20 mm
Translator Kutbu Aralığı	23 mm
Translator Kutup Yüksekliği	26 mm
Translator Derinliği	60 mm
Stator Kutup Genişliği	23mm(3mm pah)
Stator Derinliği	60 mm
Toplam Uzunluk	235 mm
Toplam Genişlik	118 mm
Hava Aralığı	0.6 mm
Çelik tipi	Steel 1010

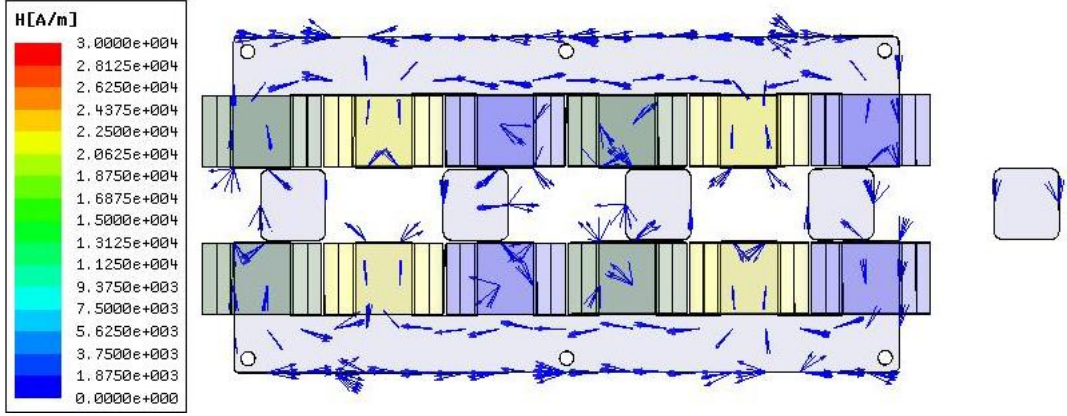


Şekil 5.79. LARM-D modelinin 3 boyutlu olarak görselleştirimi

Şekil 5.80 ve Şekil 5.81’de sırasıyla ayrıık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, sargı akımı 1 amper için verilmektedir.

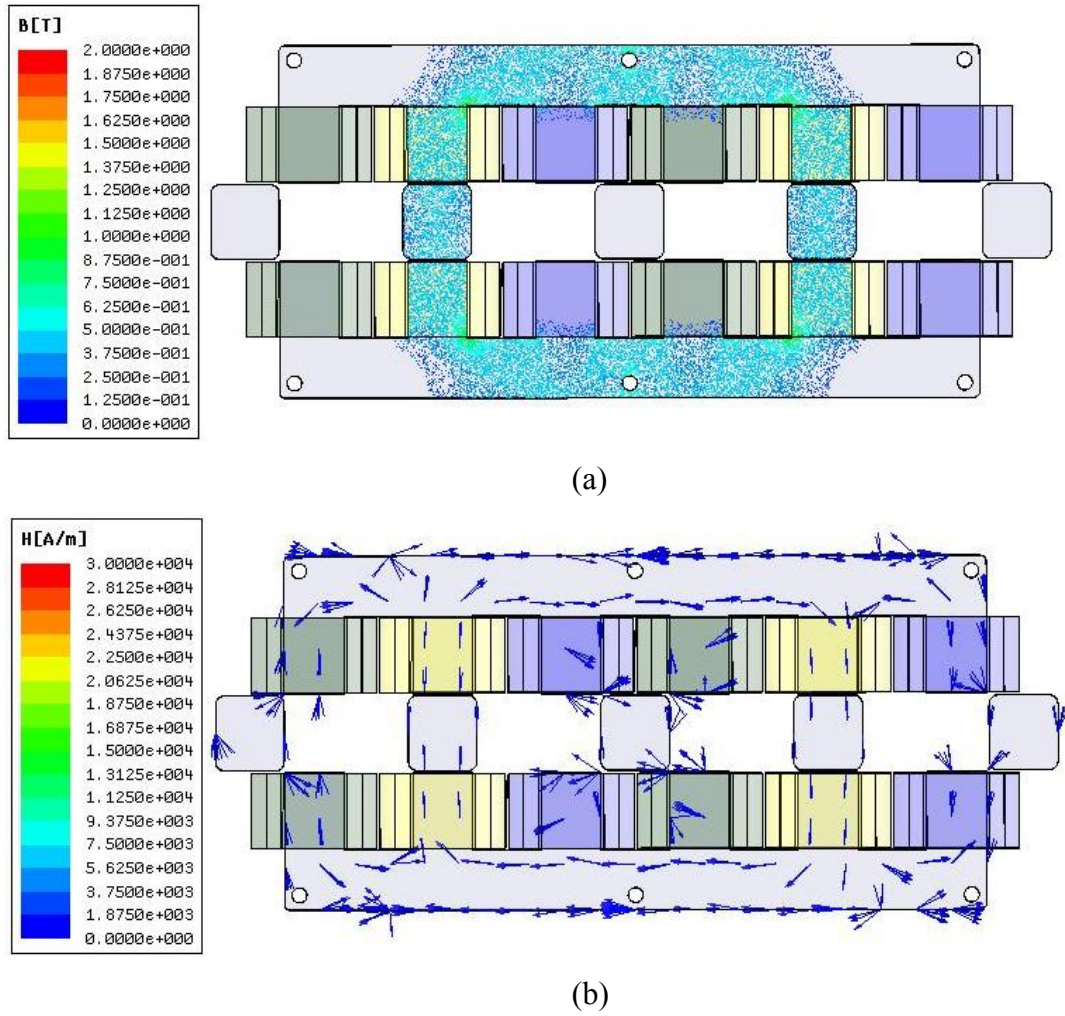


(a)



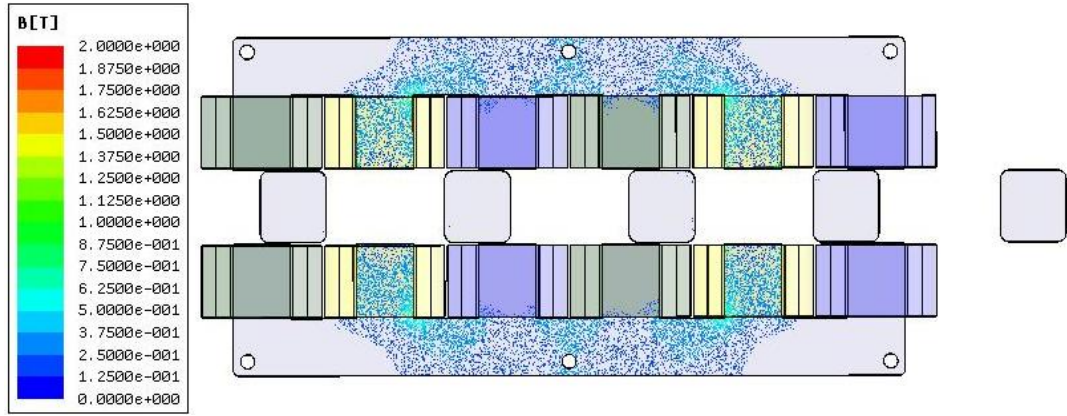
(b)

Şekil 5.80. LARM-D modelinin için, ayrıık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A)

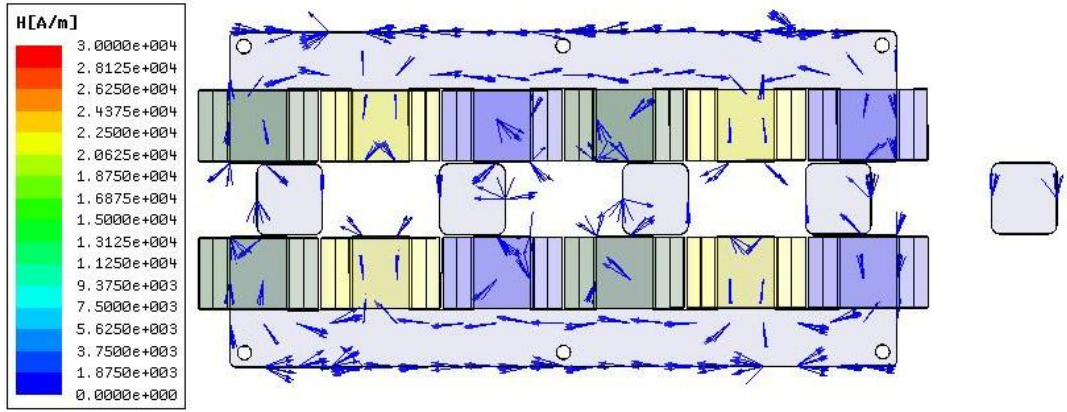


Şekil 5.81. LARM-D modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A)

Şekil 5.82 ve Şekil 5.83'te sırasıyla ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, sargı akımı 5 amper için verilmektedir.

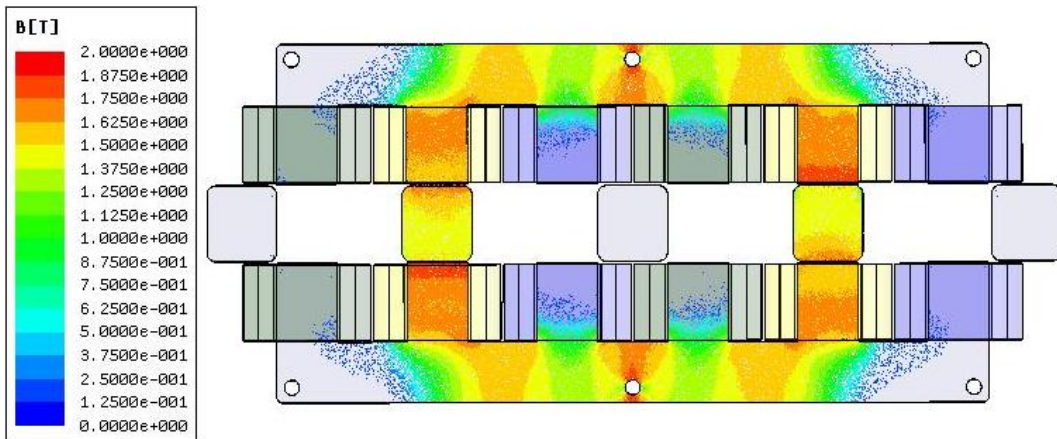


(a)



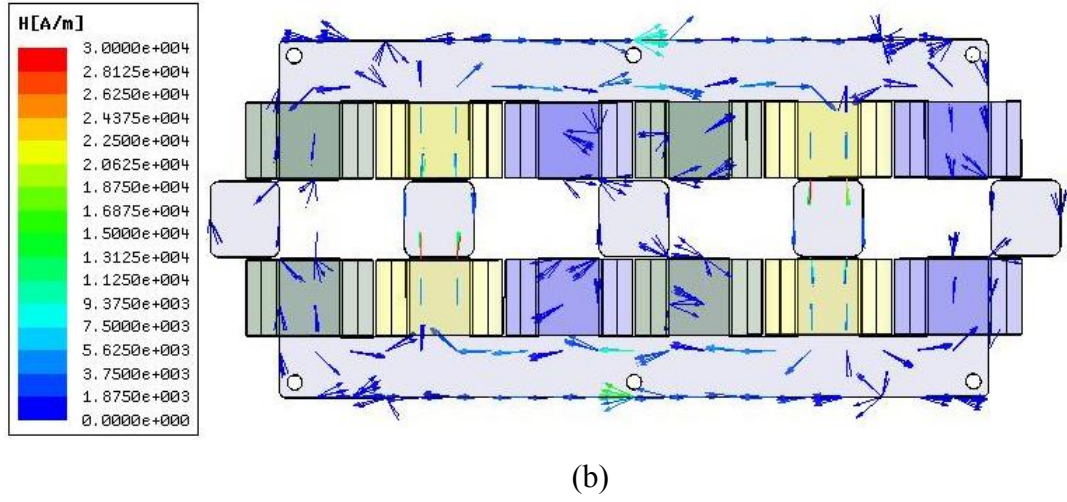
(b)

Şekil 5.82. LARM-D modelinin için, ayrıık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu
(b) Manyetik alan şiddeti (5A)



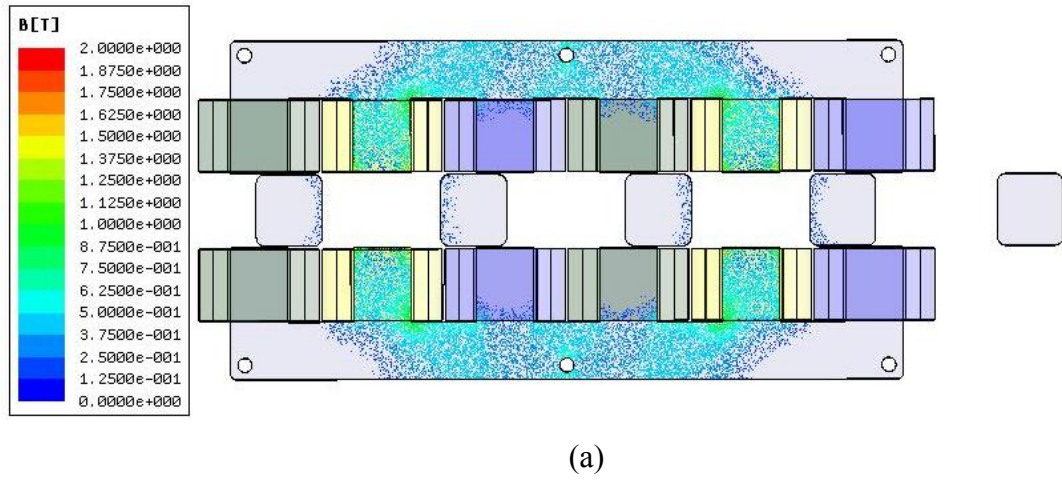
(a)

Şekil 5.82. LARM-D modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu

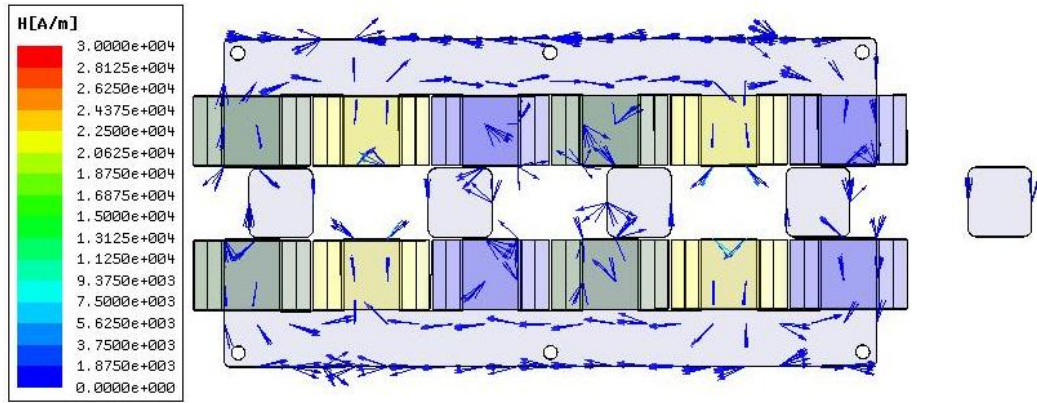


Şekil 5.82. LARM-D modelinin için, çakışık durumdaki (b) Manyetik alan şiddeti (5A)

Şekil 5.84 ve Şekil 5.85'te sırasıyla ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, sargı akımı 8 amper için verilmektedir.

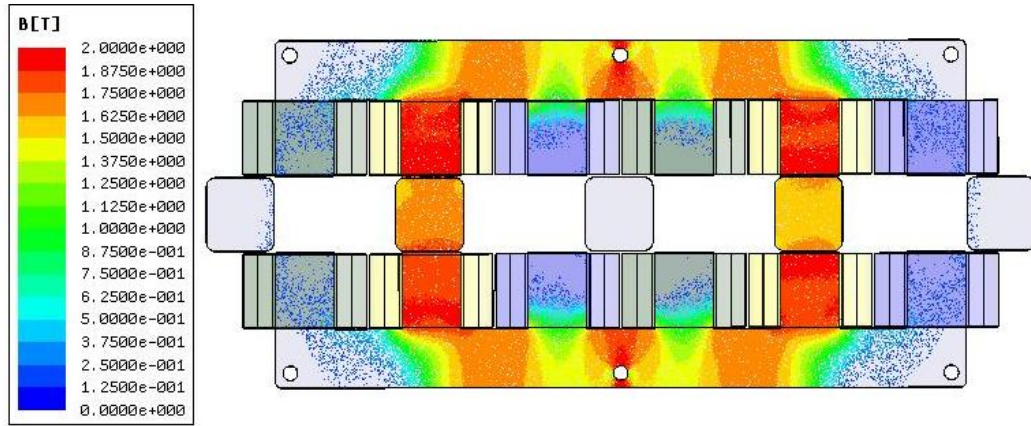


Şekil 5.84. LARM-D modelinin için, ayırık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu

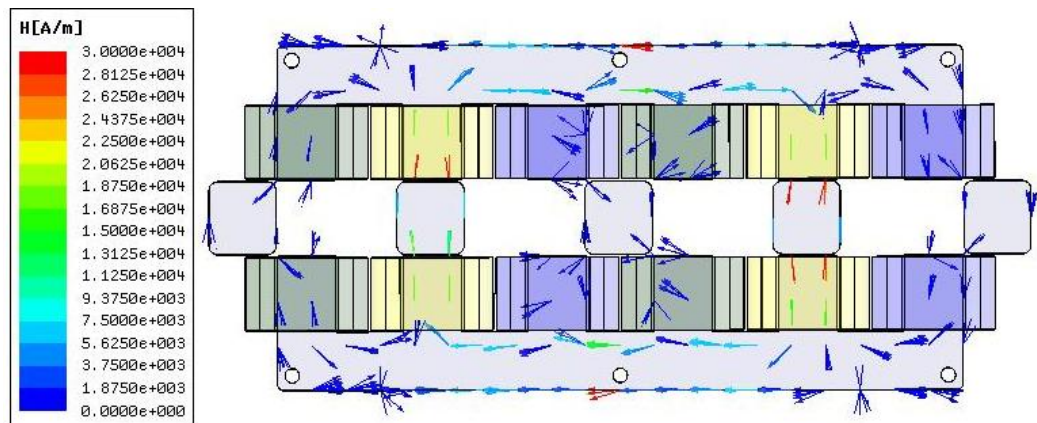


(b)

Şekil 5.84. LARM-D modelinin için, ayrık durumdaki (b) Manyetik alan şiddeti (8A)



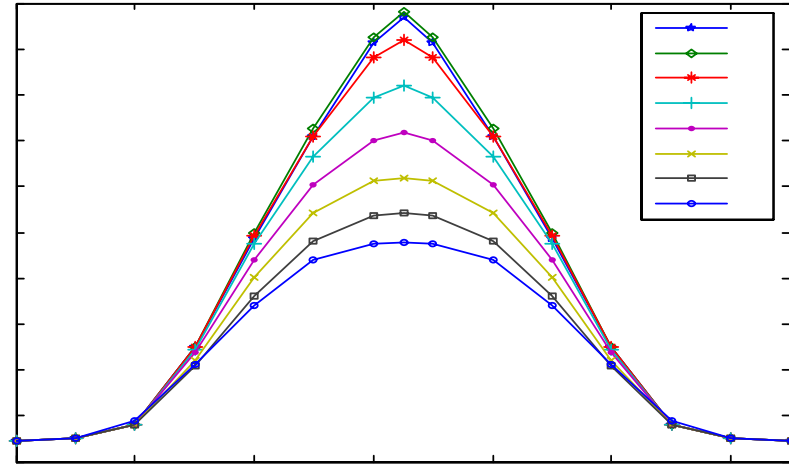
(a)



(b)

Şekil 5.85. LARM-D modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu
(b) Manyetik alan şiddeti (8A)

LARM-D modelinin stator durumuna göre elde edilen endüktans değişimi Şekil 5.86’da verilmiştir. Şekildeki grafik motorun sonlu elamanlar yöntemi ile farklı uyarma ve stator konumları için tamamen ayrık konumundan çakışık durumuna kadar olan endüktans değişimini göstermektedir. LARM’nin bir fazına ait farklı akım ve farklı stator konumlarına göre endüktans değişimi Çizelge 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.86. LARM-D modelinin pozisyona göre akım-endüktans değişimi

Çizelge 5.8. LARM-D modeline ait akım-pozisyon değişimine göre endüktans değerleri

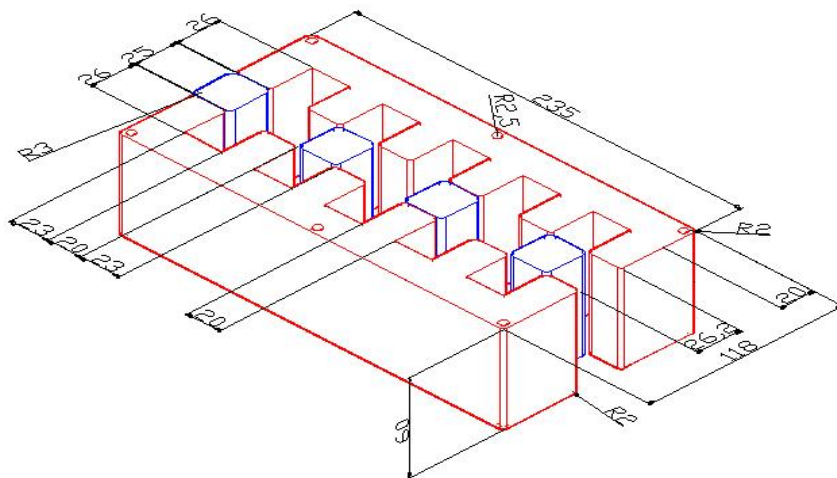
Pozisyon(mm)	L (1A) mH	L (2A) mH	L (3A) mH	L (4A) mH	L (5A) mH	L (6A) mH	L (7A) mH	L (8A) mH
Ayrık(0)	0,001445	0,001446	0,001446	0,001448	0,001450	0,001452	0,001453	0,001454
5	0,001501	0,001502	0,001503	0,001505	0,001508	0,001509	0,001510	0,001526
10	0,001801	0,001803	0,001806	0,001809	0,001813	0,001814	0,001816	0,001882
15	0,003490	0,003511	0,003502	0,003437	0,003370	0,003221	0,003097	0,003119
20	0,005866	0,005984	0,005940	0,005752	0,005412	0,005007	0,004620	0,004396
25	0,008095	0,008267	0,008102	0,007658	0,007035	0,006425	0,005812	0,005407
30	0,010124	0,010263	0,009826	0,008944	0,007996	0,007132	0,006376	0,005763
Çakışık(32.5)	0,010688	0,010796	0,010182	0,009208	0,008178	0,007177	0,006430	0,005789
35	0,010124	0,010263	0,009826	0,008944	0,007996	0,007132	0,006376	0,005763
40	0,008095	0,008267	0,008102	0,007658	0,007035	0,006425	0,005812	0,005407
45	0,005866	0,005984	0,005940	0,005752	0,005412	0,005007	0,004620	0,004396
50	0,003490	0,003511	0,003502	0,003437	0,003370	0,003221	0,003097	0,003119
55	0,001801	0,001803	0,001806	0,001809	0,001813	0,001814	0,001816	0,001882
60	0,001501	0,001502	0,001503	0,001505	0,001508	0,001509	0,001510	0,001526
Ayrık(65)	0,001445	0,001446	0,001446	0,001448	0,001450	0,001452	0,001453	0,001454

5.9.5. LARM-E modelinin incelenmesi

LARM-E modelinin tasarıma uygun olarak mekanik ve elektriksel parametreleri Çizelge 5.9’da verilmiştir. Bu parametreler doğrultusunda Şekil 5.87’de görüldüğü gibi motor 3 boyutlu olarak bilgisayar ortamında görselleştirilmiştir. Bu modelde stator kenarları 3mm, stator kenarları 2mm yarıçaplı pah kırılıp oval olarak tasarlanmıştır.

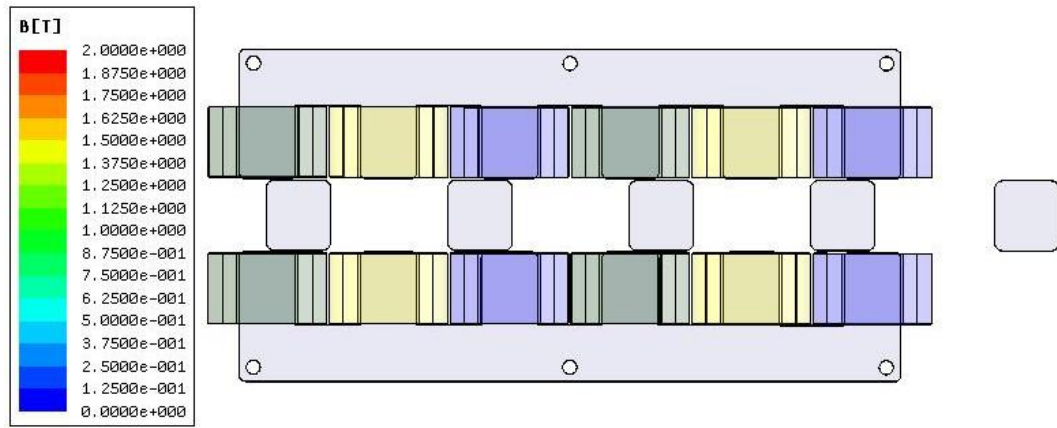
Çizelge 5.9. LARM-E modeline ait mekanik ve elektriksel parametreler

Faz Sayısı	3
Translator Kutbu Genişliği	20mm(2mm pah)
Translator Kutbu Aralığı	23 mm
Translator Kutup Yüksekliği	26 mm
Translator Derinliği	60 mm
Stator Kutup Genişliği	23mm(3mm pah)
Stator Derinliği	60 mm
Toplam Uzunluk	235 mm
Toplam Genişlik	118 mm
Hava Aralığı	0.6 mm
Çelik tipi	Steel 1010

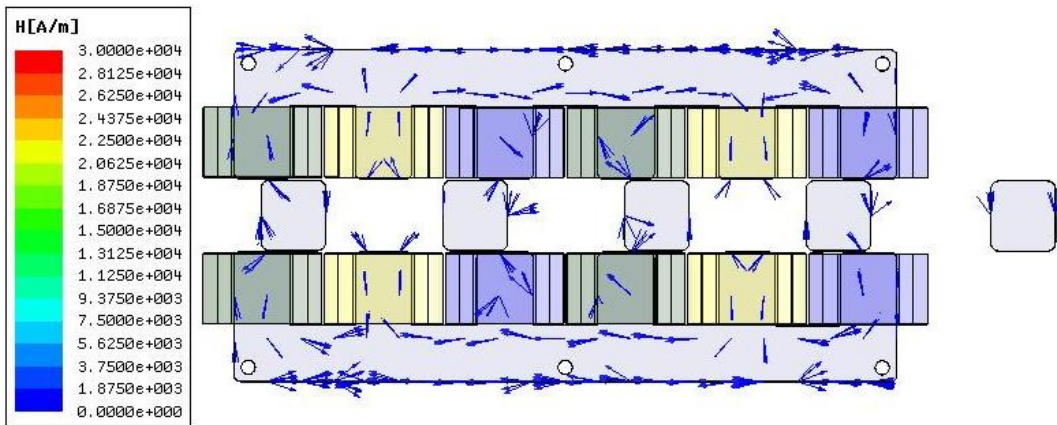


Şekil 5.87. LARM-E modelinin 3 boyutlu olarak görselleştirimi

Şekil 5.88 ve Şekil 5.89’da sırasıyla ayrıık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, sargı akımı 1 amper için verilmektedir.

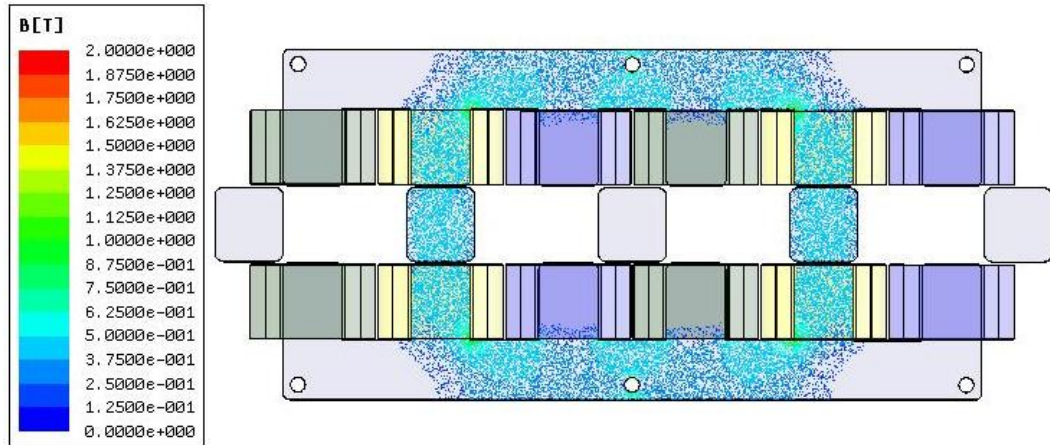


(a)

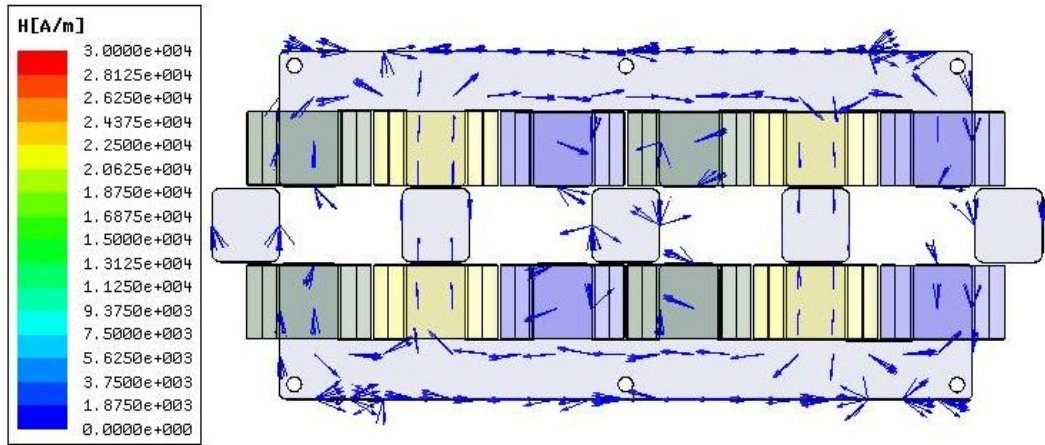


(b)

Şekil 5.88. LARM-E modelinin için, ayrıık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A)



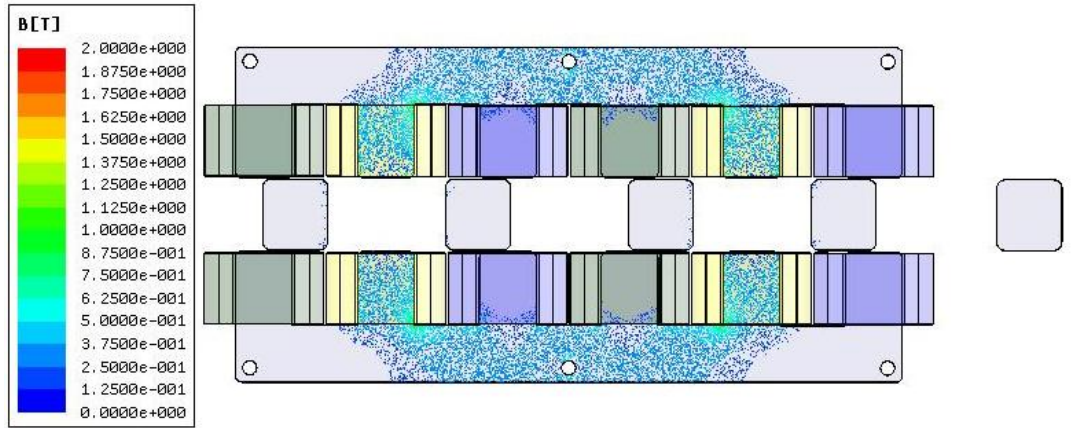
(a)



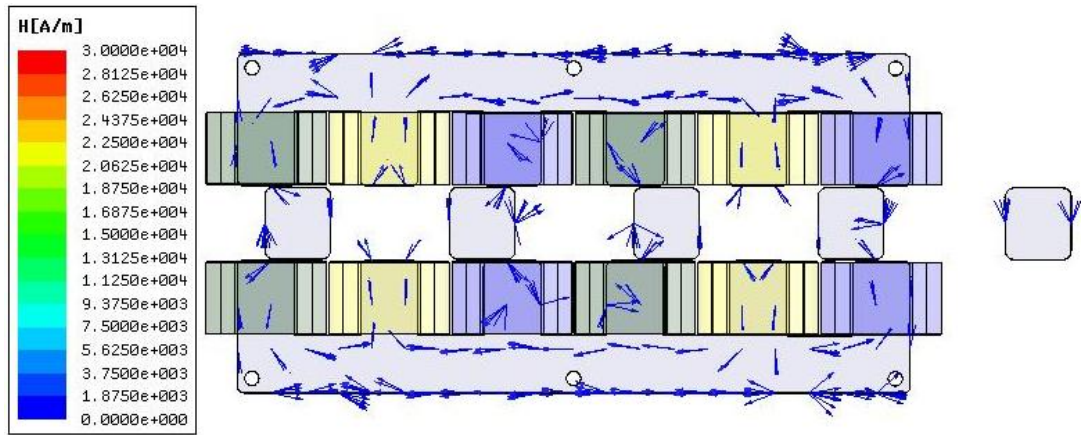
(b)

Şekil 5.89. LARM-E modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu (b) Manyetik alan şiddeti (1A)

Şekil 5.90 ve Şekil 5.91’da sırasıyla ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, sargı akımı 5 amper için verilmektedir.

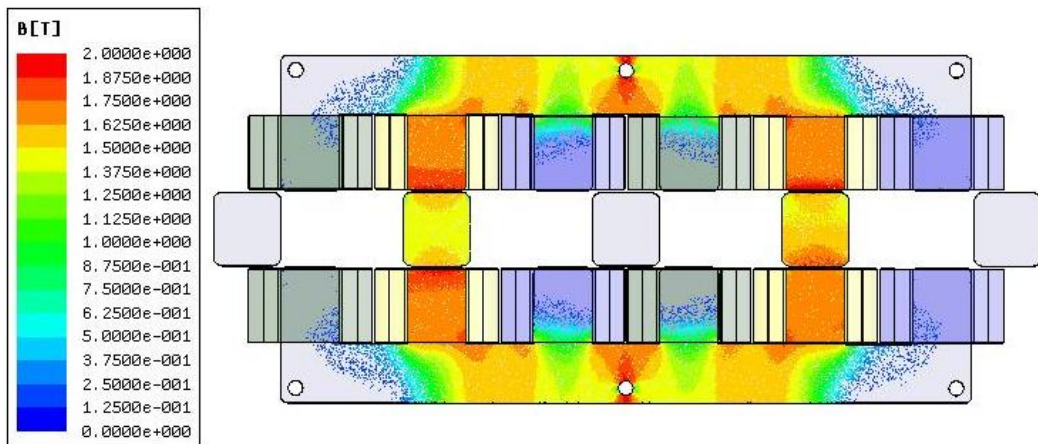


(a)



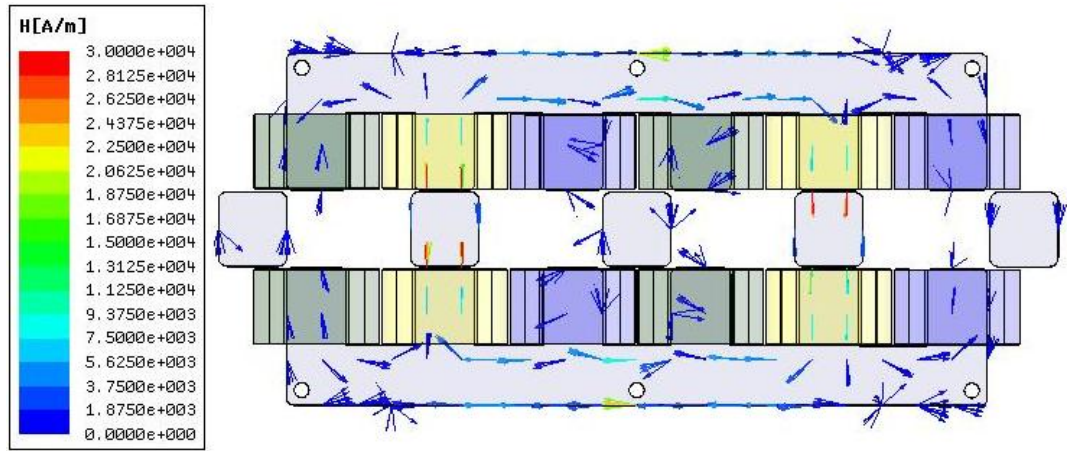
(b)

Şekil 5.90. LARM-E modelinin için, ayrıık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu
(b) Manyetik alan şiddeti (5A)



(b)

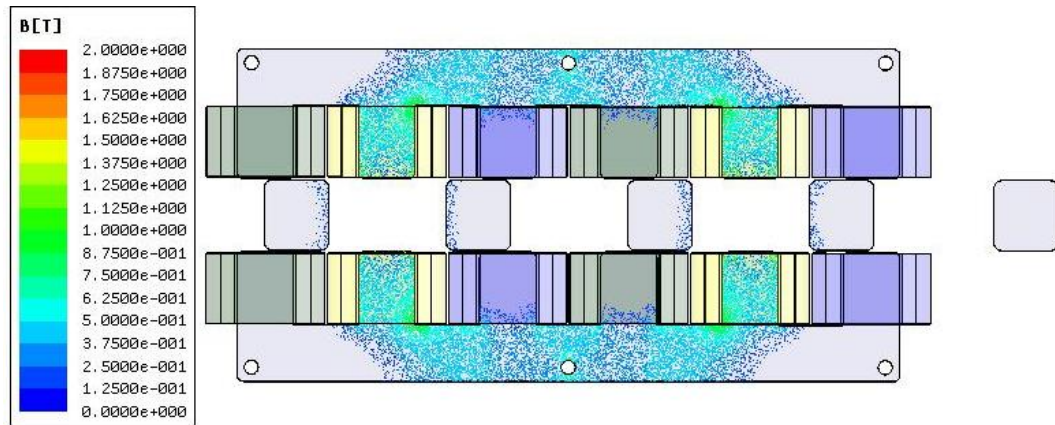
Şekil 5.91. LARM-E modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu



(b)

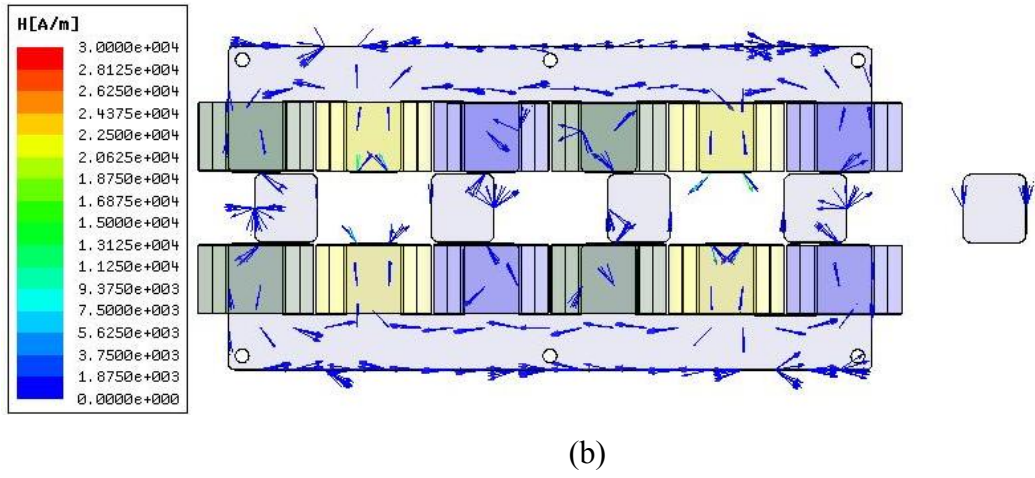
Şekil 5.91. LARM-E modelinin için, çakışık durumdaki (b) Manyetik alan şiddeti (5A)

Şekil 5.92 ve Şekil 5.93'te sırasıyla ayırık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve çakışık durumdaki manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, sargı akımı 8 amper için verilmektedir.

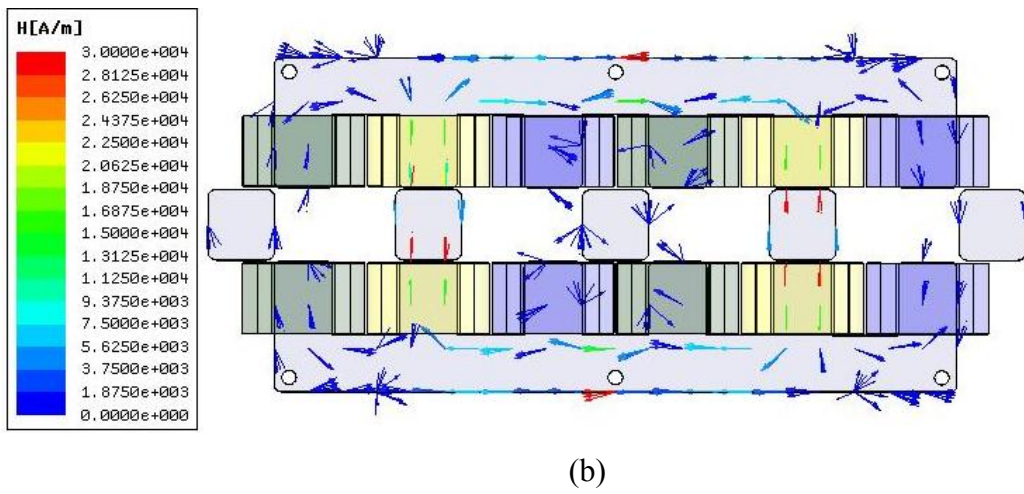
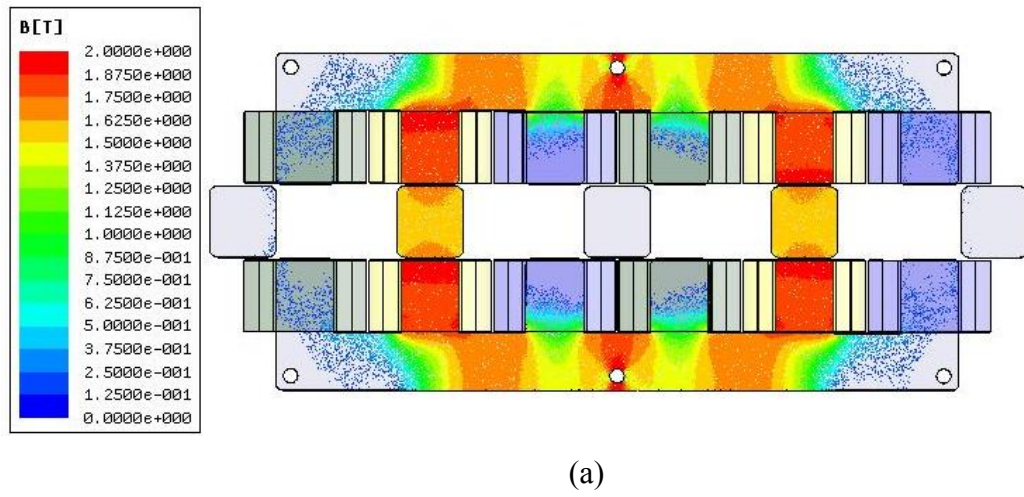


(a)

Şekil 5.92. LARM-E modelinin için, ayırık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu

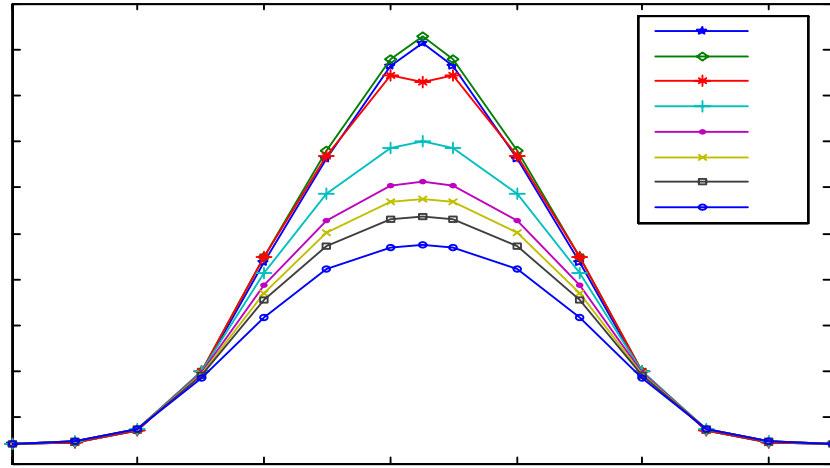


Şekil 5.92. LARM-E modelinin için, ayrıık durumdaki (b) Manyetik alan şiddeti (8A)



Şekil 5.93. LARM-E modelinin için, çakışık durumdaki (a) Manyetik akı yoğunluğu
(b) Manyetik alan şiddeti (8A)

LARM-E modelinin stator durumuna göre elde edilen endüktans değişimi Şekil 5.94'te verilmiştir. Şekildeki grafik motorun sonlu elemanlar yöntemi ile farklı uyarma ve stator konumları için tamamen ayrık konumundan çakışık durumuna kadar olan endüktans değişimini göstermektedir. LARM'nin bir fazına ait farklı akım ve farklı stator konumlarına göre endüktans değişimi Çizelge 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.94. LARM-E modelinin pozisyona göre akım-endüktans değişimi

$\times 10$

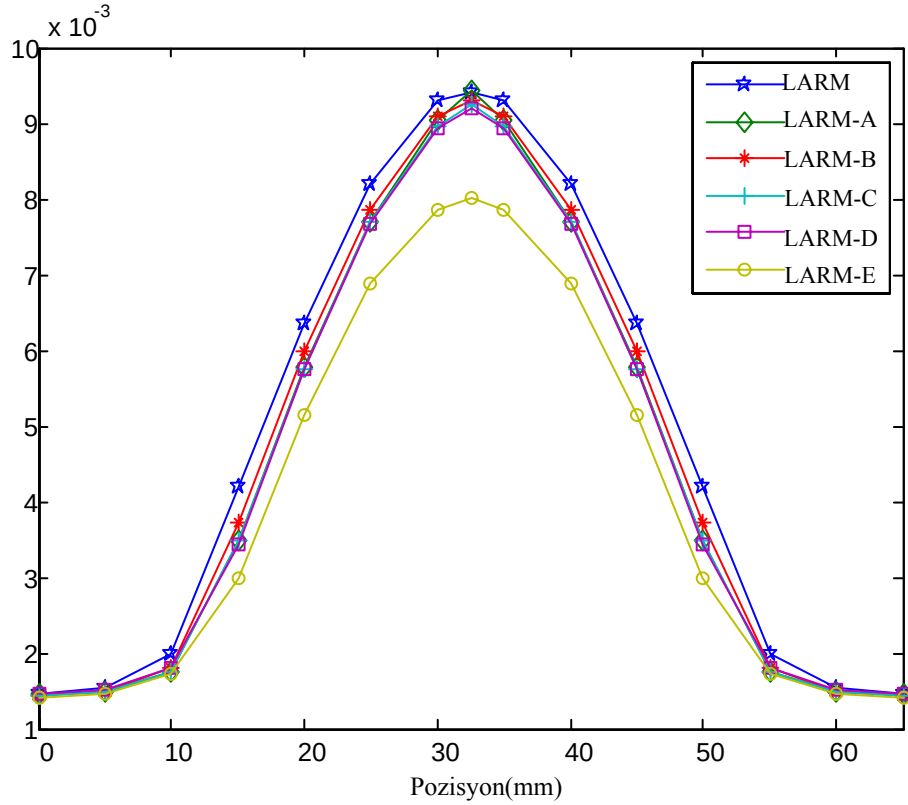
Çizelge 5.10. LARM-E modeline ait akım-pozisyon değişimine göre endüktans değerleri

10

Pozisyon(mm)	L (1A) mH	L (2A) mH	L (3A) mH	L (4A) mH	L (5A) mH	L (6A) mH	L (7A) mH	L (8A) mH
Ayrık(0)	0,001413	0,001414	0,001415	0,001418	0,001420	0,001420	0,001421	0,001422
5	0,001465	0,001467	0,001467	0,001470	0,001472	0,001473	0,001474	0,001475
10	0,001721	0,001722	0,001725	0,001732	0,001734	0,001734	0,001735	0,001736
15	0,002974	0,002990	0,003007	0,002999	0,002972	0,002949	0,002926	0,002871
20	0,005373	0,005478	0,005477	0,005150	0,004861	0,004713	0,004564	0,004184
25	0,007621	0,007788	0,007692	0,006876	0,006278	0,006000	0,005723	0,005228
30	0,009636	0,009796	0,009427	0,007865	0,007044	0,006679	0,006314	0,005704
Çakışık(32.5)	0,010148	0,010294	0,008998	0,008012	0,007138	0,006752	0,006366	0,005749
35	0,009636	0,009796	0,009427	0,007865	0,007044	0,006679	0,006314	0,005704
40	0,007621	0,007788	0,007692	0,006876	0,006278	0,006000	0,005723	0,005228
45	0,005373	0,005478	0,005477	0,005150	0,004861	0,004713	0,004564	0,004184
50	0,002974	0,002990	0,003007	0,002999	0,002972	0,002949	0,002926	0,002871
55	0,001721	0,001722	0,001725	0,001732	0,001734	0,001734	0,001735	0,001736
60	0,001465	0,001467	0,001467	0,001470	0,001472	0,001473	0,001474	0,001475
Ayrık(65)	0,001413	0,001414	0,001415	0,001418	0,001420	0,001420	0,001421	0,001422

5.10. Değerlendirme

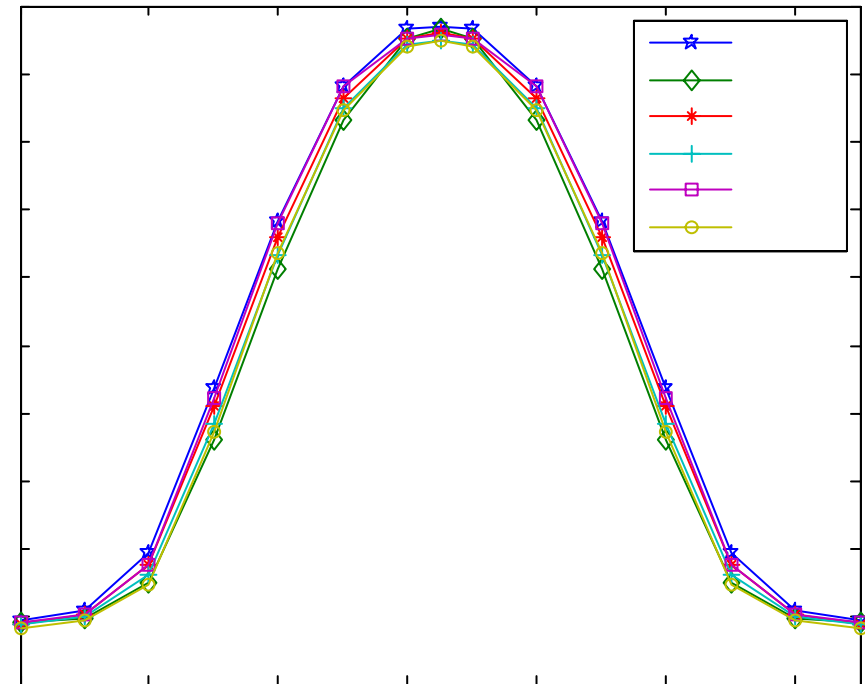
Çift taraflı 6/4 kutuplu LARM'nin, farklı kutup geometrilerine ait tasarım sonuçları Ansoft Maxwell 3D programında elde edilmiştir. Bu tasarımların statik manyetik simülasyon çözümleri ise üç boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanılarak gerçekleştirilmiş; endüktans, çekme kuvveti ve hava aralığı gücü değerleri tahmin edilmiştir. Birbirinden farklı kutup başı profillerinden alınan faz endüktanslarının, 4 amper akım için simülasyon sonuçlarına göre değişim grafikleri ve değerleri sırasıyla Şekil 5.95 ve Çizelge 5.11'de, 8 amper akım için simülasyon sonuçlarına göre değişim grafikleri ve değerleri sırasıyla Şekil 5.96 ve Çizelge 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.95. Farklı modellerin pozisyona göre endüktans değişimleri (4A)

Çizelge 5.11. Farklı modellerin pozisyona göre endüktans(mH) değerleri(4A)

Pozisyon(mm)	LARM (mH)	LARM-A (mH)	LARM-B (mH)	LARM-C (mH)	LARM-D (mH)	LARM-E (mH)
Ayrık(0)	0,001466	0,001457	0,001443	0,001434	0,001448	0,001418
5	0,001535	0,001490	0,001498	0,001483	0,001505	0,001470
10	0,001984	0,001744	0,001803	0,001742	0,001809	0,001732
15	0,004189	0,003500	0,003734	0,003498	0,003437	0,002999
20	0,006368	0,005776	0,005992	0,005750	0,005752	0,005150
25	0,008204	0,007693	0,007858	0,007692	0,007658	0,006876
30	0,009314	0,009028	0,009093	0,008971	0,008944	0,007865
Çakışık(32.5)	0,009410	0,009425	0,009312	0,009259	0,009208	0,008012
35	0,009314	0,009028	0,009093	0,008971	0,008944	0,007865
40	0,008204	0,007693	0,007858	0,007692	0,007658	0,006876
45	0,006368	0,005776	0,005992	0,005750	0,005752	0,005150
50	0,004189	0,003500	0,003734	0,003498	0,003437	0,002999
55	0,001984	0,001744	0,001803	0,001742	0,001809	0,001732
60	0,001535	0,001490	0,001498	0,001483	0,001505	0,001470
Ayrık(65)	0,001466	0,001457	0,001443	0,001434	0,001448	0,001418



Şekil 5.96. Farklı modellerin pozisyona göre endüktans değişimleri (8A)

$$6 \times 10^{-3}$$

Çizelge 5.12. Farklı modellerin pozisyona göre endüktans(mH) değerleri(8A)

Pozisyon(mm)	LARM (mH)	LARM-A (mH)	LARM-B (mH)	LARM-C (mH)	LARM-D (mH)	LARM-E (mH)
Ayrık(0)	0,001472	0,001463	0,001449	0,001439	0,001454	0,001422
5	0,001542	0,001496	0,001518	0,001500	0,001526	0,001475
10	0,001978	0,001751	0,001883	0,001808	0,001882	0,001736
15	0,003182	0,002799	0,003048	0,002918	0,003119	0,002871
20	0,004409	0,004057	0,004291	0,004172	0,004396	0,004184
25	0,005407	0,005164	0,005316	0,005243	0,005407	0,005228
30	0,005825	0,005766	0,005764	0,005713	0,005763	0,005704
Çakışık(32.5)	0,005851	0,005829	0,005797	0,005747	0,005789	0,005749
35	0,005825	0,005766	0,005764	0,005713	0,005763	0,005704
40	0,005407	0,005164	0,005316	0,005243	0,005407	0,005228
45	0,004409	0,004057	0,004291	0,004172	0,004396	0,004184
50	0,003182	0,002799	0,003048	0,002918	0,003119	0,002871
55	0,001978	0,001751	0,001883	0,001808	0,001882	0,001736
60	0,001542	0,001496	0,001518	0,001500	0,001526	0,001475
Ayrık(65)	0,001472	0,001463	0,001449	0,001439	0,001454	0,001422

Lineer Anahtarlama relüktans motorlarda stator geometrisi doğrudan elektriksel ve manyetik parametreleri etkilemektedir. LAR motorunda stator kutup genişliği, translator kutup genişliğinden büyük olmalıdır. Küçük veya eşit olduğu durumlarda kararsız denge konumu oluşması söz konusudur. Manyetomotor kuvvet sabit tutulduğunda stator profilindeki yapısal değişiklikler manyetik devrenin toplam relüktansını değiştirmektedir. Bunun sonucunda bağ akıları, endüktans, ko-enerji, güç ve elektromanyetik kuvvetlerde değişim meydana gelmektedir. Elektrik makinalarının genelinde olduğu gibi hava aralığının küçülmesi endüktansın, çekme kuvvetinin ve gücün artmasını sağlamaktadır.

Tasarımı ve imalatı yapılan modelde stator kutup aralığı ile translator kutup genişliği aynı olduğu için stator konumuna bağlı kararsız denge konumu oluşmaz. Fazın biri çakışık konumda, diğer faz da çakışmaya başlama konumundadır. Stator uzunluğunun büyük olmasından dolayı akı yolu kesiti büyüceği için relüktans azalmış, faz endüktansı artmıştır. Endüktansa bağlı olarak bağ akıları, ko-enerji, çekme kuvveti ve hava aralığı gücünde artış söz konusu olmuştur.

LARM-A modelinde stator genişliği, translator kutup aralığından 1mm daha azdır. Bu nedenle stator konumuna bağlı olarak kararsız denge oluşabilmektedir. Yani fazlardan biri tam çakışık durumda iken diğer faz çakışmaya başlamamıştır. Aynı zamanda stator genişliğinin küçük olması akı yolu kesitini de küçültmektedir. Buna bağlı olarak tasarlanan modele göre endüktans daha düşük olacak, dolayısıyla da bağ akıları, ko-enerji, çekme kuvveti ve hava aralığı gücü azalacaktır.

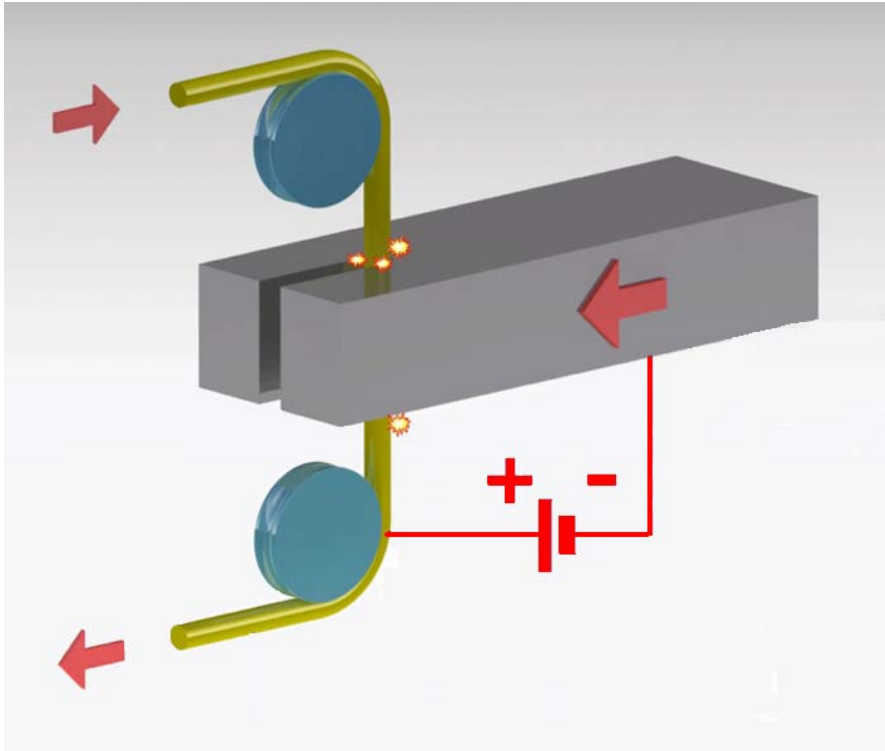
LARM-B modelinde stator genişliği translator kutup aralığından 2mm daha az, LARM-C modelinde ise 3mm daha azdır. Bu şekilde yapılarak LARM'nin toplam ağırlığı azaltılmak istenmiştir. Fakat kararsız durumun daha fazla artmış ve stator genişliğinin küçük olmasından dolayı akı yolu kesiti daha da küçülmüştür. Bu nedenle bu modellerde diğerlerine göre daha düşük endüktans değeri olmuştur. Buna bağlı olarak da bağ akıları, ko-enerji, çekme kuvveti ve hava aralığı gücünde azalma olmuştur.

Çakışmanın başladığı konumda kutup köşelerinde oluşan bölgesel doyumu azaltmak için LARM-D modelinde stator köşeleri, LARM-E modelinde ise hem stator hem translator köşeleri kesik yapılmıştır. Diğer bütün ölçüler sabit tutulmuştur. Fakat bu bölgelerde hava aralığının artması manyetik devrenin toplam relüktansını artırarak endüktansın azalmasına yol açmıştır. Bu durum diğer modellerde olduğu gibi bağ akılarını, ko-enerjiyi, çekme kuvvetini ve hava aralığı gücünü diğer modellere oranla daha da azaltmaktadır.

6. TASARIMI YAPILAN LARM'NİN İMALATI VE SİSTEMİN TASARIMI

6.1. LARM'nin İmalat Aşamaları

Fiziksel ve dinamik denklemleri ile geometrik boyutları belirlenerek analitik ve manyetik analizi yapılan LARM'nin elde edilen değerler doğrultusunda translator ve stator sacları tel-erozyon yöntemi ile kesilmiştir. Tel erozyon yönteminde, kesilecek sac ile kesecek olan tele zıt kutuptaki elektrik akımının verilmesiyle ve bu akımın hassasiyete göre dozaj yapılmasıyla tel, saca çok yaklaştırılarak oluşan arkların sacdan her seferinde düzinelerce zerrecik kopartması sonucu kesme işlemi yapılmaktadır. Şekil 6.1' de tel erozyon ile kesim işlemi gösterilmektedir. Resim 6.1'de kesilen sac rulosu ve kalıp gösterilmektedir.

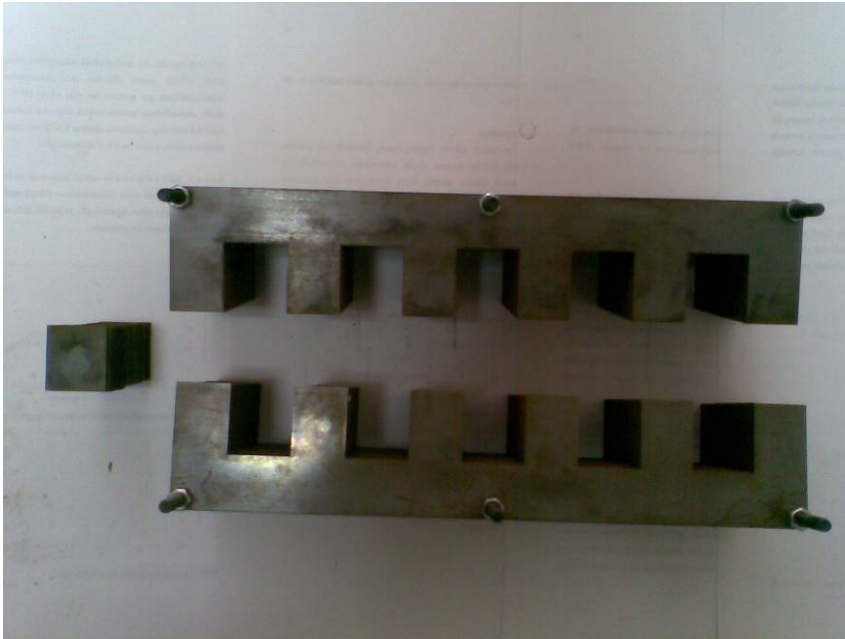


Şekil 6.1 Tel erozyon yöntemi ile kesim işlemi



Resim 6.1. Sac rulosu ve kalıp

Tasarlanan motorun gücüne göre yapılan hesaplamalar sonucu, translator ve stator derinliği 60mm hesaplanmış ve kalınlığı 0.3mm olan saclardan 200 tane üst üste koyularak paketlenmiştir. Resim 6.2’de translator ve stator saclarının paketlenmiş hali gösterilmektedir.



Resim 6.2. Paketlenmiş translator ve stator sacları

Motora uygulanacak gerilime göre siper sayısı 200 tur olarak hesaplanan ve çekilecek akıma göre kesiti $0,64\text{mm}^2$ olarak belirlenen bobinler sarılarak translatora yerleştirilmiştir. Resim 6.3’de translatora bobinlerin yerleşmiş hali gösterilmektedir.



Resim 6.3. Bobinlerin translatora yerleştirilmesi

Paketlenmiş stator sacları alüminyumdan yapılmış yuvalara yerleştirilerek çift taraflı translatorun izleyeceği yol meydana getirilmiştir. Stator yuvasının alüminyumdan yapılmasının nedeni, alüminyum malzemenin manyetik geçirgenliğinin ihmal edilebilecek kadar küçük olmasıdır. Böylece oluşturulan manyetik akı yoğunluğunda bir azalma olmaksızın çalışması sağlanmıştır. Resim 6.4’de stator yuvasının ve stator saclarının görünüşü verilmiştir.



Resim 6.4. Stator yuvası ve stator sacları

Son olarak stator kutupları çift taraflı translatorun arasında kalacak şekilde 800mm uzunluğundaki doğrusal hareketi sağlayacak düzener tasarlanmış ve otomatik kapıya montajı yapılabilir duruma getirilmiştir. Resim 6.5 ve Resim 6.6’da çift taraflı lineer anahtarlama relüktans motorun son hali gösterilmektedir.



Resim 6.5. Çift taraflı lineer anahtarlama relüktans motor



Resim 6.6. LARM makinesi ve sürücüsü

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde hassas konum kontrolü ve hızlı tepki istenen bir otomatik kapı tahriki için 250 W gücünde çift taraflı, 6/4 kutuplu, 3 fazlı bir Lineer Anahtarlama Relüktans Motor tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Sırasıyla dinamik denklemler ve uzay durum denklemleri çıkartılıp, geometrik boyutları belirlenip, analitik ve manyetik analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile manyetik devrenin çakışık ve ayırık durumlardaki endüktans ve kuvvet değişkenleri elde edilmiştir.

Motorun fiziksel boyutları matematiksel olarak elde edilerek sonlu elemanlar yöntemi ile farklı uyarma ve stator konumları için manyetik akı ve kuvvet değerleri statik olarak elde edilmiştir. Tasarımı yapılan motorun üç boyutlu modeli çıkartılarak elde edilen değerler doğrultusunda imalatı yapılmıştır.

Gerçekleştirilen analizler sonucunda görüldüğü gibi hava aralığının gücü direk olarak kayar kapıya aktararak sürtünmeler en aza indirilmiştir. Böylece istenilen çıkış büyüklüklerine ulaşıldığı görülmektedir. Bu sistemde motorda fırça ve kolektör olmadığı için sürtünme azaldığından motor verimi yüksektir. Ayrıca güç aktarımında kayış, kasnak ve redüktörden kaynaklanan kayıplar önlenmiş hem de fazladan kullanılan güç aktarma elemanları kaldırılarak maliyet ucuzlatılmıştır. Bu durumda tasarlanan LARM, bir otomatik kapının ihtiyaçlarına yeterince cevap verdiği görülmektedir.

Literatürde ARM tasarımı, analizi, karakteristik parametrelerinin belirlenmesi ve kontrolü için çok sayıda yapılmış çalışmalar ve yayınlar mevcuttur fakat yapılan araştırmalarda Lineer ARM için bu tür çalışmalara çok ender rastlanmaktadır.

İleriki aşamalarda çalışma yapacak olan araştırmacılara bu tezde detaylı olarak değinilmeyen su konular incelenebilir.

- LARM'nin gürültü ölçümleri ve analizleri,

- LARM'nin kullanılacağı uygulamaya göre optimum motor geometrisinin belirlenebilmesi, tasarımı ve mekanik hesaplamaları,
- Bu çalışmadaki LARM modelinden daha güçlü ve daha farklı bir LARM'nin (örneğin 10-20 KW, 12/8, 8/6 gibi) statik ve dinamik çalışma şartlarında davranışı,
- LARM'nin kompozit gibi farklı tür malzemelerle tasarımı ve analizi.

KAYNAKLAR

1. Dursun M., A. Saygın, “Bulanık mantık denetimli anahtarlamaalı relüktans motorla asansör tahriki”, **Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu, BMYS2005**, Kocaeli, 16-18 Kasım (2005).
2. Dursun M., Özden S., “Bulanık mantık denetimi ile asansör tahriki”, **Politeknik Dergisi**, 129-137 (2008).
3. Dursun M, Saygın A., “Bir asansör tahrik sistemi için bulanık mantık denetimli anahtarlamaalı relüktans motor sürücüsü tasarımı”, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi**, 12(2) (2006).
4. H. Sun Lim, R. Krishnan, and N. S. Lobo, “Design and control of a linear propulsion system for an elevator using linear switched reluctance motor drives”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 55(2) (2008).
5. W.-Chuen Gan, N. C. Cheung, and Li Qiu, “Position control of linear switched reluctance motors for high-precision applications”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, 39(5) (2003).
6. M. Min Thet, “Design and calculation of 75w three-phase linear switched reluctance motor”, **Proceedings Of World Academy Of Science, Engineering And Technology**, 36:2070-3740 (2008).
7. L. Kolomeitsev, D. Kraynov, S. Pakhomin, F. Rednov, E. Kallenbach, V. Kireev, T. Schneider, J. Böcker, “Linear switched reluctance motor as a high efficiency propulsion system for railway vehicles”, **SPEEDAM 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion**; (2008).
8. L. Yuan-Jiang, G.P.Widdowson, S.Y.Ho, Gan Wai Chuen & P. Borsje, “Design and analysis of linear switched reluctance motor for high precision position control”, **Electric Machines & Drives Conference**, 1:55 – 58 (2007).
9. F. Daldaban, N. Ustkoyunc, “A new double sided linear switched reluctance motor with low cost”, **Energy Conversion and Management** 2983–2990 (2006).
10. S.-M. Jang¹, Ji-H.Park, D.-J. You, H.-W. Cho¹, Ho-K. Sung, “Design of high speed linear switched reluctance motor”, **Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems**, Oct. 8~11, Seoul, Korea (2007).
11. J. L. Domingos, D. A. Andrade, M. A. A. Freitas, H. De Paula, “A new drive strategy for a linear switched reluctance motor”, **Electric Machines and Drives Conference**, 3:1714 – 1719 (2003).

12. Kyung Bae H., Seok Lee B., Vijayraghavan P., and Krishnan R., "A linear switched reluctance motor: converter and control" **IEEE Transactions on Industry Applications**, 36(5) (2000)
13. Liu X, Ye YY, Zheng Z., "Magnetic field and performance analysis of a tubular permanent magnet linear synchronous motor applied in elevator door system", **Journal Of Zhejiang University-Science A**, 9(4):572-576 (2008).
14. Fenercioglu A., Dursun M., "Design and magnetic analysis of a double sided linear switched reluctance motor" **Przeglad Elektrotechniczny**, 86(5):78-82 (2010).
15. Elmas, C., Sagiroglu, S., Colak, I., Bal, G. "Modelling of a nonlinear switched reluctance drive based on artificial neural networks", **Proceedings of PowerElectronics and Variable-Speed Drives**, 7 - 12 (1994).
16. Elmas, C., Bay, Ö. F. "Modelling and operation of a nonlinear switched reluctance motor drive based on fuzzy logic", **Proceedings of EPE**, 3:592 - 597 (1995).
17. Dursun, M., "Anahtarlamalı relüktans motorla su pompası tahriki" , Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 68-87 (2002).
18. Dursun M ,Özbay H ,Koç F "Lineer motorlu asansör kapı tahrik sistemi" **Asansör Sempozyumu** 21-23 Mayıs İzmir (2010).
19. Bae HK, Lee BS, Vijayraghavan P, "A linear switched reluctance motor: Converter and control", **IEEE Transactions on Industry Applications**, 36(5):1351-1359 (2000).
20. Krishnan R., "Propulsion with and without wheels", **IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)**, 1(2):11-19 (2005).
21. Liu X, Ye YY, Zheng Z., "A novel tubular permanent magnet linear synchronous motor used for elevator door " **Conference Information: International Conference on Electrical Machines and Systems**, 1:1277-1280 (2007).
22. Jia YH, Wu HX, Kou BQ., "Research on position sensor magnetic encoder based on the elevator door machine servo system", **Conference Information: 3rd International Conference on Sensing Technology**, 431-434 (2008).
23. Dursun M., Saygın A., "Güneş enerjisi ile çalışan bir sulama sistemi için boost konvertörlü anahtarlamalı relüktans motor sürücüsü", **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 22(1-2):57-65 (2006).
24. Arreola, R.B. "Nonlinear control design for a magnetic levitation system". M.Sc. Thesis, **University of Toronto**, Canada (2003).

25. Gan, W.C. and Cheung, N.C. "Design of a linear switched reluctance motor for high precision applications," **IEEE International, Electric Machines and Drives Conference**, June (2001).
26. Gieras, J.F. and Piech Z.J. "Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems". **CRC Press LLC** U.S.A. (2000).
27. Kaw Krishnan, R. "Switched Reluctance Motor Drives: Modelling, Simulation, as Analysis, Design, and Applications", **CRC, Press LLC** U.S.A. (2001).
28. Lee, B.S., Bae, H.K., Vijayraghavan, P. and Krishnan, R. "Design of a linear switched reluctance machine", **Conference of IEEE, Industry Appl. J Soc. (IAS '99)**, 1:547-554 (1999).
29. Miller, T.J.E. "Switched Reluctance Motors and Their Control". **Magna Physics Publishing and Clarendon Press**, Oxford, UK. (1993).
30. Miller, T.J.E. "Optimal design of switched reluctance motors" **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, February, 49(1):15-26 (2002).
31. R. Randun, A.V., "Design considerations for the switched reluctance motor". **IEEE Transactions on Industry Applications**, 31:1049-1087 (1995).
32. Freitas, H. De Paula, "A new drive strategy for a linear switched reluctance motor", **Electric Machines and Drives Conference**, 3:1714 – 1719 (2003).
33. Dizenzo, P.T., "Switched reluctance motor control-basic operation and example using the TMS320F240", **Texas Instruments Application Report, SPRA420A**, 1-20 (2000).
34. Miller, T.J.E., McGlip, M.I., Olaru, M., "Finite elements applied to synchronous and switched reluctance motors", **IEE seminar on Current Trends in the Use of Finite Elements (FE) in Electromechanical Design and Analysis, London** 1-3 (2000).
35. Krishnan, R. "Switched Reluctance Motor Drives", **CRC Press**, Florida, 1-169 (2001).
36. Tang, Y., "Characterization, numerical analysis, and design of switched reluctance motors", **IEEE Transactions on Industry Applications**, 33(6):1544-1552 (1997).
37. Vijayraghavan, P., "Design of switched reluctance motors and development of a universal controller for switched reluctance and permanent magnet brushless dc motor drives", **Doktora Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University**, Virginia, 1-48 (2001).

38. Sharma, V.K., Murthy, S.S., Singh, B. "An improved method for the determination of saturation characteristics of switched reluctance motors", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 48(5):6 (1999).
39. Vujicic, V., Vukosevic, S.N., "A simple nonlinear model of the switched reluctance motor", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 15(4):395-400 (2000).
40. Krihsnan, R., Arumugan, R., Lindsay, J.F., "Design procedure for switched-reluctance motors" *IEEE Transaction on Industry Applications*, 24(3):456-461 (1988).
41. Tang, Y., Kline, J.A., "Modelling and design optimization of switched reluctance machine by boundary element analysis and simulation", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 11(4):673-680 (1996).
42. Anwar M.N., Husain I., Radun, A., "A comprehensive design methodology for switched reluctance machines", *IEEE Transactios on Industry Applications*, 37(6):1684-1692 (2001).
43. Chancharoensook, P., Rahman M.F., "Determination of magnetization and static torque characteristics of a four-phase switched reluctance motor: Experimental Investigations", *2001 Australasian Universitites Power Engineering Conference Perth, Australia*, 613-618 (2001).
44. Sahin, F., Ertan, H.B., Leblebicioglu, K., "Optimum geometry for torque ripple minimization of switched reluctance motors", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 15(1):30-39 (2000).
45. Cai, W., Pillay, P., Reichert, K., "Accurate computation of electromagnetic forces in switched reluctance motors", *Electrical Machines and Systems, ICEMS 2001 Fifth International Conference*, Shenyang, China, 2:1065-1071 (2001).
46. Takyama, K., Takasaki, Y., Ueda, R., Sonoda, T., "Thrust force distribution on the surface of stator and rotor poles of switched reluctance motors", *IEEE Transactions on Magnetics*, 25(5):3997-3999 (1989).
47. Çetin, A., "Bir anahtarlama relüktans motorun hibrid gözlemci ile pozisyon algılayıcısız çalıştırılması", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 48-55 (2002).
48. Krishnan, R., Arumugam, R., James, F. L., "Design procedure for switched reluctance motors", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, 24(3):456-461 (1988).

49. Fenercioğlu, A., “Helisel yapılı anahtarlama relüktans motorun (hy-arm) tasarımı ve analizi” Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 3-32 (2006).
50. Özden, S., “Bir elektrikli asansör sisteminin bulanık mantık tekniği ile denetimi” Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-33 (2007).
51. Dursun, M., Saygın, A., “Eğitim amaçlı bir asansör sisteminin benzetimi”, **6th International Educational Technology Conference**, North Cyprus, 576-586 (2006).
52. Yigit, T., “Genetik uyarlamalı denetleyici ile anahtarlama relüktans motorun hız denetiminin gerçekleştirilmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-100 (2005).
53. Bal, G., “Özel Elektrik Makinaları”, **Seçkin Yayıncılık**, Ankara, 155-175 (2004).
54. Miller, T.J.E., “Electronics Control of Switched Reluctance Machines”, **Newnes PES**, Oxford (2001).
55. Gürdal, O., “Elektrik Makinalarının Tasarımı”, **Atlas Yayın Dağıtım**, İstanbul, 201-240 (2001).
56. Rasmussen, P.O., “Design and advanced control of switched reluctance motors”, Doktora Tezi, **Aalborg University Institute of Energy Technology, Denmark**, 1-99 (2002).
57. Bausch, H. and Reike B., “Speed and Torque Control of Thyristor-Fed Reluctance Motors”, **Proceedings ICEM**, Vienna, 128.1-128.10 (1978).
58. Güvenç, U., “Anahtarlama relüktans motorun denetimi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 14-15 (2005).
59. Dursun, M., Saygın A., “Bulanık mantık denetimli anahtarlama relüktans motorla asansör tahriki”, **Gazi Üniversitesi BAP projesi sonuç raporu**, Ankara, 15-120 (2005).
60. Schmitt, M., McGilp, M., “Nonlinear Theory of the Switched Reluctance Motors”, **PCIM Magazine**, 22–30 (1997).
61. Miller, T.J.E., McGilp, M.I., Olaru, M., “Finite elements applied to synchronous and switched reluctance motors”, **IEEE seminar on Current Trends in the Use of Finite Elements (FE) in Electromechanical Design and Analysis**, London 1-3 (2000).

62. Dursun M., Özbay H., Koç F., Özden S., “Design of linear switched reluctance motor driver for automatic door application” , ***International Conference On Informatic and Power Electronic***, Chengdu, China, (2010).
63. Dursun M., Koç F.,Ozbay H., “Determination of geometric dimensions of a double sided linear switched reluctance motor”, ***ICEMPE 2010,International Conference on Electrical Machines and Power Electronics***, 27-29 October Paris, France, (2010).
64. Suresh, G., Fahimi, B., Rahman, K.M., Ehsani, M., “Inductance based position encoding for sensorless SRM drives” , ***IEEE Power Electronics Specialists Conference***, 2:832-837 (1999).
65. Gao, H., Salmasi, F.R., Ehsani, M., “Inductance model-based position encoding for sensorless control of the switched reluctance motor drive at low speed” , ***IEEE Transactions on Power Electronics***, 19(6):1568-1573, (2004).
66. Üstkoyuncu N., “Anahtarlamaalı doğrusal hareketli relüktans motor tasarımı”, Doktora Tezi, ***Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Erciyes, 28-42 (2010)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖZBAY, Harun
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 26.08.1984 Bursa
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (228) 213 06 44
 e-mail : harun.ozbay@bilecik.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Elektrik Öğrt.	2008
Lise	Demirtaşpaşa A.T.L.	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009-	Bilecik Üniversitesi M.Y.O.	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Mahir DURSUN, Harun ÖZBAY (2011). Design and analysis of a double sided linear switched reluctance motor driver for elevator door. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), , ISSN 0033-2097, R. 87 NR 5/2011(293-296).
2. Dursun M ,Özbay H ,Koç F “Lineer motorlu asansör kapı tahrik sistemi” Asansör Sempozyumu 21-23 Mayıs İzmir, 2010.

3. Dursun M., Özbay H., Koç F., Özden S., “Design of linear switched reluctance motor driver for automatic door application”, International Conference On Informatic and Power Electronic, Chengdu, China, (2010).
4. Dursun M., Koç F.,Ozbay H., “Determination of geometric dimensions of a double sided linear switched reluctance Motor”, ICEMPE 2010, International Conference on Electrical Machines and Power Electronics,, 27-29 October Paris, France,2010, (2010).

Hobiler

Teknoloji, Futbol, Bilgisayar, Kitap okumak