

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR MİKROROBOTUN DÜZLEMSEL
HAREKETİNİN ELEKTROMANYETİK
AKTÜATÖR YARDIMIYLA KONTROLÜ**

Hasan ÇEVİK

Haziran, 2015
İZMİR

BİR MİKROROBOTUN DÜZLEMSEL HAREKETİNİN ELEKTROMANYETİK AKTÜATÖR YARDIMIYLA KONTROLÜ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Hasan ÇEVİK

Haziran, 2015

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

HASAN ÇEVİK, tarafından YRD. DOÇ. DR. LEVENT ÇETİN yönetiminde hazırlanan "BİR MİKROROBOTUN DÜZLEMSEL HAREKETİNİN ELEKTROMANYETİK AKTÜATÖR YARDIMIYLA KONTROLÜ" başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Yrd. Doç. Dr. Levent ÇETİN

Yönetici



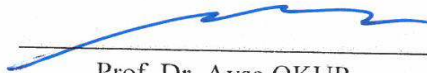
Yrd. Doç. Dr. Ayşen Baltacı

Jüri Üyesi



Yrd. Doç. Dr. Özgür Tamer

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışması sürecinde her türlü bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Levent ÇETİN' e, 111M182 nolu "6 serbestlik dereceli mikro robot için temassız elektromanyetik aktüatör sisteminin tasarımı ve üretimi" başlıklı TÜBİTAK projesine ve proje yürütücüsü Yrd. Doç. Dr. Aysun Baltacı' ya, teknik ve fikir paylaşımlarından dolayı Araş. Gör. B. Oğuz GÜRSES' e, elektronik donanım tasarımı konusundaki yardımlarından dolayı Mak. Yük. Müh. İsmet ATEŞ' e, her daim yanımda olan aileme ve eşim Mak. Müh. Merve Hilal ÇEVİK' e sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Hasan ÇEVİK

BİR MİKROROBOTUN DÜZLEMSEL HAREKETİNİN ELEKTROMANYETİK AKTÜATÖR YARDIMIYLA KONTROLÜ

ÖZ

Bu çalışma, tek eksenli sistematik hareket kabiliyetine sahip kutup çiftlerinden oluşan elektromanyetik aktüatör sistemi ile mikrorobotun yatay düzlem üzerinde temassız hareketinin gerçekleştirilmesine yönelik yeni bir metot ileri sürmektedir. Elektromanyetik kutup çiftlerinin konum ve akım kontrolü ile aktüatör sistemi tarafından meydana getirilen manyetik alan karakterinin, belirli bir çalışma alanında biçimlendirilmesi gerçekleştirilmektedir. Manyetik alan karakteri biçimlendirilmesi ile çalışma alanı üzerinde, manyetik akı yoğunluğunun şiddetinin ve yönünün kontrolü sağlanmaktadır. Manyetik akı yoğunluğu şiddeti ve yönü, mikrorobot üzerine etkiyecek manyetik tork ve kuvvetin şiddetini ve yönünü belirleyerek hareketi gerçeklemektedir. Ayrıca, elektromanyetik kutup çiftlerinin konum kontrolü ile mikrorobotun hareketini gerçekleyecek manyetik akı yoğunluğu özelliklerine sahip çalışma alanının, düzlem üzerinde yer değiştirebilmesi sağlanmaktadır. Tasarlanan aktüatör sisteminin bu özelliği, mikrorobota daha geniş bir çalışma alanında hareket kabiliyeti kazandırmaktadır.

İlk olarak, mikrorobota belirli bir çalışma alanında gerekli hareket enerjisini sağlayacak elektromanyetik aktüatör sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı meydana getiren tüm yapısal ve işlevsel parametreler; elektromanyetik teori ve nümerik analiz yöntemleri kullanılarak geliştirilen sistematik tasarım metodu ile belirlenmiştir.

Sonrasında, belirlenen çalışma alanının genişletilmesine yönelik olarak elektromanyetik kutup sisteminin sistematik hareketi yapılandırılmıştır.

Son olarak ise, üretilen elektromanyetik aktüatör sistemi tarafından hareketi gerçekleşen, belirli özelliklere sahip mikrorobotun çalışma alanı üzerindeki hareketi incelenmiş ve iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Elektromanyetik aktüatör, mikrorobot, temassız hareket, manyetik alan, konum kontrolü, akım kontrolü

PLANAR MOTION CONTROL OF A MICROROBOT BY USING ELECTROMAGNETIC ACTUATOR

ABSTRACT

This study proposes a new contactless actuation method for planar motion of a microrobot, which uses an electromagnetic actuator system consists of pole pairs which can make uniaxial systematic movement. Magnetic field on the work space, is obtained by controlling the position and current of the electromagnetic poles. The strength and direction of magnetic flux density on the work space is controlled by generated magnetic field. Eventually, the magnetic flux density on work space determines the strength and direction of the magnetic torque and force. Also, the work space can be enhanced by the motion of the electromagnetic poles. This feature of the designed actuator system is to move microrobot move on larger work space.

Firstly, electromagnetic actuator system was designed which provides the necessary kinetic energy to move on the ROI for microrobot. All structural and functional design parameters were determined by systematic design method which was developed by using electromagnetic theory and numerical analysis methods.

Secondly, the systematic movement of the electromagnetic poles was configured to extend the work area.

Finally, the microrobot 2D movement, that is generated by electromagnetic actuator system, was examined on the experiments setup and the improvement works were carried out.

Keywords: Electromagnetic actuator, microrobot, contactless actuation, magnetic field, position control, current control

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ	xv
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ – ELEKTROMANYETİK AKTÜATÖR SİSTEMİ TASARIMI..	5
2.1 Hareket Ettirilmesi Amaçlanan Mikrorobotun Özellikleri.....	5
2.2 Mikrorobotun Yönlendirilmesi	6
2.2.1 Mikrorobotun Yönlendirilmesini Gerçekleyecek Elektromanyetik Teori.	6
2.2.2 Mikrorobotun Yönlendirilmesini Gerçekleyecek Elektromanyetik Sistem Tasarımı.....	10
2.2.2.1 Tek Bir Elektromanyetik Kutup ile Homojen Manyetik Alan Oluşturulmasına Yönelik Çalışmalar	10
2.2.2.2 Elektromanyetik Kutup Çiftleri ile Homojen Manyetik Alan Oluşturulmasına Yönelik Çalışmalar	11
2.2.2.2.1 Konum Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Yatay Düzlem Üzerinde Oluşan Homojen Manyetik Alan Karakterinin İncelenmesi	13
2.2.2.2.2 Akım Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Yatay Düzlem Üzerinde Oluşan Homojen Manyetik Alan Karakterinin İncelenmesi	17
2.2.2.3 Farklı Doğrultularda Homojen Manyetik Alan Oluşturulmasına Yönelik Çalışmalar.....	19

2.2.2.3.1 Konum Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Nüvelerin Homojen Manyetik Alan Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	21
2.2.2.3.2 Akım Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Nüvelerin Homojen Manyetik Alan Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	23
2.3 Mikrorobotun Doğrusal Hareketi	25
2.3.1 Mikrorobotun Doğrusal Hareketini Gerçekleyecek Elektromanyetik Teori	25
2.3.2 Mikrorobotun Doğrusal Hareketini Gerçekleyecek Elektromanyetik Sistem Tasarımı.....	28
2.3.2.1 Tek Bir Elektromanyetik Kutup ile Düzgün Değişen Manyetik Alan Oluşturulmasına Yönelik Çalışmalar	29
2.3.2.2 Elektromanyetik Kutup Çiftleri ile Düzgün Değişen Manyetik Alan Oluşturulmasına Yönelik Çalışmalar	29
2.3.2.2.1 Konum Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Yatay Düzlem Üzerinde Oluşan Düzgün Değişen Manyetik Alan Karakterinin İncelenmesi	30
2.3.2.2.2 Akım Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Yatay Düzlem Üzerinde Oluşan Düzgün Değişen Manyetik Alan Karakterinin İncelenmesi	34
2.3.2.3 Farklı Doğrultularda Düzgün Değişen Manyetik Alan Oluşturulmasına Yönelik Çalışmalar	36
2.3.2.3.1 Konum Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Nüvelerin Düzgün Değişen Manyetik Alan Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	37
2.3.2.3.2 Akım Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Nüvelerin Düzgün Değişen Manyetik Alan Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	39
2.4 Mikrorobotun Düzlemde Hareketini Gerçekleyecek Elektromanyetik Kutup Sisteminin Tasarımı ve Yapısal - İşlevsel Parametrelerin Belirlenmesi	41
2.5 Kutup Çiftlerinin Konum Kontrolü ile Çalışma Alanının Genişletilmesi.....	49

BÖLÜM ÜÇ – DONANIM TASARIMI VE ÜRETİMİ.....56

3.1 Mekanik Donanım Tasarımı ve Üretimi	56
3.1.1 Elektromanyetik Kutuplar	56
3.1.2 Doğrusal Hareket Sistemleri.....	57
3.1.3 Elektromanyetik Kutupların Doğrusal Hareket Sistemlerine Entegre Edilmesi.....	58
3.1.4 Hareketli Elektromanyetik Kutupların Ana Şasiye Montajı	59
3.1.5 Çalışma Alanının Ana Sisteme Entegre Edilmesi	60
3.1.6 Görüntüleme Sisteminin Ana Sisteme Entegre Edilmesi	61
3.2 Elektronik Donanım Tasarımı ve Üretimi.....	62
3.2.1 Akım Kontrol Donanımı.....	62
3.2.1.1 Elektromanyetik Kutup Sürücü Kartları	63
3.2.1.2 Akım Kontrol Kartı.....	65
3.2.1.3 Güç Kaynakları	66
3.2.1.4 Kumanda.....	66
3.2.2 Konum Kontrol Donanımı	67
3.2.2.1 Adım Motorlar	68
3.2.2.2 Adım Motor Sürücü Kartları.....	68
3.2.2.3 Konum Kontrol Kartı.....	69
3.2.2.4 Limit Anahtarları	69
3.2.2.5 Güç Kaynağı	69
3.2.2.6 Kumanda.....	70
3.2.3 Eksenel Fan Tarafından Soğutmalı Elektronik Donanım Paneli	70

BÖLÜM DÖRT – YAZILIM.....71

4.1 Akım Kontrol Yazılımı	71
4.2 Konum Kontrol Yazılımı	72

BÖLÜM BEŞ – DENEYSEL ÇALIŞMA.....	74
5.1 Elektromanyetik Aktüatör Sistemi Kurulumu.....	74
5.2 Mikrorobotun Düzlemsel Hareketinin İncelenmesi	75
5.3 Mikrorobotun Genişletilmiş Çalışma Alanında Hareketinin İncelenmesi	78
BÖLÜM ALTI – SONUÇ VE ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR	84

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Damar tıkanıklığı hastalığında mikrorobotlarla operasyon	1
Şekil 1.2 Helmholtz, Maxwell ve Saddle kutup çiftlerinden oluşan elektromanyetik aktüatör.....	2
Şekil 1.3 Helmholtz ve Maxwell kutup çiftlerinden oluşan elektromanyetik aktüatör.....	3
Şekil 1.4 Octomag.....	4
Şekil 2.1 Mikrorobot.....	5
Şekil 2.2 Yatay düzlemde bulunan mikrorobotun, homojen manyetik alanın etkisi ile üzerine etkiyen manyetik tork.....	8
Şekil 2.3 Tek bir elektromanyetik kutup tarafından oluşturulan manyetik akı yoğunluğu değişimi ve manyetik alan haritası.....	11
Şekil 2.4 Elektromanyetik kutupların yapısal parametreleri.....	12
Şekil 2.5 Elektromanyetik kutup çiftlerinin işlevsel parametreleri.....	13
Şekil 2.6 Konum parametrelerinin $L_{+X}=100$ mm ve $L_{-X}=100$ mm olduğu durumda manyetik akı yoğunluğu değişimi ve manyetik alan haritası	15
Şekil 2.7 Köşegen doğrusu üzerinde manyetik akı yoğunluğu X ve Y eksen bileşenlerinin değişimi	16
Şekil 2.8 Değişken konum parametrelerine bağlı, köşegen doğrusu üzerinde manyetik akı yoğunluğu X ve Y eksen bileşenlerinin değişimi.....	17
Şekil 2.9 Değişken akım parametrelerine bağlı, köşegen doğrusu üzerinde manyetik akı yoğunluğu X ve Y eksen bileşenlerinin değişimi.....	18
Şekil 2.10 Kutup çiftlerinin yatay düzleme yerleşimi ve işlevsel parametreler.....	20
Şekil 2.11 Y ekseninde bulunan kutup nüvelerinin homojen manyetik alana etkisi	22
Şekil 2.12 Konum değişimi ile Y ekseninde bulunan kutup nüvelerinin homojen manyetik akı yoğunluğu bileşenleri üzerine etkisi	22
Şekil 2.13 Akım değişimi ile Y ekseninde bulunan kutup nüvelerinin homojen manyetik akı yoğunluğu bileşenleri üzerine etkisi.....	24
Şekil 2.14 Yatay düzlemde yönlendirilmiş mikrorobotun, düzgün değişen manyetik	

alanın etkisi ile üzerine etkiyen manyetik kuvvet	25
Şekil 2.15 Konum parametrelerinin $L_{+X}=100$ mm ve $L_{-X}=100$ mm olduğu durumda manyetik akı yoğunluğu değişimi ve manyetik alan haritası	31
Şekil 2.16 Köşegen doğrusu üzerinde manyetik akı yoğunluğu X ve Y eksen bileşenlerinin değişimi	33
Şekil 2.17 Değişken konum parametrelerine bağlı, köşegen doğrusu üzerinde manyetik akı yoğunluğu X ve Y eksen bileşenlerinin değişimi.....	34
Şekil 2.18 Değişken akım parametrelerine bağlı, köşegen doğrusu üzerinde manyetik akı yoğunluğu X ve Y eksen bileşenlerinin değişimi.....	35
Şekil 2.19 Y ekseninde bulunan kutup nüvelerinin düzgün değişen manyetik alana etkisi	38
Şekil 2.20 Konum değişimi ile Y ekseninde bulunan kutup nüvelerinin düzgün değişen manyetik akı yoğunluğu bileşenleri üzerine etkisi.....	38
Şekil 2.21 Akım değişimi ile Y ekseninde bulunan kutup nüvelerinin düzgün değişen manyetik akı yoğunluğu bileşenleri üzerine etkisi.....	40
Şekil 2.22 Elektromanyetik aktüatör sistemini oluşturan kutup çiftlerinin yatay düzleme yerleşimi	41
Şekil 2.23 Mikrorobotun X ekseninde hareketini gerçekleyecek kutup hareketleri konfigürasyonu.....	43
Şekil 2.24 Mikrorobotun Y ekseninde hareketini gerçekleyecek kutup hareketleri konfigürasyonu.....	44
Şekil 2.25 Mikrorobotu X eksenine paralel yönlendirecek manyetik alan haritası .	46
Şekil 2.26 X eksenine paralel yönlendirilmiş mikrorobota, aynı eksen üzerinde doğrusal hareket yaptıracak manyetik alan haritası	47
Şekil 2.27 X eksen kutup çiftleri tarafından üretilen homojen manyetik alan ile Y eksen kutup çiftleri tarafından üretilen düzgün değişken manyetik alanın toplamı.....	48
Şekil 2.28 Çalışma alanının +X yönünde genişletilmesini gerçekleyecek hareket konfigürasyonu.....	50
Şekil 2.29 Çalışma alanının -X yönünde genişletilmesini gerçekleyecek hareket konfigürasyonu.....	50
Şekil 2.30 Çalışma alanının +Y yönünde genişletilmesini gerçekleyecek hareket	

	konfigürasyonu.....	51
Şekil 2.31	Çalışma alanının -Y yönünde genişletilmesini gerçekleyecek hareket konfigürasyonu.....	51
Şekil 2.32	Mikrorobotun hareket kabiliyetine sahip olduğu bölgeler.....	52
Şekil 2.33	X eksen kutup çiftleri tarafından üretilen homojen manyetik alan bölgesinin +X yönünde $q = 10$ mm yer değiştirmesi	53
Şekil 2.34	Y eksen kutup çiftleri tarafından oluşturulan düzgün değişen manyetik alan bölgesi.....	54
Şekil 2.35	Yer değiştirmiş X eksen kutup çiftleri tarafından homojen manyetik alan ile sabit Y eksen kutup çiftleri tarafından düzgün değişen manyetik alanın birlikte üretilmesi.....	55
Şekil 3.1	Elektromanyetik kutup.....	56
Şekil 3.2	Vidalı mil tahrikli doğrusal hareket sistemi.....	58
Şekil 3.3	Elektromanyetik kutupların doğrusal hareket sistemlerine entegre edilmesi	59
Şekil 3.4	Hareketli elektromanyetik kutupların ana şasiye montajı.....	60
Şekil 3.5	Çalışma alanının ana sisteme entegre edilmesi.....	61
Şekil 3.6	Görüntüleme sisteminin ana sisteme entegre edilmesi	62
Şekil 3.7	Akım kontrol donanımının şematik olarak gösterimi	63
Şekil 3.8	Akım sürücü kartı	63
Şekil 3.9	Akım sürücü kartı giriş/çıkış pinleri	64
Şekil 3.10	Arduino Mega	65
Şekil 3.11	Güç kaynağı	66
Şekil 3.12	Kumanda	67
Şekil 3.13	Konum kontrol donanımının şematik olarak gösterimi	67
Şekil 3.14	Adım motor	68
Şekil 3.15	Adım motor sürücü kartı	69
Şekil 3.16	Elektronik Donanım Paneli.....	70
Şekil 4.1	Akım kontrol döngüsü	71
Şekil 4.2	Akım kontrol döngüsünün girdi ve çıktılarının tanımlanması	72
Şekil 4.3	Konum kontrol döngüsü	72
Şekil 4.4	Konum kontrol döngüsünün girdi ve çıktılarının tanımlanması	73

Şekil 5.1	Elektromanyetik aktüatör sistemi kurulumu.....	74
Şekil 5.2	Elektromanyetik aktüatör sisteminin çalışma prensibi	75
Şekil 5.3	XY yatay düzleminde bulunan mikrorobotun başlangıç konumu	75
Şekil 5.4	Mikrorobotun +X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi	76
Şekil 5.5	Mikrorobotun +Y yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi	76
Şekil 5.6	Mikrorobotun -X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi	77
Şekil 5.7	Mikrorobotun -Y yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi	77
Şekil 5.8	Çalışma alanı sınırları içerisinde mikrorobotun başlangıç konumu	78
Şekil 5.9	Mikrorobotun sabit çalışma alanında, +X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi	78
Şekil 5.10	Mikrorobotun genişletilmiş çalışma alanı sınırlarında, +X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi	79
Şekil 5.11	Mikrorobotun genişletilmiş çalışma alanı sınırlarında, -X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi	79
Şekil 5.12	Mikrorobotun sabit çalışma alanında, +Y yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi	80
Şekil 5.13	Mikrorobotun sabit çalışma alanında, -X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi	80
Şekil 5.14	Mikrorobotun genişletilmiş çalışma alanı sınırlarında +Y yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi	81
Şekil 5.15	Mikrorobotun genişletilmiş çalışma alanı sınırlarında, -Y yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi	82

TABLolar LİSTESİ

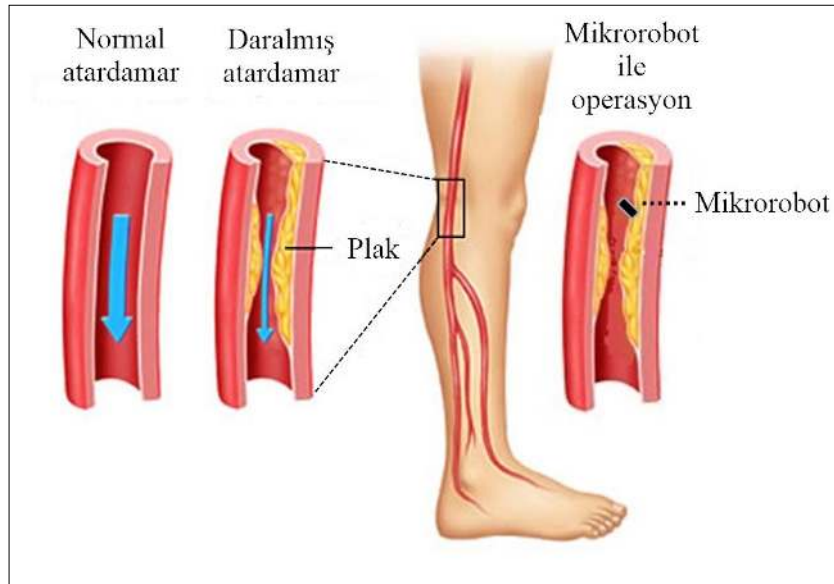
Sayfa

Tablo 2.1	Tasarım yöntemi ile belirlenen yapısal parametre değerleri.....	14
Tablo 2.2	Konum parametrelerine bağlı olarak homojen manyetik alan karakterinin incelenmesinde kullanılan işlevsel parametre değerleri.....	14
Tablo 2.3	Akım parametrelerine bağlı olarak homojen manyetik alan karakterinin incelenmesinde kullanılacak işlevsel parametreler	18
Tablo 2.4	İki kutup çiftli sistemde, konum değişimine bağlı olarak, homojen manyetik alan üzerine nüve etkisinin incelenmesinde kullanılan işlevsel parametreler.....	21
Tablo 2.5	İki kutup çiftli sistemde, akım değişimine bağlı olarak, homojen manyetik alan üzerine nüve etkisinin incelenmesinde kullanılan işlevsel parametreler.....	23
Tablo 2.6	Konum parametrelerine bağlı olarak düzgün değişen manyetik alan karakterinin incelenmesinde kullanılacak işlevsel parametreler	31
Tablo 2.7	Akım parametrelerine bağlı olarak manyetik alan karakterinin incelenmesinde kullanılacak işlevsel parametreler	35
Tablo 2.8	Konum değişimi ile Y ekseninde bulunan kutup nüvelerinin düzgün değişen manyetik akı yoğunluğu bileşenleri üzerine etkisi.....	37
Tablo 2.9	İki kutup çiftli sistemde, akım değişimine bağlı olarak, düzgün değişen manyetik alan üzerine nüve etkisinin incelenmesinde kullanılan işlevsel parametreler.....	39
Tablo 2.10	Mikrorobotun gerçekleştirecek hareketinin şekline göre biçimlenen, kutup yerleşimi ve işlevsel parametre değerleri	44

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Mikronaltı boyutlardaki robotların canlı anatomisine enjekte edilip, çeşitli tıbbi operasyonlar gerçekleştirmesi amacı ile kontrollü hareket ettirilmesi, genel cerrahi müdahalelerin olumsuz etkilerini azaltacak ve gerçekleştirilemeyen birçok tıbbi operasyona olanak sağlayacaktır. Örneğin, sıkça karşılaşılan damar tıkanıklığı, atardamar içerisinde pıhtı birikmesiyle meydana gelen bir hastalıktır. Damar yoluna enjekte edilecek, biriken pıhtıyı dağıtma özelliğine sahip, mikronaltı boyutlardaki robotlar sayesinde bu hastalık tedavi edilebilecektir (Mathieu ve diğer., 2005; Haga ve Esashi, 2004) (Şekil 1.1).



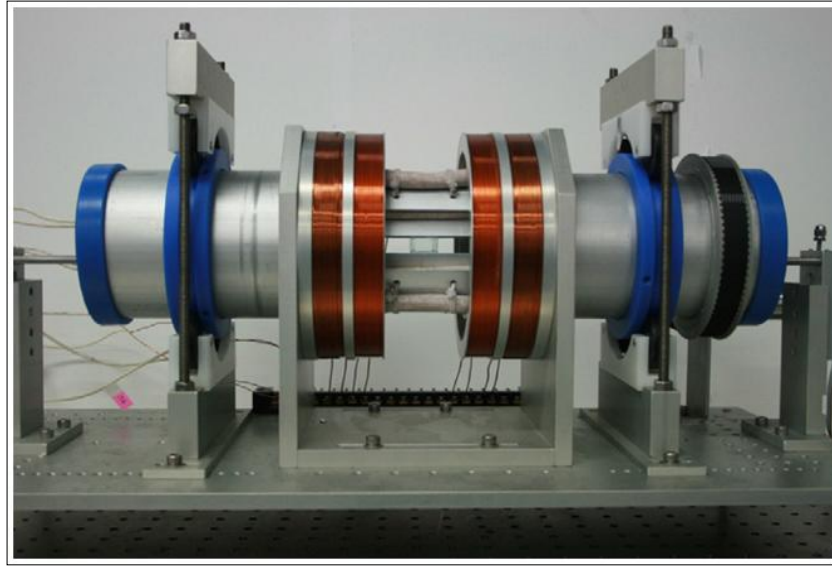
Şekil 1.1 Damar tıkanıklığı hastalığında mikrorobotlarla operasyon

Söz konusu robotlar boyutlarının küçüklüğü nedeniyle güç kaynaklarını kendi yapılarında bulunduramamaktadırlar. Bu durumda hareket edebilmeleri için gerekli enerji robotlara dışarıdan aktarılmalıdır (Abbott ve diğer., 2007a; 2007b).

Robotlara dışarıdan enerji aktarmak için kullanılan sistemlerden biri, elektromanyetik aktüatör sistemleridir (Jeong ve diğer., 2012). Bu tip aktüatör sistemleri, robotun manyetik karakterine ve operasyon bölgesinde oluşturulan manyetik alanın özelliklerine bağlı olarak, robota manyetik tork ve kuvvetin

etkimesine imkan vermektedirler. Robota etkiyen manyetik tork ve kuvvetin kontrolü, elektromanyetik eyleyici sisteminin yapısal özellikleri ve uygulanan elektrik akımının kontrolü ile sağlanmaktadır.

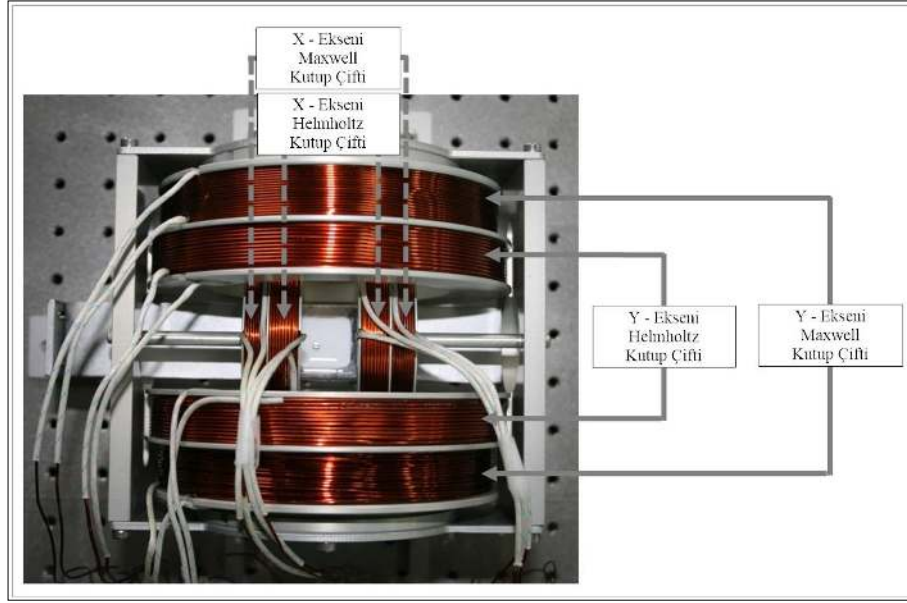
Mikronaltı boyutlardaki robotları hareket ettirebilmek amacıyla günümüze kadar birçok elektromanyetik aktüatör sistemi düşünülmüştür ve hala çalışmalar devam etmektedir. Martel ve ekibi, bu amaçla manyetik rezonans görüntüleme (MRI) sisteminin kullanılabilirliğini göstermiştir (Mathieu ve diğer., 2003; Martel ve diğer., 2007). MRI sistemi tarafından oluşturulan homojen ve değişken manyetik alanlar, mikronaltı robota dönme torku ve itme kuvveti etkimesine sebebiyet vermektedir. Fakat sistem tek bir Helmholtz bobin çifti içerdiğinden, robot istenilen doğrultuya döndürülememektedir.



Şekil 1.2 Helmholtz, Maxwell ve Saddle kutup çiftlerinden oluşan elektromanyetik aktüatör (Choi ve diğer., 2010)

MRI sistemi haricinde, robotlara dışarıdan enerji aktarma amacı doğrultusunda Helmholtz, Saddle ve Maxwell bobinleri kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır. Helmholtz, Saddle ve Maxwell bobinleri ile kurulan elektromanyetik aktüatör sistemlerinin temelinde, Helmholtz ya da Saddle bobin çiftleri tarafından oluşturulan homojen manyetik alan tarafından robota tork; Maxwell bobin çiftleri tarafından ise robotun yönlendirildiği doğrultuda robot üzerine bir itme kuvveti etki ettirilmesi

amaçlanmıştır. (Şekil 1.2 ve Şekil 1.3)



Şekil 1.3 Helmholtz ve Maxwell kutup çiftlerinden oluşan elektromanyetik aktüatör (Choi ve diğer., 2009a)

Nelson ve ekibi, birer çift Helmholtz ve Maxwell bobini kullanarak ferromanyetik bir parçacığı bobinlerin eksenleri doğrultusunda yönlendirmiş ve parçacığa bu doğrultuda kuvvet etki ettirmiştir (Yesin ve diğer., 2006). Sonrasında sisteme bir elektrik motoru entegre etmiş ve bobinleri merkez eksenlerine dik eksenle döndürerek, sistemi parçacığa iki boyutta hareket kabiliyeti kazandıracak forma getirmiştir.

Choi ve ekibi, Helmholtz, Saddle ve Maxwell bobin çiftleri kullanarak tasarladıkları statik yapıya sahip aktüatörler ile manyetik alanların vektörel toplanabilirliği özelliğini kullanmış ve parçacığı düzlemde hareket ettirmeyi başarmıştır (Choi ve diğer., 2009a; 2009b; Choi ve diğer., 2010) (Şekil 1.2 ve Şekil 1.3). Ayrıca parçacığın kontrollü bir biçimde hareket ettirilebilmesi amacı ile çeşitli kompanzasyon denemeleri gerçekleştirmiştir (Choi ve diğer., 2012).

Helmholtz ve Maxwell bobinleri ile oluşturulan elektromanyetik aktüatör sistemlerinin, yüksek akım değerlerinde düşük manyetik alanlar oluşturması sebebiyle, gerçek bir sistemde kullanılması mümkün değildir. Bu sistemler ancak

çok küçük çalışma uzaylarında, mikronaltı boyutlardaki robotların hareketine olanak tanımaktadır. Oysa tıbbi operasyonların yapılacağı çalışma uzayları büyük yapılar olup, sistemlerin böylesi hacimlerde operasyona olanak verecek biçimde tasarlanması gerekmektedir.



Şekil 1.4 Octomag (Kummer ve diğer., 2010)

Nelson ve ekibi, katarakt tedavisinde kullanılmak üzere, mikrorobotun beş serbestlik derecesinde hareketine olanak sağlayan, sekiz kutuplu bir elektromanyetik aktüatör sistemi tasarlamıştır (Kummer ve diğer., 2010; Schurle ve diğer., 2012) (Şekil 1.4). Kutuplar nüve üzerine sarılmış solenoid bobinlerden oluşmakta olup, mikrorobotun kontrolü her bir solenoide uygulanan akım değerinin kontrolü ile sağlanmaktadır.

Günümüze kadar yapılan çalışmalar statik yapıya sahip elektromanyetik kutupların akım kontrolü ile mikrorobotu hareket ettirmeyi amaçlamıştır. Bu makale var olan elektromanyetik aktüatör sistemlerine alternatif olarak, hareket kabiliyetine sahip elektromanyetik kutupların konum ve akım kontrolü ile mikrorobotun hareketinin gerçekleştirilebileceğini ileri sürmektedir. Elektromanyetik kutupların konum kontrolünün en önemli avantajı, mikrorobota daha geniş bir çalışma alanında hareket kabiliyeti kazandırması olacaktır.

BÖLÜM İKİ

ELEKTROMANYETİK AKTÜATÖR SİSTEMİ TASARIMI

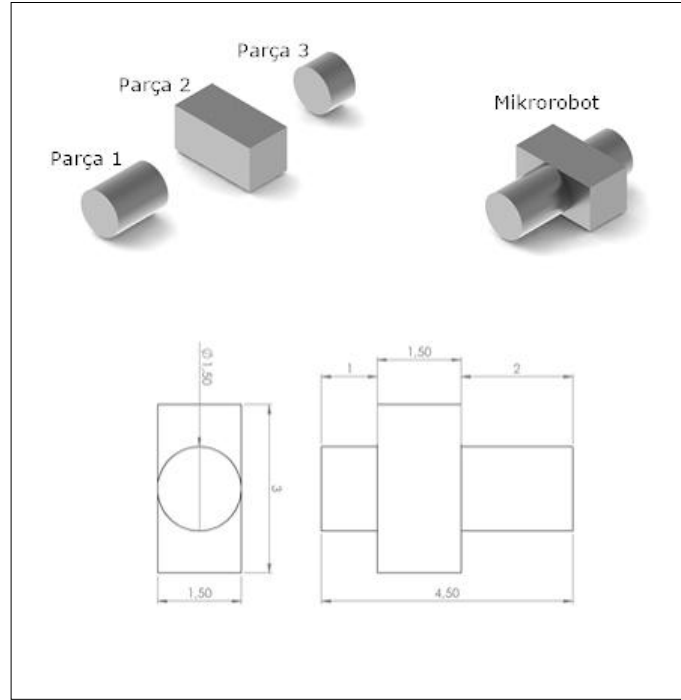
Bu çalışma kapsamında, belirli bir çalışma alanı üzerinde bulunan mikrorobotun temassız olarak yönlendirilmesini ve yönlendirildiği doğrultuda doğrusal hareketini gerçekleştirecek elektromanyetik aktüatör sistemi tasarımı gerçekleştirilecektir.

Tasarım sürecinde ilk olarak, sistem tarafından hareket ettirilmesi amaçlanan mikrorobotun özellikleri belirlenmiştir. Bununla birlikte, mikrorobotun hareketinin güç kaynağı olacak manyetik alanı meydana getirecek, elektromanyetik teori üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Elektromanyetik teoriye dayalı olarak gerçekleştirilecek nümerik çalışmalar ile elektromanyetik kutupların yapısı ve yerleşim biçimi belirlenmiştir. Sistemin temel yapısının detaylı bir şekilde açıklanmasını takiben, manyetik alan karakterini belirlemek üzere bir sistematik analiz metodu geliştirilmiş, elektromanyetik sistemin yapısal ve işlevsel parametreleri belirlenmiştir.

2.1 Hareket Ettirilmesi Amaçlanan Mikrorobotun Özellikleri

Robot, önceden belirlenmiş bir amacı yerine getiren, otonom ya da kumanda sinyalleri ile kontrol edilen bir yapıdır. Elektromanyetik eyleyiciler tarafından enerji aktarılan robotlar da milimetrik ya da milimetre altı boyutlarda, belirli bir amacı gerçekleştirmeye yönelik olan ve belirli manyetik özelliklere sahip yapılardır. Kumanda sinyalleri ile kontrol edilebildikleri gibi otonom olarak da hareket edebilirler.

Bu çalışmada hareket ettirilmek istenen robot, Şekil 2.1' de görüleceği üzere belirli bir geometrik yapıya ve güçlü manyetik özelliğe sahip neodymium mıknatıstır ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). Neodymium mıknatıslar, atomik yapılarından kaynaklı olarak, manyetik alan altında yüksek manyetizasyon özelliğine sahip ferromanyetik malzemelerdir.



Şekil 2.1 Mikrorobot

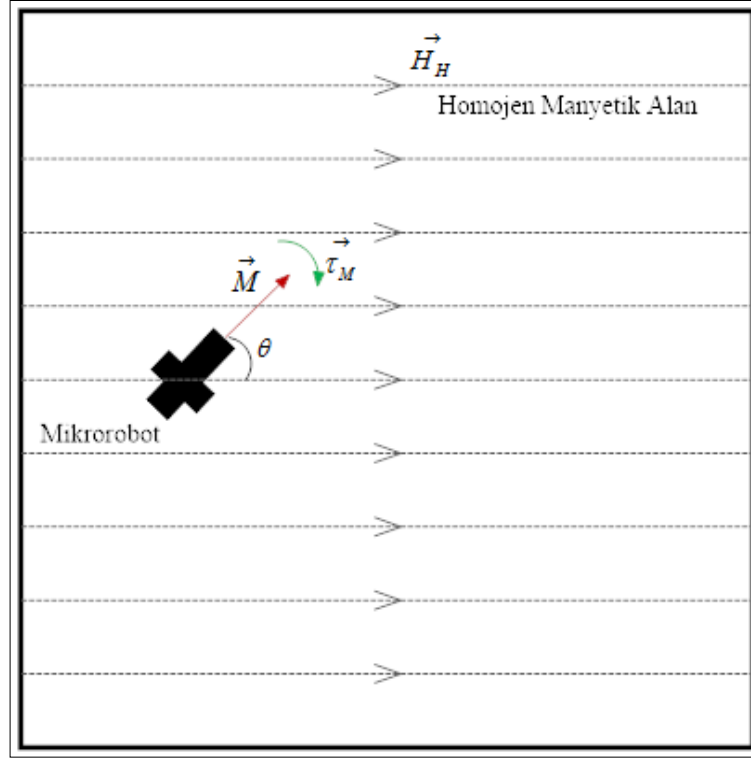
2.2 Mikrorobotun Yönlendirilmesi

Mikrorobotun çalışma alanında bulunduğu noktadan, belirli bir noktaya hareketi için, öncelikli olarak, belirlenen noktaya yönlendirilmesi gerekmektedir. Yönlendirme eylemini gerçekleştirecek kutup sistemi tasarımı, alt bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.

2.2.1 Mikrorobotun Yönlendirilmesini Gerçekleştirecek Elektromanyetik Teori

Güçlü manyetik özelliğe sahip mikrorobota, elektromanyetik eyleyici tarafından meydana getirilen homojen manyetik alan altında, mikrorobotun manyetizasyon vektörünü çalışma alanında oluşan manyetik alan vektörü ile aynı doğrultuya taşıyacak bir tork etki etmektedir.

Şekil 2.2' de, yatay düzlemde bulunan ve $\mathbf{M}$ manyetizasyon vektörüne sahip bir mikrorobotun, homojen $\mathbf{H}_H$ manyetik alanı altında, üzerine etkiyen düzleme dik manyetik tork τ_M gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Yatay düzlemde bulunan mikrorobotun, homojen manyetik alanın etkisi ile üzerine etkiyen manyetik tork

Homojen manyetik alan altında, $\mathbf{M}$ manyetizasyon vektörüne sahip mikrorobota etkiyecek manyetik tork:

$$\vec{\tau}_M = V \cdot \vec{M} \times \vec{B}_H \quad (2.1)$$

şeklinde matematiksel olarak ifade edilmiştir. $\mathbf{M}$ mikrorobotun manyetizasyon vektörünü, V mikrorobotun hacmini ifade etmektedir. $\mathbf{B}$ ise, homojen manyetik akı yoğunluğu olup,

$$\vec{B}_H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}_H \quad (2.2)$$

biçiminde tanımlanır. μ_0 havanın manyetik geçirgenliğini, μ_r mikrorobotun manyetik geçirgenliğini, $\mathbf{H}_H$ ise homojen manyetik alan vektörünü ifade etmektedir.

Mikrorobotun düzlemde konumlandırıldığı düşünüldüğünde ve düzlemde bir

doğrultu boyunca yönlendirilmesi amaçlandığında manyetik tork,

$$\vec{\tau}_M = V \cdot \left[M_X \cdot \vec{i} + M_Y \cdot \vec{j} \right] \times \left[B_X \cdot \vec{i} + B_Y \cdot \vec{j} \right] \quad (2.3)$$

$$\vec{\tau}_M = V \cdot [M_X \cdot B_Y - M_Y \cdot B_X] \times \vec{k} \quad (2.4)$$

biçimlerinde ifade edilir.

Mikrorobotun manyetizasyon vektörünün yatay düzlemdeki bileşenleri, $M_X = M \cdot \cos \theta$ ve $M_Y = M \cdot \sin \theta$ olduğundan yatay düzlemde etkiyecek manyetik tork ifadesi,

$$\vec{\tau}_M = V \cdot [M \cdot \cos \theta \cdot B_Y - M \cdot \sin \theta \cdot B_X] \times \vec{k} \quad (2.5)$$

biçimini alır. θ mikrorobotun manyetizasyon vektörünün X eksenini ile yaptığı açığı, B_Y manyetik akı yoğunluğu Y eksenini bileşenini, B_X manyetik akı yoğunluğu X eksenini bileşenini ifade etmektedir.

Mikrorobotun X eksenini doğrultusunda yönlendirilmesi amaçlanırsa, çalışma alanında X eksenini boyunca homojen manyetik alan meydana getirmek gerekir. Bu durumda $B_Y=0$ olduğundan manyetik tork,

$$\vec{\tau}_M = V \cdot [-M \cdot \sin \theta \cdot B_X] \times \vec{k} \quad (2.6)$$

olur. Mikrorobota etkiyecek tork değerinin, mikrorobotun X ekseniniyle yaptığı açı olan θ' ya bağlı değişimini incelendiğinde, $\theta = 90^\circ$ olduğu durumda mikrorobotu yönlendirmek için gerekli manyetik tork değerinin maksimum değeri aldığı görülür. $\theta = 90^\circ$ olduğunda manyetik tork ifadesi,

$$\vec{\tau}_M = V \cdot [-M \cdot B_X] \times \vec{k} \quad (2.7)$$

biçimini alır. Ayrıca, mikrorobotun X eksenine paralel yönlendirilmesi için üretilen

manyetik tork değerinin, harekete karşı iş yapacak karşıt tork değerinden büyük olması gerekmektedir. Bu durumda sağlanması gereken eşitsizlik,

$$\tau_M > \tau_K \quad (2.8)$$

olur. τ_K karşıt torku ifade etmektedir. Eşitsizliği gerçekleyecek manyetik akı yoğunluğunun minimum değeri ise,

$$B_x = \frac{\tau_K}{M \cdot V} \quad (2.9)$$

olmalıdır.

Mikrorobotun Y eksenini doğrultusunda yönlendirilmesi amaçlanırsa, çalışma alanında Y eksenini boyunca homojen manyetik alan meydana getirmek gerekir. Bu durumda $B_x=0$ olacağından manyetik tork,

$$\vec{\tau}_M = V \cdot [M \cdot \cos \theta \cdot B_y] \times \vec{k} \quad (2.10)$$

olur. Bu durumda, mikrorobota etkiyecek tork değerinin, mikrorobotun X eksenini yaptığı açı olan θ' ya bağlı değişimi incelendiğinde, $\theta=0^\circ$ olduğu durumda mikrorobotu doğrultmak için gerekli tork değerinin maksimum değeri aldığı görülür. $\theta=0^\circ$ olduğunda manyetik tork ifadesi,

$$\vec{\tau}_M = V \cdot [M \cdot B_y] \times \vec{k} \quad (2.11)$$

biçimini alır. Ayrıca, mikrorobotun Y eksenine doğrultulması için üretilen manyetik tork değerinin, harekete karşı iş yapacak karşıt tork değerinden büyük olması gerekmektedir. Bu durumda sağlanması gereken eşitsizlik Denklem 2.8' de belirtilmiştir.

Eşitsizliği gerçekleyecek manyetik akı yoğunluğunun minimum değeri ise,

$$B_y = \frac{\tau_K}{M \cdot V} \quad (2.12)$$

olur.

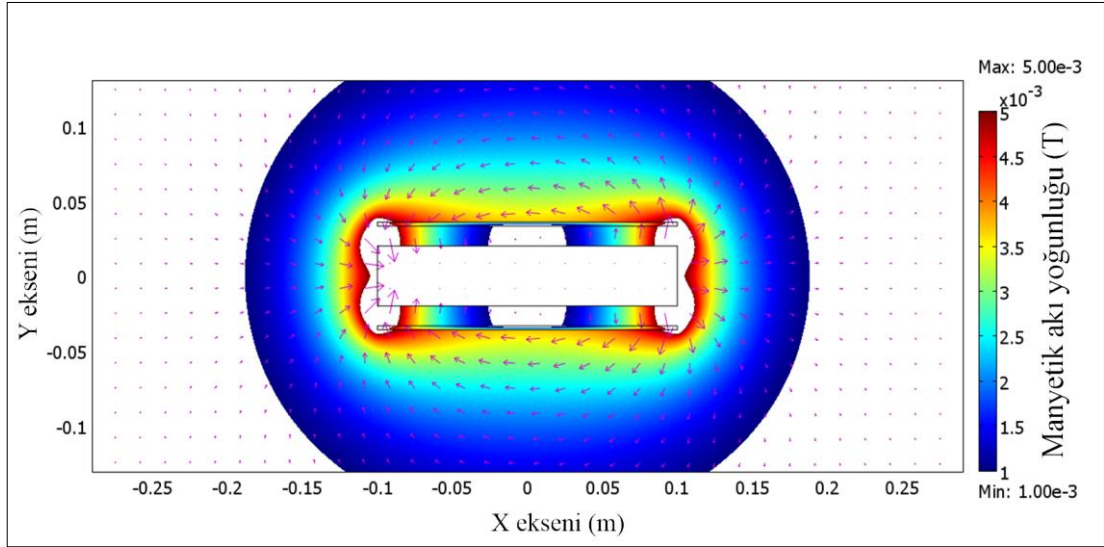
2.2.2 Mikrorobotun Yönlendirilmesini Gerçekleyecek Elektromanyetik Sistem Tasarımı

Bir önceki bölümde, mikrorobotun yönlendirilebilmesi için, belirli bir çalışma alanında homojen manyetik alan oluşturulması gerekliliği ve yönlendirme işlemini gerçekleyecek manyetik tork değerinin minimum hangi değerde olacağı hususları irdelenmiştir. Bu bölümde ise, homojen manyetik alan oluşturacak ve hareket için gerekli manyetik tork değerini sağlayacak elektromanyetik sistem tasarımı üzerinde durulacaktır.

Yapılan ön çalışmalar sonucunda, elektromanyetik aktüatör sisteminin, belirli yapısal ve işlevsel parametrelere sahip elektromanyetik kutup ya da kutuplar ile tasarlanmasına karar verilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, homojen manyetik alan meydana getirerek mikrorobotun yönlendirilmesini gerçekleyecek sistem de elektromanyetik kutuplardan oluşacaktır.

2.2.2.1 Tek Bir Elektromanyetik Kutup ile Homojen Manyetik Alan Oluşturulmasına Yönelik Çalışmalar

Tek bir elektromanyetik kutup ile belirli bir çalışma alanında homojen manyetik alan üretme çalışmaları yapılmıştır. Çalışmalar kapsamında, değişken yapısal ve işlevsel parametreler tanımlanarak, elektromanyetik kutup modellemeleri ve modellemeler üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda, tek bir elektromanyetik kutup ile homojen manyetik alan oluşturulamadığı sonucuna varılmıştır. Tasarlanan elektromanyetik kutup tarafından yatay düzlemde üretilen manyetik akı yoğunluğu değişimi ve manyetik alan haritası Şekil 2.3' de gösterilmiştir. Şekil 2.3 incelendiğinde, yatay düzlemin herhangi bir bölgesinde istenilen karaktere sahip manyetik alan üretilmediği görülmektedir.



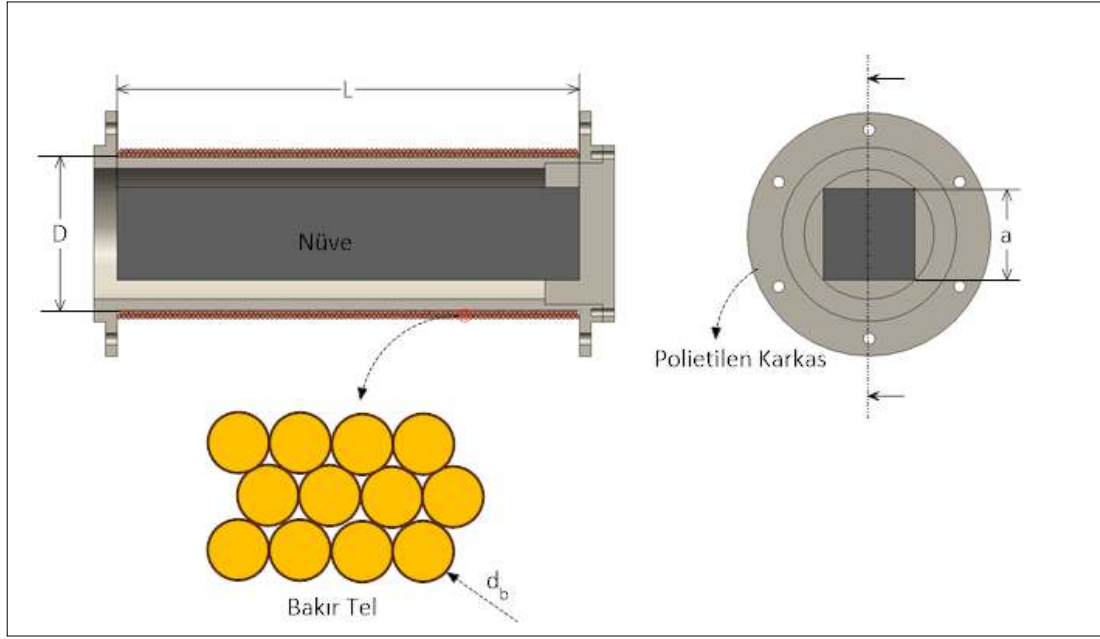
Şekil 2.3 Tek bir elektromanyetik kutup tarafından oluşturulan manyetik akı yoğunluğu değişimi ve manyetik alan haritası

2.2.2.2 Elektromanyetik Kutup Çiftleri ile Homojen Manyetik Alan Oluşturulmasına Yönelik Çalışmalar

Helmholtz ve Saddle kutup çiftleri prensipleri baz alınarak yapılan çalışmalar sonucunda, homojen manyetik alan oluşturmak için belirli yapısal ve işlevsel parametrelere uygun olarak dizayn edilmiş kutup çiftlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Öncelikle, Helmholtz ve Saddle Kutup Çiftleri incelenmiş ve belirtilen kutup çiftlerinin yapısal olarak bazı dezavantajlara sahip olduğu tespit edilmiştir. Belirlenen dezavantajlar şunlardır:

- Belirtilen kutup çiftleri, dahili nüve barındırmamaları nedeniyle, yüksek akım değerlerinde düşük şiddetli manyetik alan oluşturabilmektedir. Bu olumsuz özelliği, geniş çalışma alanları elde etmek için, oldukça büyük konstrüksiyonlara sahip yapıların tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır.
- Belirtilen kutup çiftleri kullanılarak dizayn edilen elektromanyetik aktüatör sistemleri, kutupların hareket kabiliyeti kazanmasına müsaade etmemektedir. Bu nedenle, Helmholtz ve Saddle kutup çiftlerinin hareketleri ile çalışma alanının taşınabilmesi ve daha geniş alanlarda mikrorobota hareket kabiliyeti kazandırılması imkansızdır.

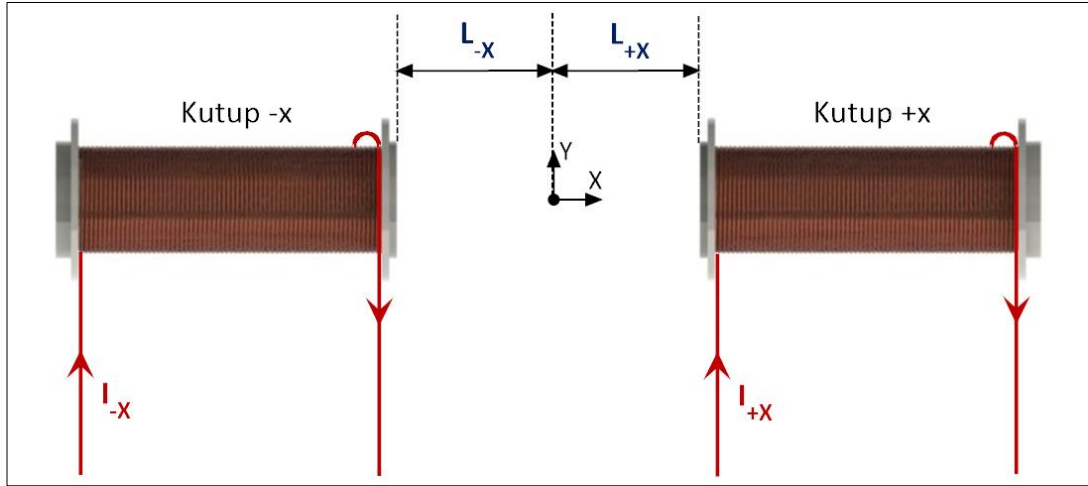
Varılan çıkarımlardan yola çıkılarak, kutup hareketleri ile çalışma alanının yer değişimine olanak sağlayacak ve daha geniş bir çalışma alanında homojen manyetik alan üretimini olanaklı kılacak kutup çifti tasarımı yapılmasına karar verilmiştir. Ayrıca, tasarlanacak kutuplar tarafından üretilen manyetik akı yoğunluğu şiddetini arttırmak amacı ile kutupların, belirli özelliklere sahip nüveler ihtiva etmesi gerekliliği saptanmıştır.



Şekil 2.4 Elektromanyetik kutupların yapısal parametreleri

Tüm nümerik ve deneysel çalışmalar sonucunda, homojen manyetik alan oluşturacak kutup çiftlerinin sahip olması gereken yapısal parametreler belirlenmiştir. Belirlenen yapısal parametreler Şekil 2.4’ de gösterilmiştir.

Belirlenen yapısal parametrelere sahip kutuplardan oluşacak kutup çiftleri tarafından meydana getirilen manyetik alanın biçimini belirleyecek değişken parametreler ise, işlevsel parametreler olarak tanımlanmıştır. İşlevsel parametreler; bobinler üzerinden akacak elektrik akımının yönünü ve şiddetini belirleyecek akım parametresi ile kutup çiftlerinin arasındaki uzaklığı tanımlayan konum parametresidir. İşlevsel parametreler Şekil 2.5’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Elektromanyetik kutup çiftlerinin işlevsel parametreleri

Elektromanyetik aktüatör sistemini oluşturacak kutup çiftlerinin yapısal ve işlevsel parametre değerlerini belirlemek amacıyla, Comsol Multiphysics ve Matlab programları kullanılarak kurgulanan tasarım yöntemi üzerinde, sabit yapısal parametrelere ve değişken işlevsel parametrelere bağlı olarak, yatay düzlem üzerinde oluşan manyetik alan karakterinin değişiminin incelenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar ve sonuçları alt bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.

2.2.2.2.1 Konum Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Yatay Düzlem Üzerinde Oluşan Homojen Manyetik Alan Karakterinin İncelenmesi. Comsol Multiphysics ve Matlab programları kullanılarak kurgulanan tasarım yöntemi ile belirlenen yapısal parametre değerleri Tablo 2.1’ de gösterilmiştir. Ayrıca, konum parametrelerine bağlı olarak, yatay düzlemde oluşan homojen manyetik alan karakterinin incelenmesinde kullanılacak işlevsel parametre değerleri Tablo 2.2’ de verilmiştir.

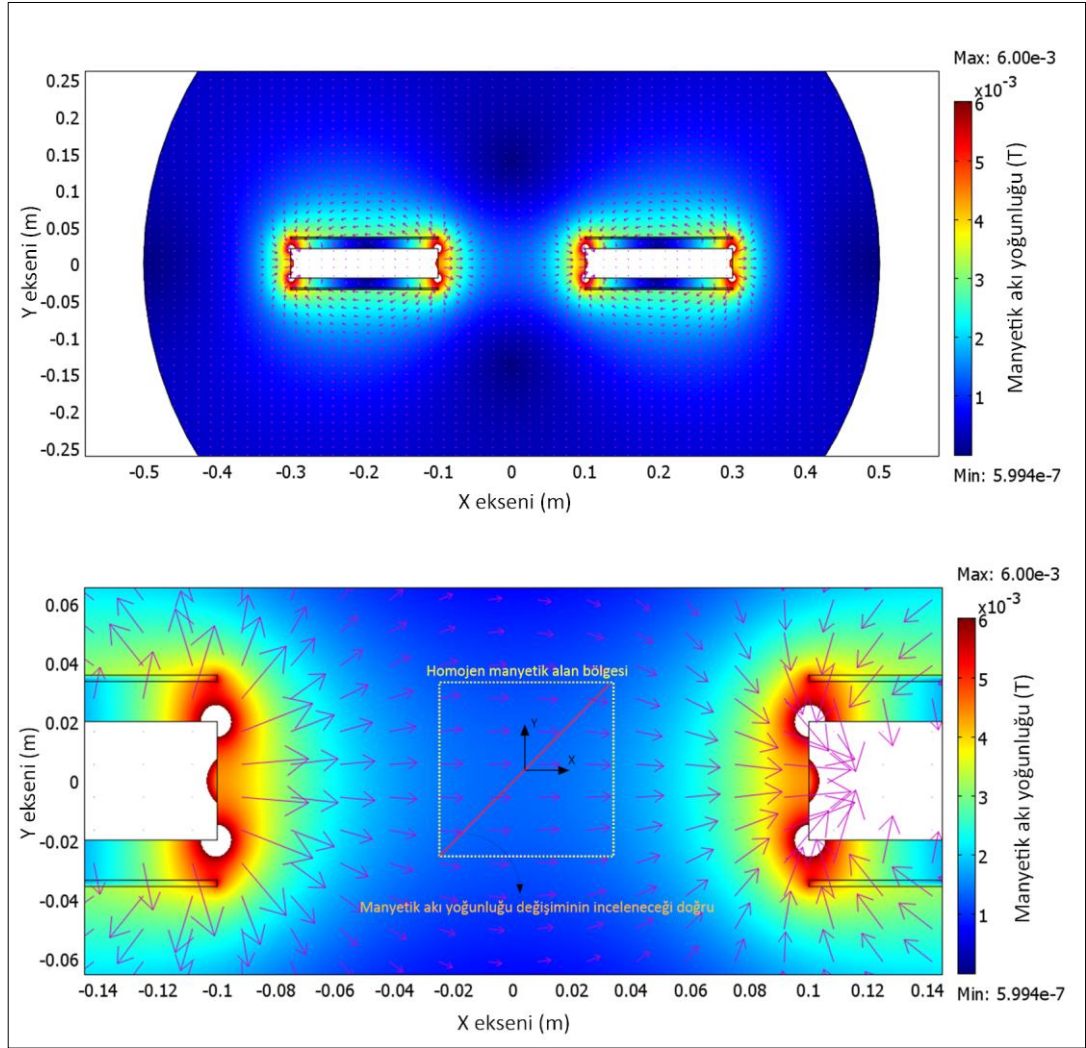
Tablo 2.1 Tasarım yöntemi ile belirlenen yapısal parametre değerleri

Yapısal Parametreler ve Değerleri		
Sembol	Açıklama	Değer
L	Bobin ve nüve uzunluğu	0,2 m
D	Bobin çapı	0,066 m
a	Kare nüvenin bir kenar uzunluğu	0,04 m
d	Bakır tel çapı	0,0011 m
μ_r	Nüve malzemesinin manyetik geçirgenlik katsayısı	4000

Tablo 2.2 Konum parametrelerine bağlı olarak homojen manyetik alan karakterinin incelenmesinde kullanılan işlevsel parametre değerleri

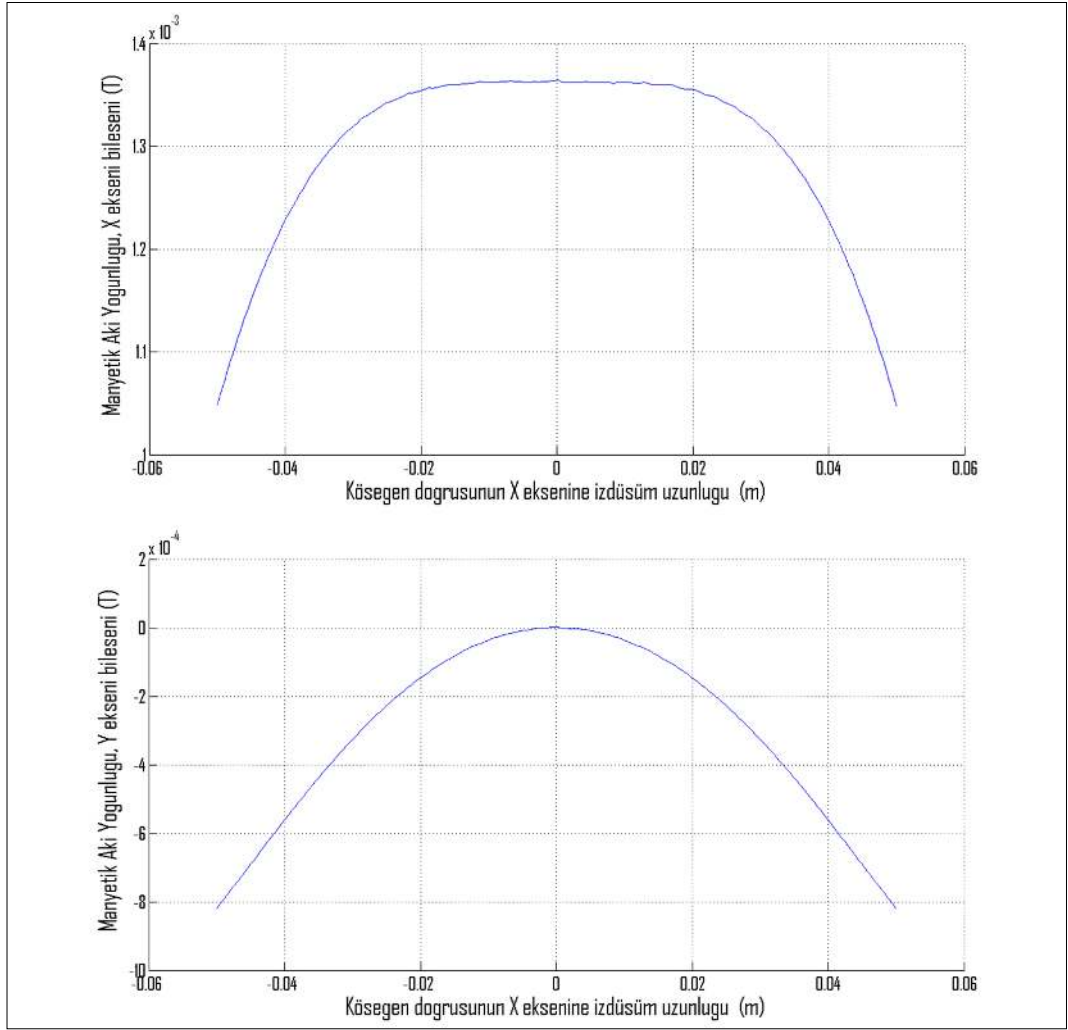
İşlevsel Parametreler ve Değerleri		
Sembol	Açıklama	Değer
I_{+X}	Kutup +X' in üzerinden akacak akım	1 A
I_{-X}	Kutup -X' in üzerinden akacak akım	1 A
L_{+X}	Kutup +X' in merkez noktasına uzaklığı	70 – 130 mm
L_{-X}	Kutup -X' in merkez noktasına uzaklığı	70 – 130 mm

Tablo 2.2' de verilen parametre değerleri (*konum parametreleri sabit, $L_{+X} = 100$ mm, $L_{-X} = 100$ mm*) kullanılarak yapılan analiz çalışmaları ile belirlenen yatay düzlem üzerindeki manyetik akı yoğunluğu değişimi ve manyetik alan haritası Şekil 2.6' de gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Konum parametrelerinin $L_{+X}=100$ mm ve $L_{-X}=100$ mm olduğu durumda manyetik akı yoğunluğu değişimi ve manyetik alan haritası

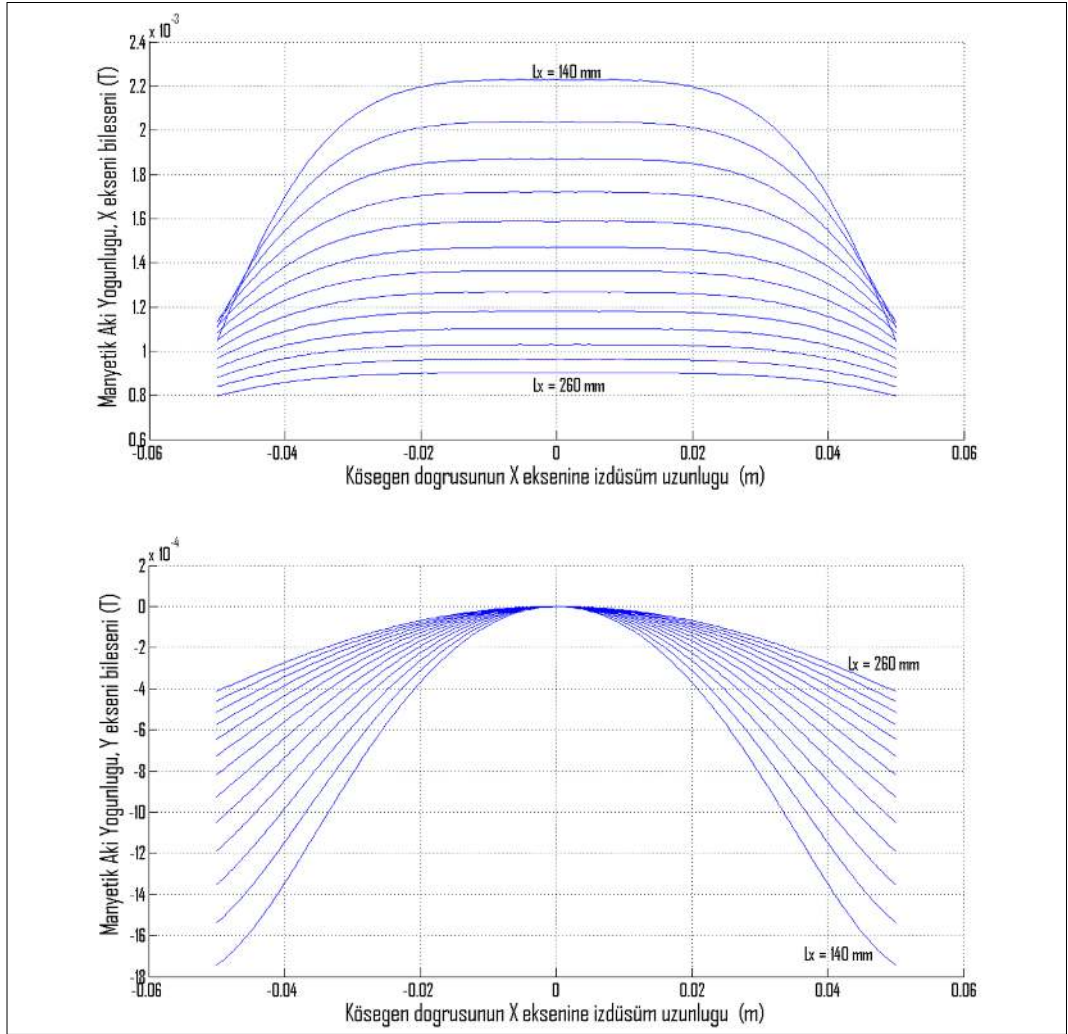
Şekil 2.6 incelendiğinde, yatay düzlemin belirli bir alanında homojen manyetik alan üretilebildiği tespit edilmiştir. Homojen manyetik alanın üretilebildiği alanın, yatay düzlemin merkez noktasıyla eş merkezli ve eşit kenar uzunluklarına sahip kare bir alan olduğu kabulü yapılmıştır. Yapılan kabule göre, homojen manyetik alanın üretilebildiği alanın sınırlayıcı koşulunun, karenin köşe noktaları olduğu tespit edilmiştir. Bu tespit ile sınırların belirlenmesi amacıyla yönelik olarak, karenin köşegen doğruları üzerindeki değişimler incelenmiştir (Karenin iki köşegeni üzerindeki manyetik alan karakterinin eşlenik olması sebebiyle sonuçlar tek bir köşegen üzerinde gösterilmiştir.).



Şekil 2.7 Köşegen doğrusu üzerinde manyetik akı yoğunluğu X ve Y eksen bileşenlerinin değişimi

Köşegen doğrusu üzerinde, manyetik akı yoğunluğu X eksen ve Y eksen bileşenlerinin değişimi Şekil 2.7’ de gösterilmiştir. Şekil 2.7 incelendiğinde, doğrunun merkez noktasından uzaklaştıkça manyetik akı yoğunluğu X eksen bileşeninin değerinin ve doğrusallığının azaldığı; Y eksen bileşeninin değerinin arttığı ve sistemi homojenlikten uzaklaştıracak etki üretmeye çalıştığı görülmektedir.

Tablo 2.2’ de gösterilen parametreler (*konum parametreleri değişken*, $L_{+X} = 70 - 130 \text{ mm}$, $L_{-X} = 70 - 130 \text{ mm}$) kullanılarak yapılan analiz çalışmaları sonucu elde edilen köşegen doğrusu üzerindeki manyetik akı yoğunluğu bileşenlerinin değişimi Şekil 2.8’ de gösterilmiştir. (Analiz çalışmalarında, konum parametreleri verilen değerler arasında 5’ er mm aralıklarla sonuçlar alınmıştır. Şekil üzerinde L_X ile gösterilen parametre kutuplar arası uzaklığı ifade etmektedir. $L_X = L_{+X} + L_{-X}$)



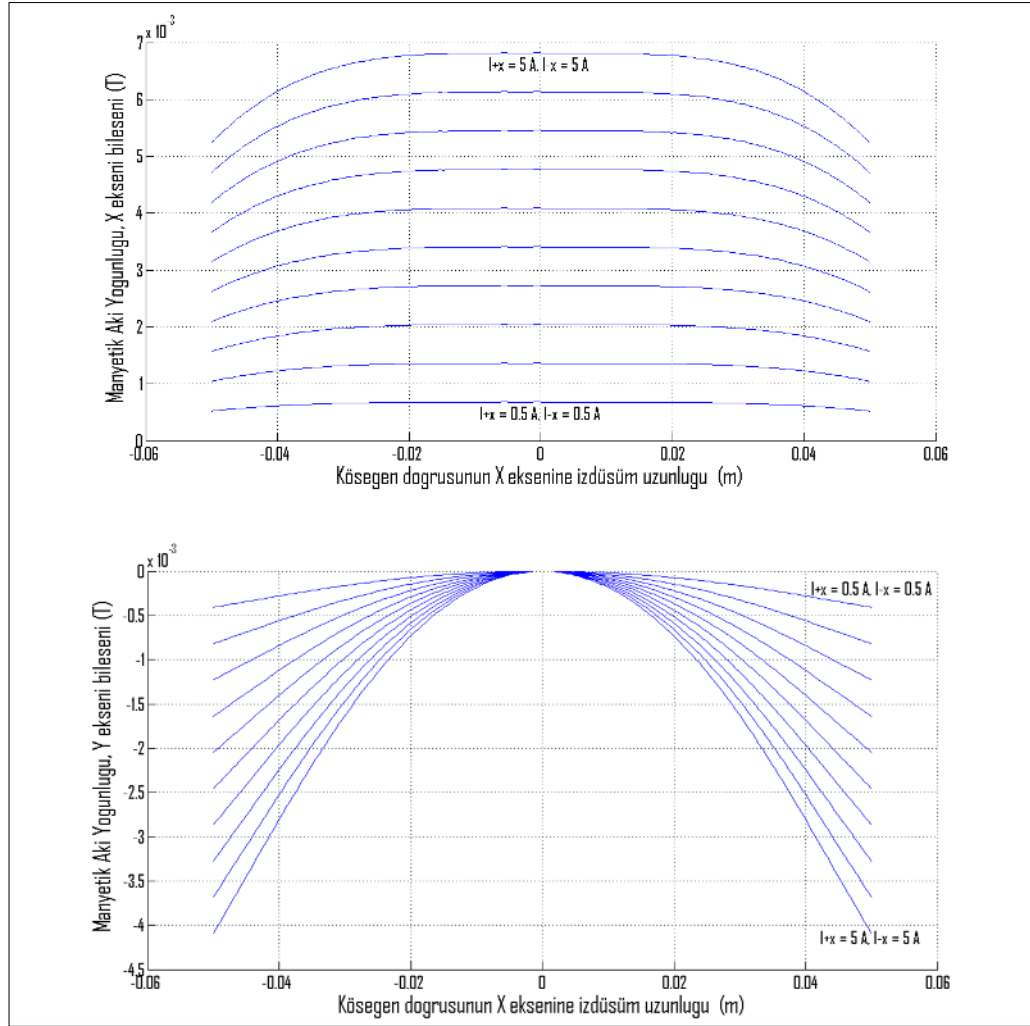
Şekil 2.8 Değişken konum parametrelerine bağlı, köşegen doğrusu üzerinde manyetik akı yoğunluğu X ve Y eksenli bileşenlerinin değişimi

Şekil 2.8 incelendiğinde, kutuplar arası mesafe arttığında manyetik akı yoğunluğunun daha homojen bir karaktere sahip olduğu, fakat şiddetinin azaldığı görülmektedir.

2.2.2.2.2 Akım Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Yatay Düzlem Üzerinde Oluşan Homojen Manyetik Alan Karakterinin İncelenmesi. Çalışmalarda kullanılacak yapısal parametreler ve değerleri bir önceki çalışmada kullanılan ve Tablo 2.1’ de verilen parametrelerdir. Çalışmanın amacı, eş yapısal parametrelere sahip kutup çifti sisteminde, akım parametresinin homojen manyetik akı yoğunluğuna etkisinin incelenmesidir. Bu amaç doğrultusunda Tablo 2.3’ de verilen işlevsel parametre değerleri kullanılmıştır.

Tablo 2.3 Akım parametrelerine bağı olarak homojen manyetik alan karakterinin incelenmesinde kullanılacak işlevsel parametreler

İşlevsel Parametreler ve Değerleri		
Sembol	Açıklama	Değer
I_{+X}	Kutup +X' in üzerinden akacak akım	0,5 – 5 A
I_{-X}	Kutup -X' in üzerinden akacak akım	0,5 – 5 A
L_{+X}	Kutup +X' in merkez noktasına uzaklığı	100 mm
L_{-X}	Kutup -X' in merkez noktasına uzaklığı	100 mm



Şekil 2.9 Değişken akım parametrelerine bağı, köşegen doğrusu üzerinde manyetik akı yoğunluğu X ve Y eksenli bileşenlerinin değişimi

Tablo 2.3’ de verilen parametreler (*akım parametresi değişken*) kullanılarak yapılan analiz çalışmaları sonucu elde edilen, köşegen doğrusu üzerindeki manyetik akı yoğunluğu bileşenlerinin değişimi Şekil 2.9’ da gösterilmiştir.

Şekil 2.9 incelendiğinde, kutupların sabit bir konumda bulunduğu durumda, akım şiddetine bağlı olarak manyetik akı yoğunluğu bileşenlerinin de şiddetlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca, akım şiddetinin artışı ile sisteme bozucu etkisi olan manyetik akı yoğunluğu Y eksen bileşeninde etkisi artmaktadır.

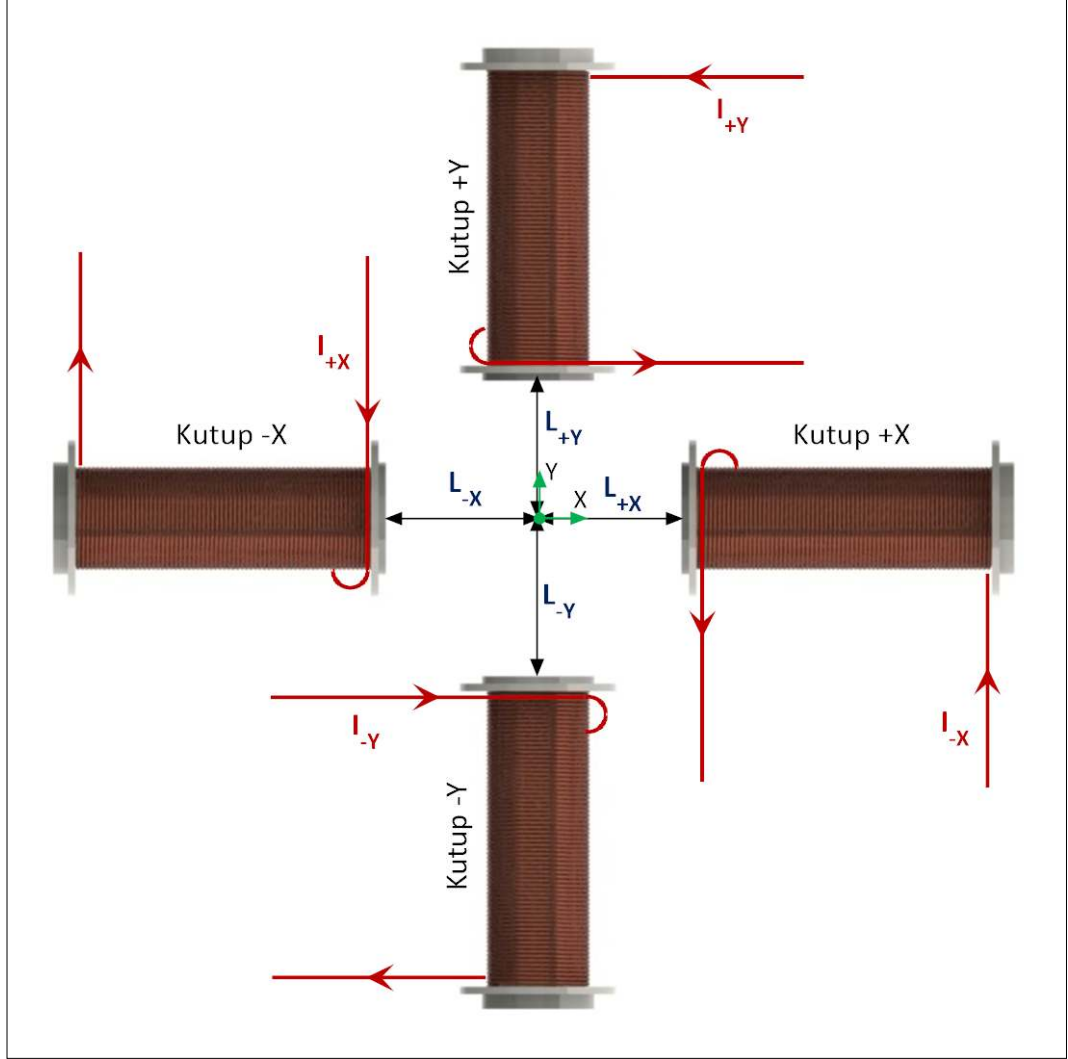
Homojen manyetik alan oluşturmak amacıyla yapılan çalışmalar neticesinde varılan sonuçlar şunlardır:

- Belirli yapısal ve işlevsel parametrelere göre dizayn edilecek, nüveli kutup çifti tarafından, sınırlı bir alanda homojen manyetik alan üretmek mümkündür.
- Tek bir kutup çifti tarafından üretilen homojen manyetik alanın yönü, kutup çiftinin merkez eksenine paralel doğrultular üzerindedir. Bu durum sadece, mikrorobotun belirtilen doğrultular üzerinde yönlendirilmesine olanak tanımaktadır.
- Yönlendirme eksenine dik eksen de oluşan manyetik akı yoğunluğu Y eksen bileşeni, sisteme bozucu etki yapmaktadır. Y eksen bileşeninin şiddeti; kutuplar birbirine yaklaştıkça ve akım şiddeti arttıkça artmakta ve bozucu etkisi belirginleşmektedir.

2.2.2.3 Farklı Doğrultularda Homojen Manyetik Alan Oluşturulmasına Yönelik Çalışmalar

Tez çalışmasının amacının mikrorobota yatay düzlem üzerinde hareket kabiliyeti kazandırmak olması nedeniyle, mikrorobotun en az iki doğrultuda yönlendirilebilmesi gereklidir. Bu durumu gerçeklemek amacıyla, yatay düzlem üzerinde birbirine dik eksenlerde konumlandırılmış ve eşlenik yapısal parametrelere

sahip kutup çiftlerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Mikrorobotun, birden fazla doğrultuda yönlendirilmesini gerçekleyecek kutup çiftlerinin yatay düzleme yerleşimi ve işlevsel parametreleri Şekil 2.10' da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Kutup çiftlerinin yatay düzleme yerleşimi ve işlevsel parametreler

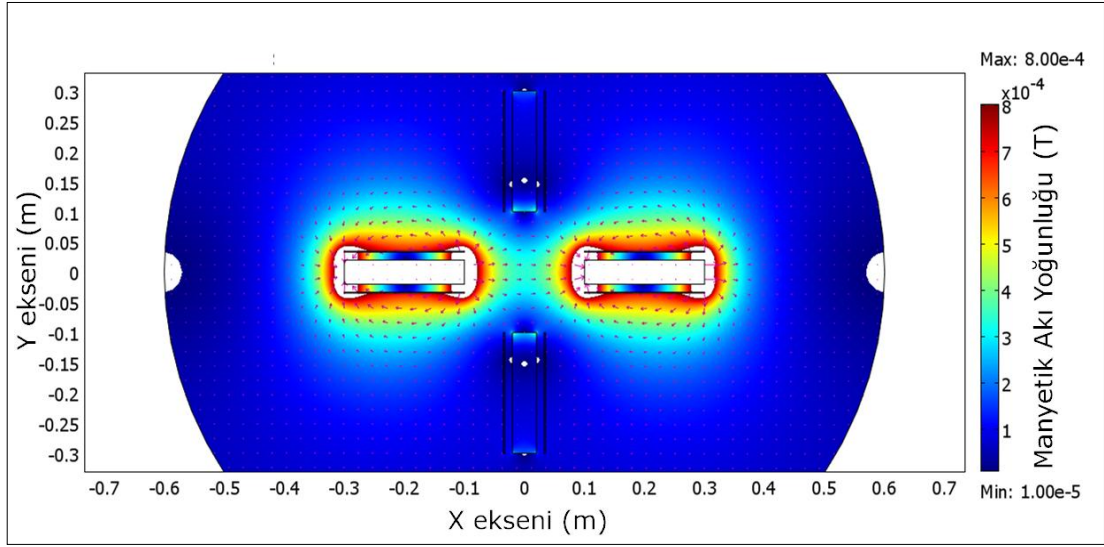
Şekil 2.10 incelendiğinde, kutup çiftlerinin birbirlerinin etki alanlarında bulundukları ve dahili nüve ihtiva etmeleri sebebiyle manyetik açıdan birbirlerini etkileyebilecekleri görülmektedir. Manyetik açıdan etkilerin incelenmesi amacı ile çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar alt bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.

2.2.2.3.1 Konum Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Nüvelerin Homojen Manyetik Alan Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. Çalışmada, diğer çalışmalarla birlikte değerlendirme yapılabilmesi amacı ile Tablo 2.1’ de verilen yapısal parametre değerleri kullanılmıştır. İşlevsel parametre değerleri ise, Tablo 2.4’ te verilmiştir. Tablo 2.4’ te verilen parametreler incelendiğinde; Y eksenli kutup çiftlerinin üzerinden elektrik akımının akmadığı ve aralarındaki mesafenin sabit $L_Y = 200$ mm olduğu görülmektedir. Ayrıca, X eksenli kutup çiftlerinin üzerinden 1 A şiddetinde ve verilen yönde elektrik akımı akmakla birlikte kutuplar arası mesafenin $L_X = 140$ mm ile $L_X = 260$ mm arasında değişken olduğu görülmektedir.

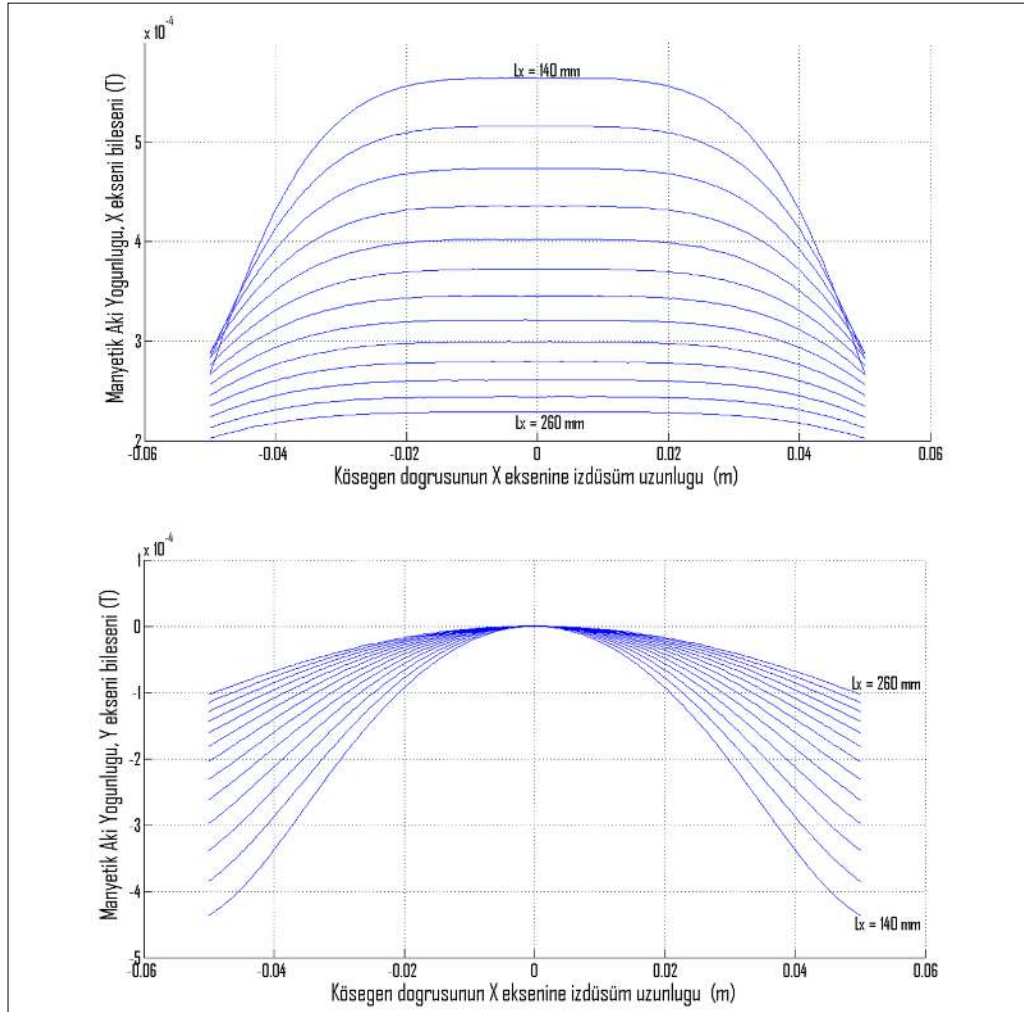
Tablo 2.4 İki kutup çiftli sistemde, konum değişimine bağlı olarak, homojen manyetik alan üzerine nüve etkisinin incelenmesinde kullanılan işlevsel parametreler

İşlevsel Parametreler ve Değerleri		
Sembol	Açıklama	Değer
I_{+X}	Kutup +X’ in üzerinden akacak akım	1 A
I_{-X}	Kutup -X’ in üzerinden akacak akım	1 A
I_{+Y}	Kutup +Y’ in üzerinden akacak akım	0 A
I_{-Y}	Kutup -Y’ in üzerinden akacak akım	0 A
L_{+X}	Kutup +X’ in merkez noktasına uzaklığı	70 – 130 mm
L_{-X}	Kutup -X’ in merkez noktasına uzaklığı	70 – 130 mm
L_{+Y}	Kutup +Y’ in merkez noktasına uzaklığı	100 mm
L_{-Y}	Kutup -Y’ in merkez noktasına uzaklığı	100 mm

Öncelikle, Kutup +X ve Kutup –X’ in merkez noktasına uzaklıkları 100 mm olarak alınmış ve Tablo 2.4’ te verilen diğer işlevsel parametre değerleri kullanılarak analiz çalışması yapılmıştır. Analiz çalışmasının sonuçları Şekil 2.11’ de gösterilmiştir. Şekil 2.11 incelendiğinde, Y eksenli kutupları dahilinde bulunan nüvelerin manyetik alana çekim etkisi yaptıkları ve oluşan homojen manyetik alanı etkiledikleri görülmektedir.



Şekil 2.11 Y ekseninde bulunan kutup nüvelerinin homojen manyetik alana etkisi



Şekil 2.12 Konum değişimi ile Y ekseninde bulunan kutup nüvelerinin homojen manyetik akı yoğunluğu bileşenleri üzerine etkisi

Sonrasında, değişken konum parametrelerine bağlı olarak homojen manyetik alanının incelenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Tablo 2.4’ te verilen işlevsel parametre değerleri kullanılarak yapılan analiz çalışmaları sonucu elde edilen, köşegen doğrusu üzerindeki, manyetik akı yoğunluğu bileşenlerinin değişimi Şekil 2.12’ de gösterilmiştir.

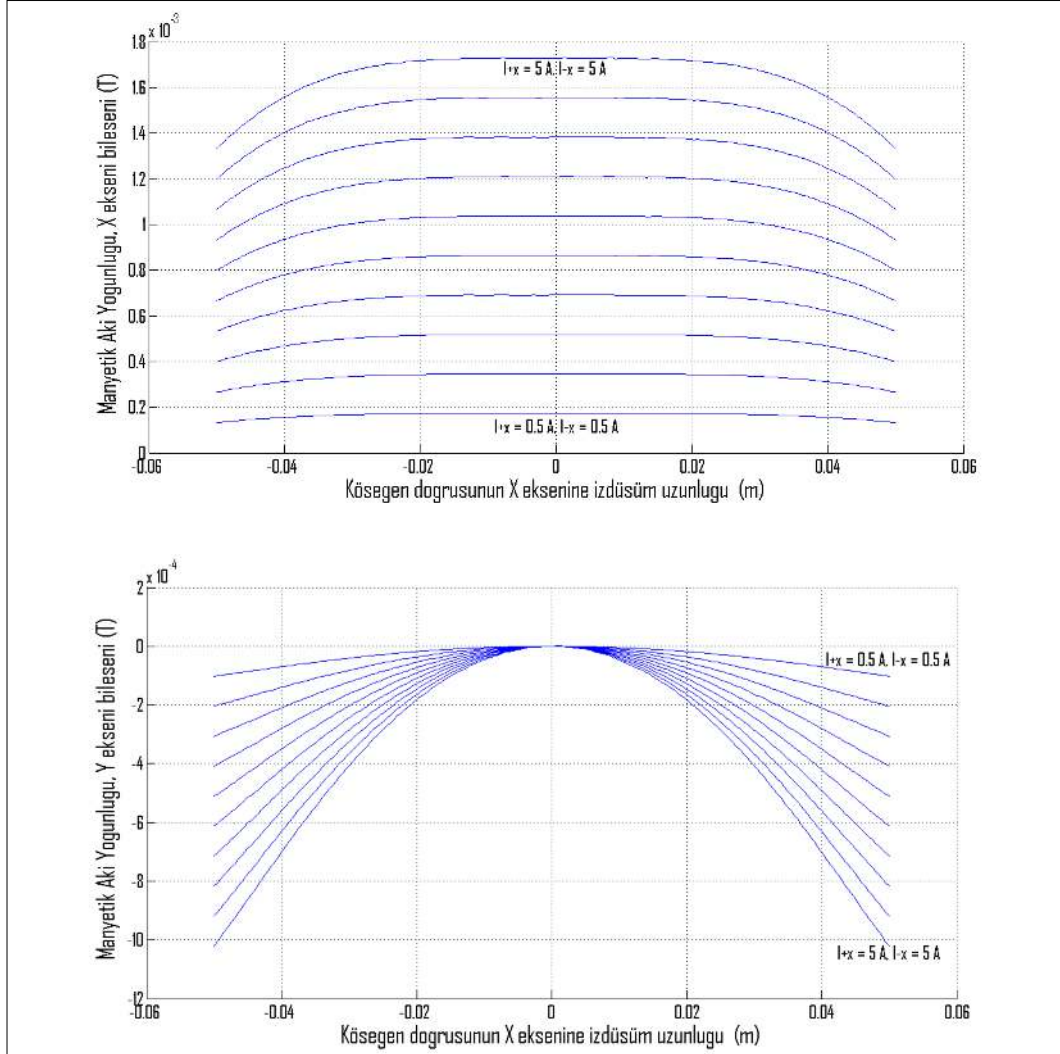
Şekil 2.12 incelendiğinde ve Y ekseninde kutupların bulunmadığı sistemle karşılaştırıldığında, nüve etkisinin manyetik akı yoğunluğu bileşenlerinin değerlerini azatlığı görülmektedir. Homojen manyetik alan karakterinin ise nüvelerden çok fazla etkilenmediği görülmektedir. Ayrıca, Konum parametresi ile manyetik alanın homojenliğinin etkilenmektedir. Kutuplar arası mesafe arttıkça görece daha yüksek homojenlikte manyetik alan elde edilmektedir.

2.2.2.3.2 Akım Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Nüvelerin Homojen Manyetik Alan Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. Tasarım yöntemi ile belirlenen ve incelemede kullanılan işlevsel parametre değerleri Tablo 2.5’ de gösterilmiştir.

Tablo 2.5 İki kutup çiftli sistemde, akım değişimine bağlı olarak, homojen manyetik alan üzerine nüve etkisinin incelenmesinde kullanılan işlevsel parametreler

İşlevsel Parametreler ve Değerleri		
Sembol	Açıklama	Değer
I_{+X}	Kutup +X’ in üzerinden akacak akım	0,5 - 5 A
I_{-X}	Kutup -X’ in üzerinden akacak akım	0,5 - 5 A
I_{+Y}	Kutup +Y’ in üzerinden akacak akım	0 A
I_{-Y}	Kutup -Y’ in üzerinden akacak akım	0 A
L_{+X}	Kutup +X’ in merkez noktasına uzaklığı	100 mm
L_{-X}	Kutup -X’ in merkez noktasına uzaklığı	100 mm
L_{+Y}	Kutup +Y’ in merkez noktasına uzaklığı	100 mm
L_{-Y}	Kutup -Y’ in merkez noktasına uzaklığı	100 mm

Tablo 2.5’ de verilen parametre değerleri (akım parametresi değişken) kullanılarak yapılan analiz çalışmaları sonucu elde edilen, köşegen doğrusu üzerindeki manyetik akı yoğunluğu bileşenlerinin değişimi Şekil 2.13’ te gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Akım değişimi ile Y ekseninde bulunan kutup nüvelerinin homojen manyetik akı yoğunluğu bileşenleri üzerine etkisi

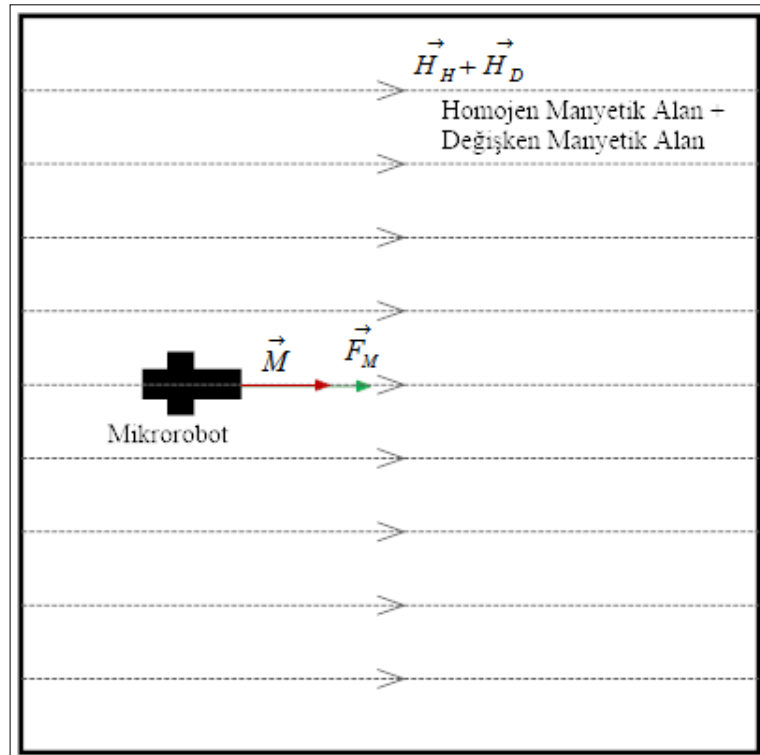
Şekil 2.13 incelendiğinde ve Y ekseninde kutupların bulunmadığı sistemle karşılaştırıldığında, nüve etkisinin manyetik akı yoğunluğu bileşenlerinin değerlerini azalttığı görülmektedir. Homojen manyetik alan karakterinin ise nüvelerden çok fazla etkilenmediği görülmektedir. Ayrıca, akım parametresine bağlı olarak manyetik alanın homojenliği etkilenmektedir. Düşük akımlarda görece yüksek homojenlikte manyetik alan elde edilmektedir.

Mikrorobotun yatay düzlemde yönlendirilmesi, manyetik akı yoğunluğu vektörlerinin toplanabilirliği prensibi ile gerçekleştirilmektedir. Bu durumda, X eksen kutup çiftleri tarafından üretilen manyetik akı yoğunluğu vektörü ile Y eksen kutup çiftleri tarafından üretilen manyetik akı yoğunluğu vektörü toplamının doğrultusu, mikrorobotun yönlendirileceği eksen ifade etmektedir. Burada, her bir kutup çifti tarafından üretilen manyetik akı yoğunluğu vektörünün şiddetinin kontrolü, konum ve akım işlevsel parametrelerinin kontrolü ile sağlanabilmektedir.

2.3 Mikrorobotun Doğrusal Hareketi

Mikrorobotun çalışma alanında yönlendirildiği doğrultu üzerinde, bulunduğu noktadan, belirli bir noktaya doğrusala hareketini gerçekleyecek kutup sistemi tasarımı alt bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.

2.3.1 Mikrorobotun Doğrusal Hareketini Gerçekleyecek Elektromanyetik Teori



Şekil 2.14 Yatay düzlemde yönlendirilmiş mikrorobotun, düzgün değişen manyetik alanın etkisi ile üzerine etkileyen manyetik kuvvet

Elektromanyetik kutup çiftleri tarafından belirli bir doğrultuda yönlendirilen mikrorobot, mikrorobotun manyetizasyon vektörü ile aynı doğrultuda, düzgün değişen ve belirli bir büyüklüğün üzerinde manyetik alanın etkisi ile doğrultulma eksenini boyunca doğrusal hareket gerçekleştirir. Mikrorobotu hareket ettirecek doğrusal kuvvetin sağlanabilmesi için, oluşturulan manyetik akı yoğunluğu değişiminin düzgün değişimli olması gerekmektedir.

Şekil 2.14' te XY yatay düzleminde bulunan, **M** manyetizasyon vektörüne sahip, homojen ve X eksenini doğrultusunda **H_H** manyetik alanı etkisi ile yönlendirilmiş mikrorobotun, **H_D** düzgün değişen manyetik alanı tarafından üzerine etkiyen manyetik itme kuvveti gösterilmektedir.

Düzgün değişen manyetik alan altında, **M** manyetizasyon vektörüne sahip mikrorobota etkiyecek manyetik itme kuvveti :

$$\vec{F}_M = V \cdot (\vec{M} \bullet \nabla) \cdot \vec{B}_D \quad (2.13)$$

şeklinde matematiksel olarak ifade edilmiştir. **M** mikrorobotun manyetizasyon vektörünü, V mikrorobotun hacmini ifade etmektedir. **B_D** ise, düzgün değişen manyetik akı yoğunluğu olup,

$$\vec{B}_D = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}_D \quad (2.14)$$

biçiminde tanımlanır. μ_0 havanın manyetik geçirgenliğini, μ_r mikrorobotun manyetik geçirgenliğini, **H_D** ise düzgün değişen manyetik alan vektörünü ifade etmektedir.

Mikrorobotun düzlemde konumlandırıldığı düşünüldüğünde ve düzlemde bir doğrultu boyunca manyetik itme kuvveti etkisi ile hareket ettirilmesi amaçlandığında manyetik itme kuvveti,

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = V \cdot \begin{bmatrix} M_x \cdot \frac{\partial B_x}{\partial X} + M_y \cdot \frac{\partial B_y}{\partial X} \\ M_x \cdot \frac{\partial B_x}{\partial Y} + M_y \cdot \frac{\partial B_y}{\partial Y} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

biçiminde ifade edilir.

Mikrorobotun manyetizasyon vektörünün yatay düzlemdeki bileşenleri, $M_x = M \cdot \cos \theta$ ve $M_y = M \cdot \sin \theta$ olduğundan yatay düzlemde etkiyecek manyetik kuvvet ifadesi,

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = V \cdot \begin{bmatrix} M \cdot \cos \theta \cdot \frac{\partial B_x}{\partial X} + M \cdot \sin \theta \cdot \frac{\partial B_y}{\partial X} \\ M \cdot \cos \theta \cdot \frac{\partial B_x}{\partial Y} + M \cdot \sin \theta \cdot \frac{\partial B_y}{\partial Y} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

biçimini alır. θ mikrorobotun manyetizasyon vektörünün X eksenini ile yaptığı açığı, B_y manyetik akı yoğunluğu Y eksenini bileşenini, B_x manyetik akı yoğunluğu X eksenini bileşenini ifade etmektedir.

Mikrorobotun X eksenini doğrultusunda, homojen manyetik alan tarafından yönlendirilmiş olduğu durumda; mikrorobotun X eksenini ile yaptığı açı $\theta=0^\circ$ dır. Bu durumda manyetik kuvvet ifadesi,

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = V \cdot \begin{bmatrix} M \cdot \frac{\partial B_x}{\partial X} \\ M \cdot \frac{\partial B_x}{\partial Y} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

olur. Burada yönlendirme doğrultusuna paralel etkiyen bileşen, mikrorobotu istenilen doğrultuda hareket ettirecek manyetik itme kuvvetidir. Diğer bileşen ise, mikrorobotu istenilen hareket doğrultusundan saptırmaya çalışan manyetik kuvvettir. Mikrorobotun istenilen doğrultudan sapma miktarı, manyetik akı yoğunluğu X eksenini bileşeninin yönlendirme eksenine dik eksenindeki değişimine bağlıdır. Bu durumdan kaynaklı olarak, manyetik akı yoğunluğu X eksenini bileşeninin

yönlendirme eksenine dik eksenindeki değişimi mümkün olduğu kadar küçük olacak şekilde tasarım yapılmalıdır.

Mikrorobotun Y eksenini doğrultusunda, homojen manyetik alan tarafından yönlendirilmiş olduğu durumda; mikrorobotun X eksenini ile yaptığı açı $\theta=90^\circ$ dir. Bu durumda manyetik kuvvet ifadesi,

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = V \cdot \begin{bmatrix} M \cdot \frac{\partial B_y}{\partial X} \\ M \cdot \frac{\partial B_y}{\partial Y} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

olur. Bu durumda da, X eksenindeki hareket için belirlenen koşullar geçerlidir.

Hareket doğrultusunda manyetik itme kuvveti oluşturulmasının yanı sıra, doğrusal hareketi gerçekleştirecek manyetik itme kuvvetinin tüm karşıt kuvvetleri yenecek büyüklükte olması gerekmektedir. Bu durumda sağlanması gereken eşitsizlik,

$$F_M > F_K \quad (2.19)$$

olur. F_K harekete karşı iş yapacak karşıt kuvvetleri ifade etmektedir.

2.3.2 Mikrorobotun Doğrusal Hareketini Gerçekleyecek Elektromanyetik Kutup Sisteminin Yapısal ve İşlevsel Parametrelerinin Belirlenmesi

Bir önceki bölümde, mikrorobotun doğrusal hareketi için, belirli bir çalışma alanında düzgün değişen manyetik alan oluşturulması gerekliliği ve hareketi gerçekleyecek manyetik kuvvet değerinin minimum hangi değerde olacağı hususları irdelenmiştir. Bu bölümde ise, düzgün değişen manyetik alan oluşturacak ve hareket için gerekli manyetik kuvvet değerini sağlayacak elektromanyetik sistem tasarımı üzerinde durulacaktır.

Homojen manyetik alan üretebilmek için yapılan çalışmalarda belirlendiği üzere, düzgün değişen manyetik alan üretebilmek için de kutup ya da kutup çiftleri kullanılmasına karar verilmiştir.

2.3.2.1 Tek Bir Elektromanyetik Kutup ile Düzgün Değişen Manyetik Alan Oluşturulmasına Yönelik Çalışmalar

Bu bağlamda yapılan çalışmalar ve incelemeler sonucunda tek bir kutup ile düzgün değişen manyetik alan üretilmediği sonucuna varılmıştır. Şekil 2.3 incelendiğinde, yatay düzlemin her hangi bir alanında belirlenen manyetik alan karakterine sahip bir alanın oluşmadığı görülmektedir.

2.3.2.2 Elektromanyetik Kutup Çiftleri ile Düzgün Değişen Manyetik Alan Oluşturulmasına Yönelik Çalışmalar

Maxwell Kutup Çifti prensibi baz alınarak yapılan çalışmalar sonucunda, düzgün değişen manyetik alan üretebilmek için belirli yapısal ve işlevsel parametrelere uygun olarak dizayn edilmiş kutup çiftlerinin, belirlenen amaç doğrultusunda kullanılmasına karar verilmiştir. Öncelikle Maxwell kutup çiftleri incelenmiş ve belirtilen kutup çiftlerinin dezavantajlara sahip olduğu tespit edilmiştir. Belirlenen dezavantajlar şunlardır:

- Maxwell kutup çiftleri, dahili nüve barındırmamaları nedeniyle, yüksek akım değerlerinde düşük şiddetli manyetik alan oluşturabilmektedir. Bu olumsuz özelliği, geniş çalışma alanları elde etmek için, oldukça büyük konstrüksiyonlara sahip yapıların tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır.
- Maxwell kutup çiftleri kullanılarak dizayn edilen elektromanyetik aktüatör sistemleri dahilindeki kutuplar hareket kabiliyeti kazanmaya müsaade etmemektedir. Bu nedenle, Maxwell kutup çiftlerinin hareketleri ile çalışma alanının taşınabilmesi ve daha geniş alanlarda mikrorobota hareket kabiliyeti kazandırılması imkansızdır.

Varılan çıkarımlardan yola çıkılarak, kutup hareketleri ile çalışma alanının yer değişimine olanak sağlayacak ve daha geniş bir çalışma alanında düzgün değişen manyetik alan üretimini olanaklı kılacak kutup çifti tasarımı yapılmasına karar verilmiştir. Ayrıca, tasarlanacak kutuplar tarafından üretilen manyetik akı yoğunluğu şiddetini arttırmak amacı ile kutupların belirli özelliklere sahip nüveler ihtiva etmesi gerekliliği saptanmıştır.

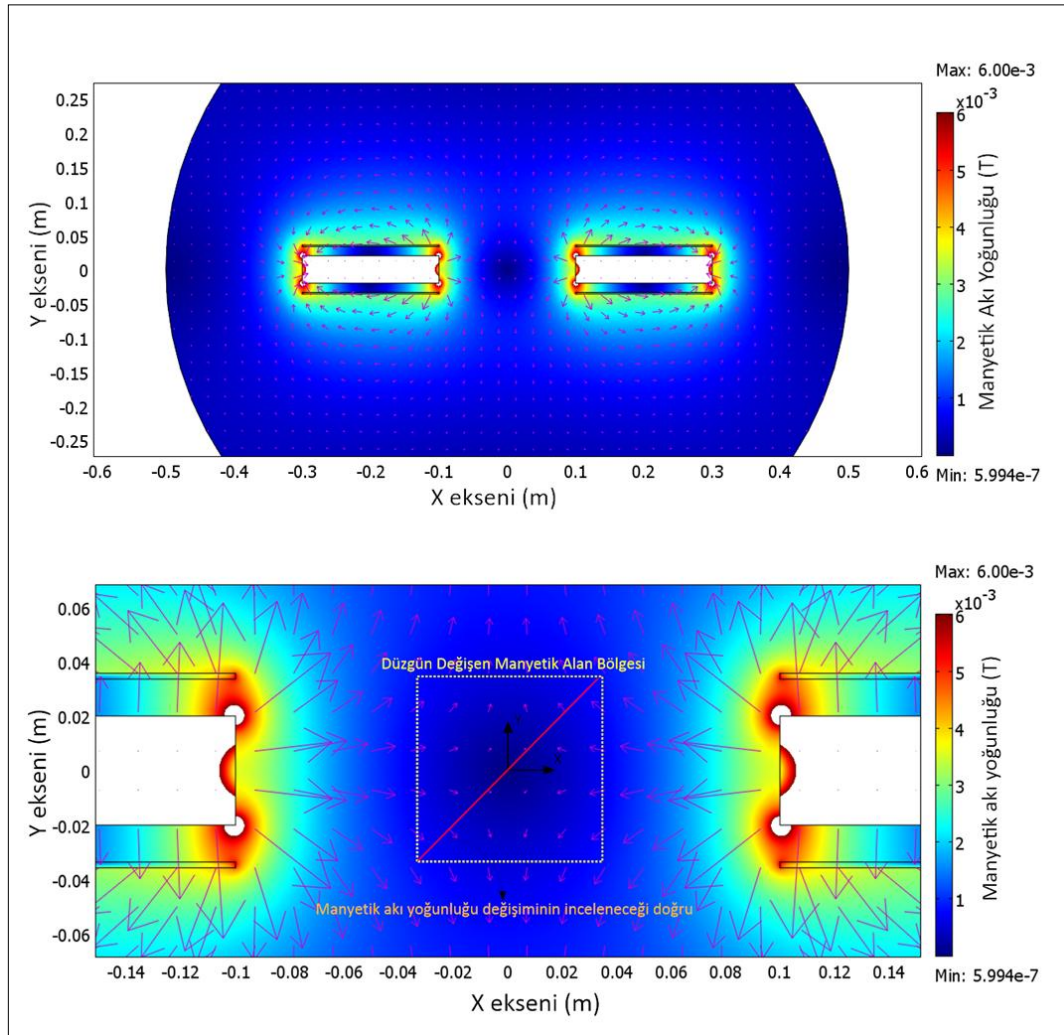
Düzgün değişen manyetik alan üretecek kutup çiftlerinin tasarım çalışmalarında, işlevsel parametrelerin kontrolü ile aynı yapısal özelliklere sahip kutup çiftlerinin hem homojen hem de düzgün değişen manyetik alan üretimine olanak verebilmesinin, kutup sayısını yarı yarıya azaltacağı görülmüştür. Bu düşünceden yola çıkılarak kurgulanan tasarım metodu tarafından belirlenen yapısal parametreler, Şekil 2.4' te gösterilmiştir. İncelemelerde kullanılan tüm yapısal parametre değerleri ise, Tablo 2.1' de verilmiştir. Ayrıca, işlevsel parametre değerleri farklı olmak kaydıyla, kutupların düzleme yerleşimi ve işlevsel parametreleri, homojen manyetik alan oluşturacak kutup çiftiyle aynıdır ve Şekil 2.5' de gösterilmiştir.

Elektromanyetik aktüatör sistemini oluşturacak kutup çiftlerinin yapısal ve işlevsel parametre değerlerini belirlemek amacıyla, Comsol Multiphysics ve Matlab programları kullanılarak kurgulanan tasarım yöntemi üzerinde, sabit yapısal parametrelere ve değişken işlevsel parametrelere bağlı olarak yatay düzlem üzerinde oluşan manyetik alan karakterinin değişiminin incelenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar ve sonuçları alt bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.

2.3.2.2.1 Konum Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Yatay Düzlem Üzerinde Oluşan Düzgün Değişen Manyetik Alan Karakterinin İncelenmesi. Konum parametrelerine bağlı olarak yatay düzlemde oluşan düzgün değişen manyetik alan karakterinin incelenmesinde kullanılacak işlevsel parametreler Tablo 2.6' da verilmiştir.

Tablo 2.6 Konum parametrelerine bağı olarak düzgün değişen manyetik alan karakterinin incelenmesinde kullanılacak işlevsel parametreler

İşlevsel Parametreler ve Değerleri		
Sembol	Açıklama	Değer
I_{+X}	Kutup +X' in üzerinden akacak akım	-1 A
I_{-X}	Kutup -X' in üzerinden akacak akım	1 A
L_{+X}	Kutup +X' in merkez noktasına uzaklığı	70 – 130 mm
L_{-X}	Kutup -X' in merkez noktasına uzaklığı	70 – 130 mm



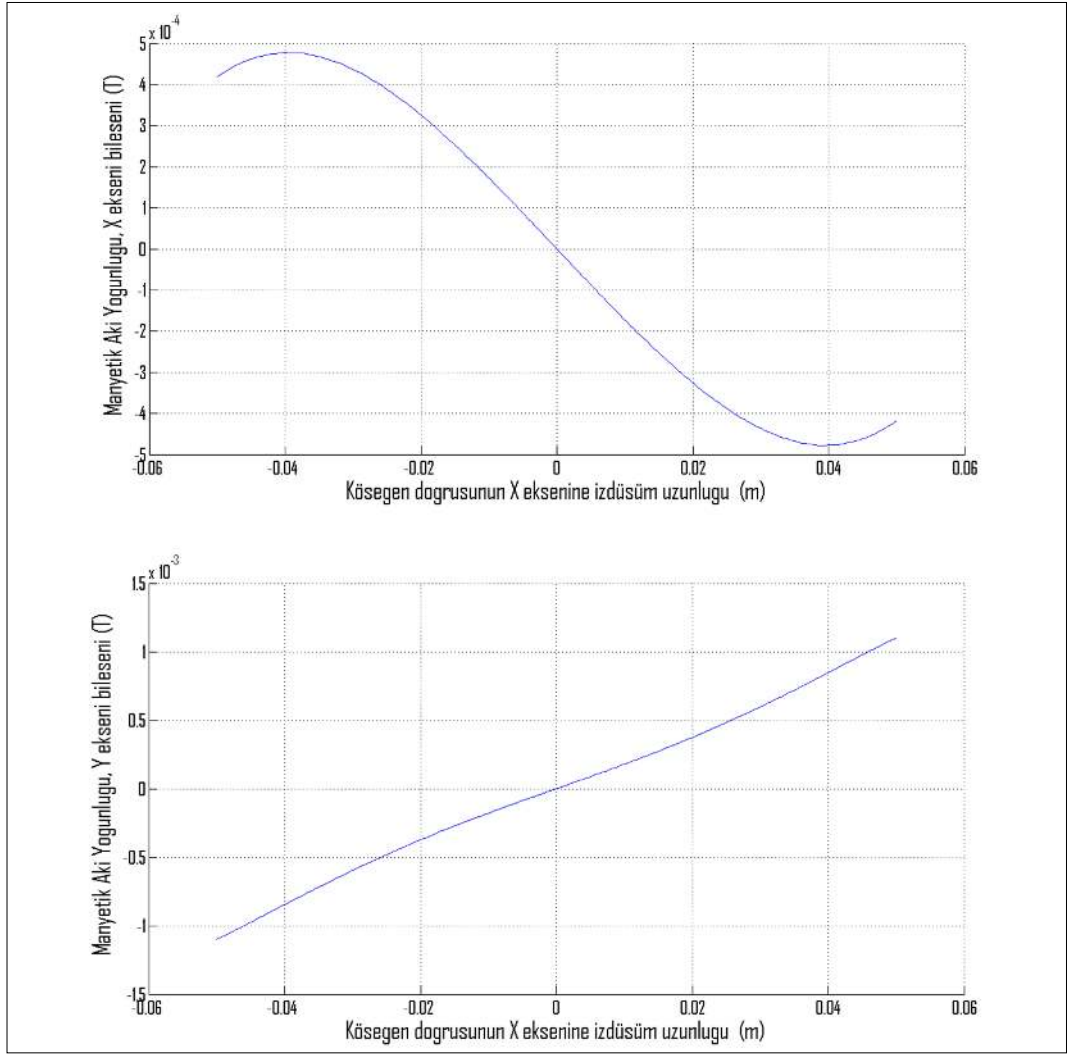
Şekil 2.15 Konum parametrelerinin $L_{+X}=100$ mm ve $L_{-X}=100$ mm olduğı durumda manyetik akı yoğunluğu değışimi ve manyetik alan haritası

Tablo 2.6' da verilen parametre değerleri (*konum parametreleri sabit, $L_{+X} = 100$ mm, $L_{-X} = 100$ mm*) kullanılarak yapılan analiz çalışmaları ile belirlenen yatay düzlem üzerindeki manyetik akı yoğunluğu değişimi ve manyetik alan haritası Şekil 2.15' de gösterilmiştir.

Şekil 2.15 incelendiğinde, yatay düzlemin belirli bir alanında düzgün değişen manyetik alan üretilebildiği tespit edilmiştir. Düzgün değişen manyetik alan, yatay düzlemin merkez noktasından her yöne doğrudur. Bu bölgede bulunan mikrorobota her yönde manyetik itme kuvveti etkimektedir. Belirtilen sebepten dolayı, mikrorobotun hareket ettirilmek istenilen doğrultuda yönlendirilmesi ve yönlendirme işlemini yapan homojen manyetik alan etkisinin doğrusal hareket esnasında da var olması gerekmektedir.

Düzgün değişen manyetik alanın üretilebildiği alanın, yatay düzlemin merkez noktasıyla eş merkezli ve eşit kenar uzunluklarına sahip kare bir alan olduğu kabulü yapılmıştır. Yapılan kabule göre, düzgün değişen manyetik alanın üretilebildiği alanın sınırlayıcı koşulunun, karenin köşe noktaları olduğu tespit edilmiştir. Bu tespit ile sınırların belirlenmesi amacıyla yönelik olarak, karenin köşegen doğruları üzerindeki değişimler incelenmiştir. Karenin iki köşegeni üzerindeki manyetik alan karakterinin eşlenik olması sebebiyle sonuçlar tek bir köşegen üzerinde gösterilmiştir. Doğrusal hareket şartında, homojen manyetik alan etkisinin bulunmasından dolayı homojen manyetik alan sınırları da bu bölge için sınırlayıcı koşul olacaktır.

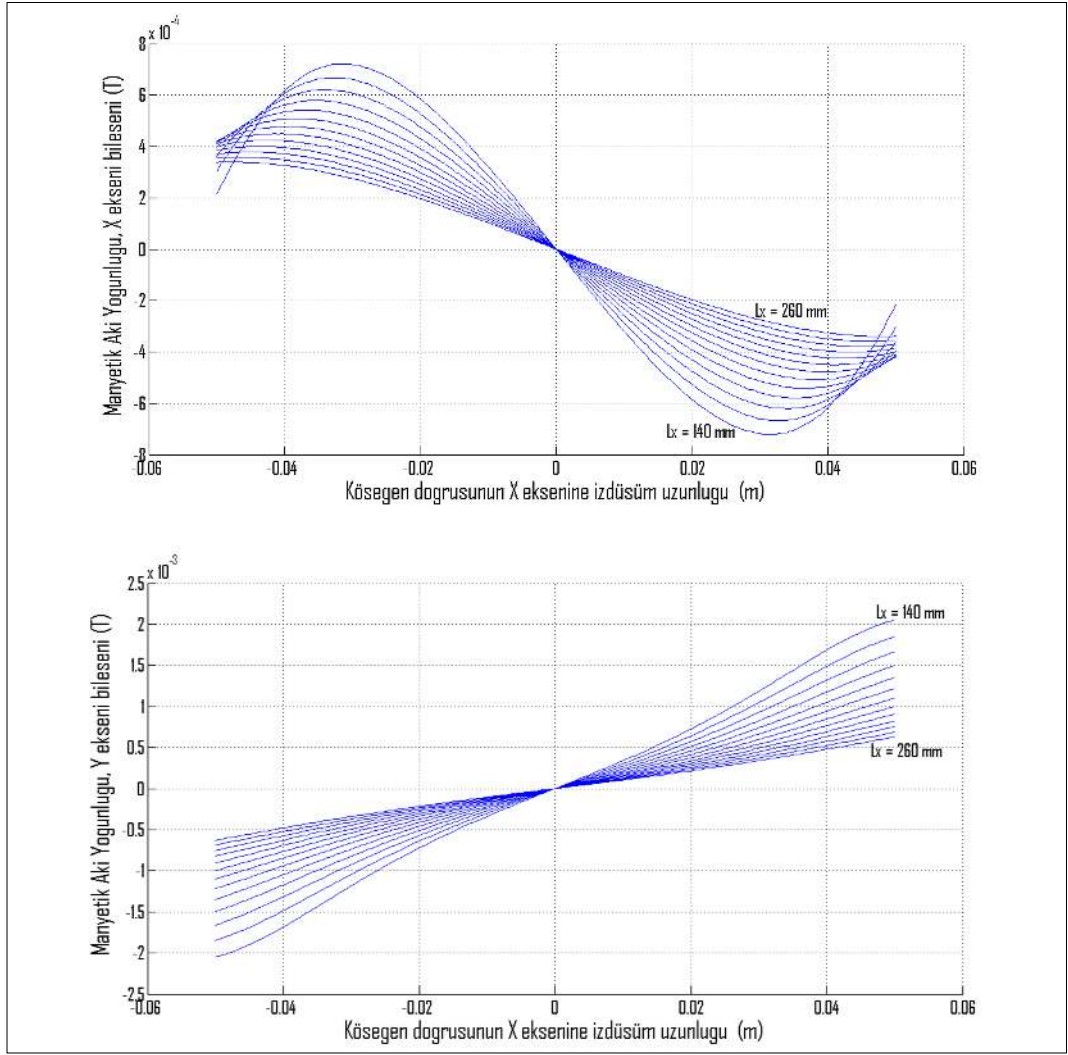
Köşegen doğrusu üzerinde, manyetik akı yoğunluğu X ve Y eksen bileşenlerinin değişimleri Şekil 2.16' da gösterilmiştir. Şekil 2.16 incelendiğinde, doğrunun merkez noktasından uzaklaştıkça manyetik akı yoğunluğu X ve Y eksen bileşenlerinin değerlerinin ve doğrusallıklarının azaldığı görülmektedir. Manyetik akı yoğunluğu Y eksen bileşeninin değerinin daha yüksek olması sebebiyle bu eksen de kuvvet oluşturmak daha etkin sonuç verecektir. Bu amaç doğrultusunda, düzgün değişen manyetik alan üretecek kutup çiftinin, homojen manyetik alan oluşturan kutup çiftine dik eksenli konumlandırılması yapılacaktır.



Şekil 2.16 Köşegen doğrusu üzerinde manyetik akı yoğunluğu X ve Y eksenine bileşenlerinin değişimi

Bu çalışma kapsamında, ayrıca, konum parametresinin düzgün değişen manyetik alana etkileri araştırılmıştır. Tablo 2.6’ da verilen parametre değerleri (*konum parametresi değişken*) kullanılarak yapılan analiz çalışmaları sonucu elde edilen, köşegen doğrusu üzerindeki manyetik akı yoğunluğu bileşenlerinin değişimi Şekil 2.17’ de gösterilmiştir.

Şekil 2.17 incelendiğinde, kutuplar arası mesafe arttığında manyetik akı yoğunluğu değişiminin doğrusallığının arttığı, fakat şiddetinin azaldığı görülmektedir.



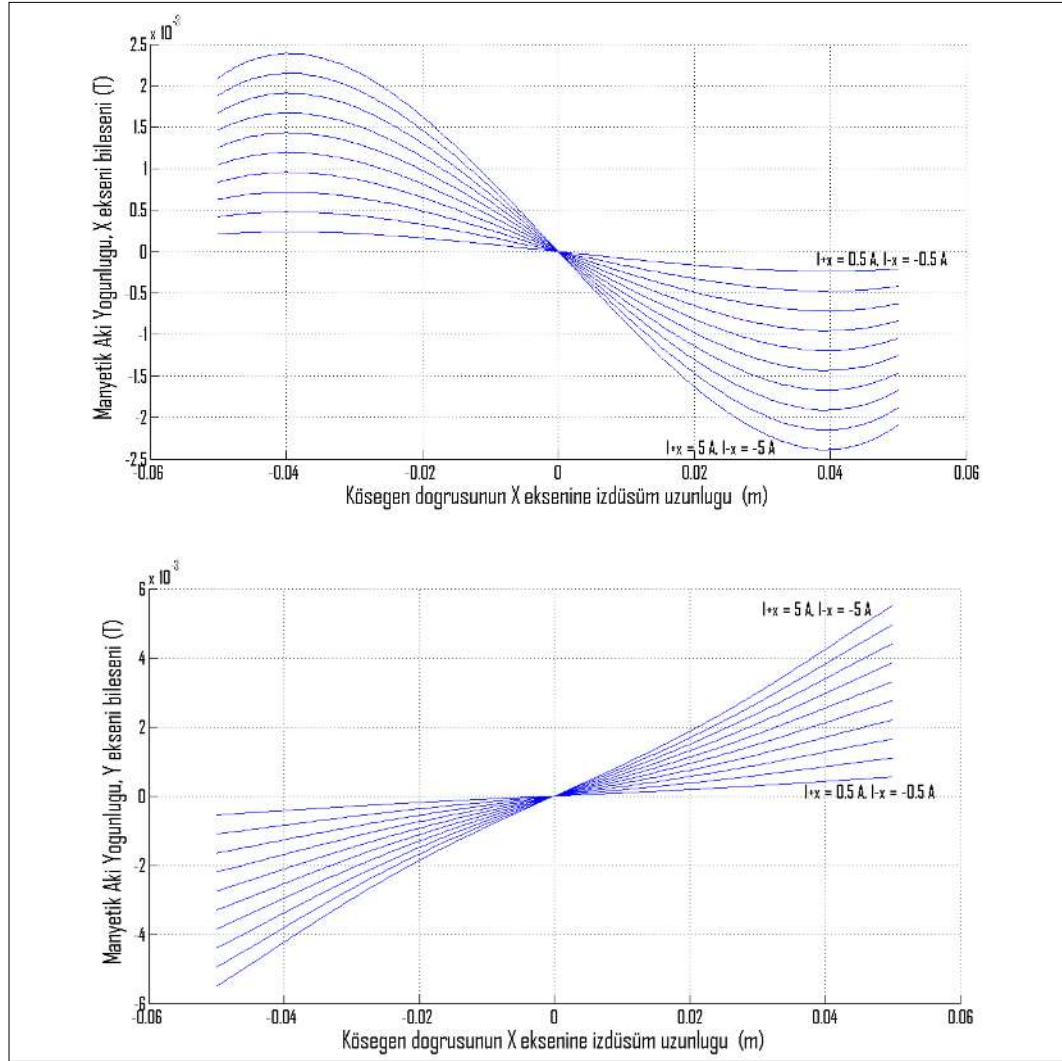
Şekil 2.17 Değişken konum parametrelerine bağlı, köşegen doğrusu üzerinde manyetik akı yoğunluğu X ve Y eksen bileşenlerinin değişimi

2.3.2.2.2 Akım Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Yatay Düzlem Üzerinde Oluşan Düzgün Değişen Manyetik Alan Karakterinin İncelenmesi. Çalışmanın amacı, aynı yapısal parametrelere sahip kutup çifti sisteminde, akım parametresinin manyetik akı yoğunluğuna etkisinin incelenmesidir. Bu amaç doğrultusunda Tablo 2.7' de verilen işlevsel parametre değerleri kullanılmıştır.

Tablo 2.7' de verilen parametre değerleri (akım parametresi değişken) kullanılarak yapılan analiz çalışmaları sonucu elde edilen, köşegen doğrusu üzerindeki manyetik akı yoğunluğu bileşenlerinin değişimi Şekil 2.18' de gösterilmiştir.

Tablo 2.7 Akım parametrelerine bağı olarak manyetik alan karakterinin incelenmesinde kullanılacak işlevsel parametreler

İşlevsel Parametreler ve Değerleri		
Sembol	Açıklama	Değer
I_{+X}	Kutup +X' in üzerinden akacak akım	0,5 – 5 A
I_{-X}	Kutup -X' in üzerinden akacak akım	-0,5 – -5 A
L_{+X}	Kutup +X' in merkez noktasına uzaklığı	100 mm
L_{-X}	Kutup -X' in merkez noktasına uzaklığı	100 mm



Şekil 2.18 Değişken akım parametrelerine bağı, köşegen doğrusu üzerinde manyetik akı yoğunluğu X ve Y eksenli bileşenlerinin değişimi

Şekil 2.18 incelendiğinde, kutupların sabit bir konumda bulunduğu durumda, akım şiddetine bağlı olarak manyetik akı yoğunluğu bileşenlerinin de şiddetlerinin arttığı görülmektedir.

Düzgün değişen manyetik alan oluşturmak amacıyla yapılan çalışmalar neticesinde varılan sonuçlar şunlardır:

- Belirli yapısal ve işlevsel parametrelere göre dizayn edilecek nüveli kutup çifti tarafından, sınırlı bir alanda, her yönde düzgün değişen manyetik alan üretmek mümkündür.
- Mikrorobot üzerine manyetik itme kuvveti etkimesine olanak sağlayacak düzgün değişen manyetik alanın her yönde oluşması nedeniyle, mikrorobotun belirli bir doğrultuda yönlendirilmesi ve yönlendirme işlemini yapan homojen manyetik alan etkisinin doğrusal hareket sırasında da çalışma alanında bulunması gerekmektedir.
- Kutup eksenine dik yönde oluşan manyetik akı yoğunluğu bileşeni değişiminin şiddetinin diğer eksene göre yüksek olması sebebiyle, yönlendirilmiş robotun manyetizasyon vektörüne merkez eksenini dik olacak şekilde kutuplar yerleştirilmelidir.

2.3.2.3 Farklı Doğrultularda Düzgün Değişen Manyetik Alan Oluşturulmasına Yönelik Çalışmalar

Mikrorobotun yatay düzlemde hareket kabiliyeti kazanabilmesi için, en az iki doğrultuda doğrusal hareket gerçekleştirebilmesi gereklidir. Bu gerekçe nedeniyle, her daim yönlendirme kutuplarına dik ekseninde konumlandırılmış kutup çiftleri kullanılmalıdır. Bu durumda, X ve Y eksenlerinde konumlandırılmış kutup çiftleri tasarlanmıştır. Kutupların, homojen manyetik alan üretimine de olanak sağlaması amacı ile yapısal parametreleri homojen manyetik alan üreten kutuplarla eşleniktir. Aynı zamanda, kutupların yatay düzleme yerleşimi ve değerleri farklı olmak şartıyla işlevsel parametreleri aynıdır. İşlevsel parametreler Şekil 2.10' da gösterilmiştir.

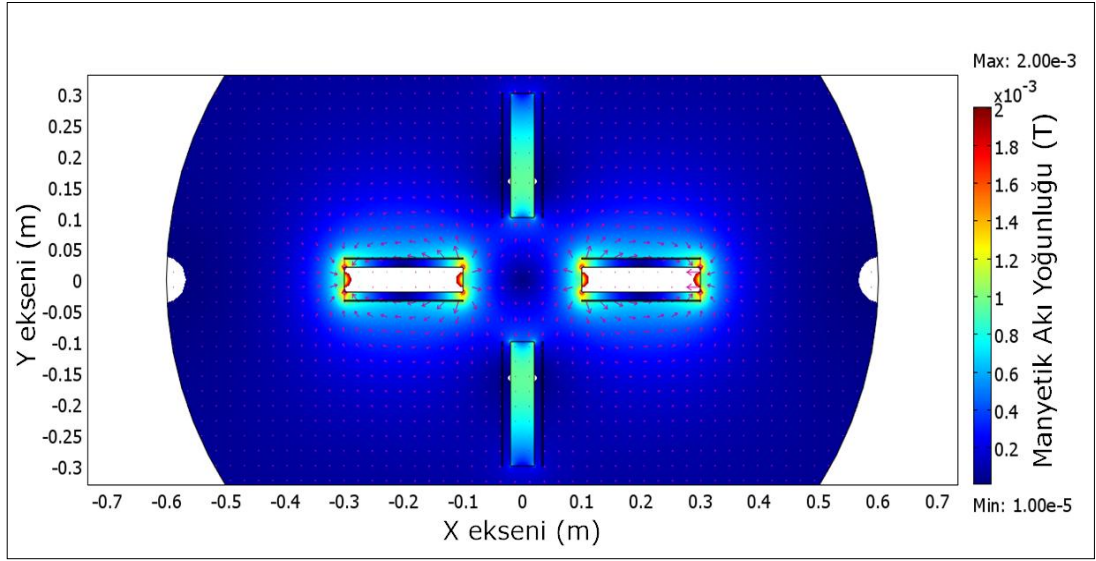
Birbirine dik eksenlerde konumlandırılmış kutup çiftleri, yapılarında nüve ihtiva etmeleri nedeniyle, birbirlerini manyetik açıdan etkilemektedir. Nüvelerin düzgün değişen manyetik alanı etkilemelerinin incelenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu etkinin incelenmesi amacıyla yapılan çalışmalar ve sonuçları şunlardır:

2.2.2.3.1 Konum Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Nüvelerin Düzgün Değişen Manyetik Alan Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. Çalışmada diğer çalışmalarla birlikte değerlendirme yapılabilmesi amacı ile Tablo 2.1’ de verilen yapısal parametre değerleri kullanılmıştır. İşlevsel parametre değerleri ise, Tablo 2.8’ de verilmiştir.

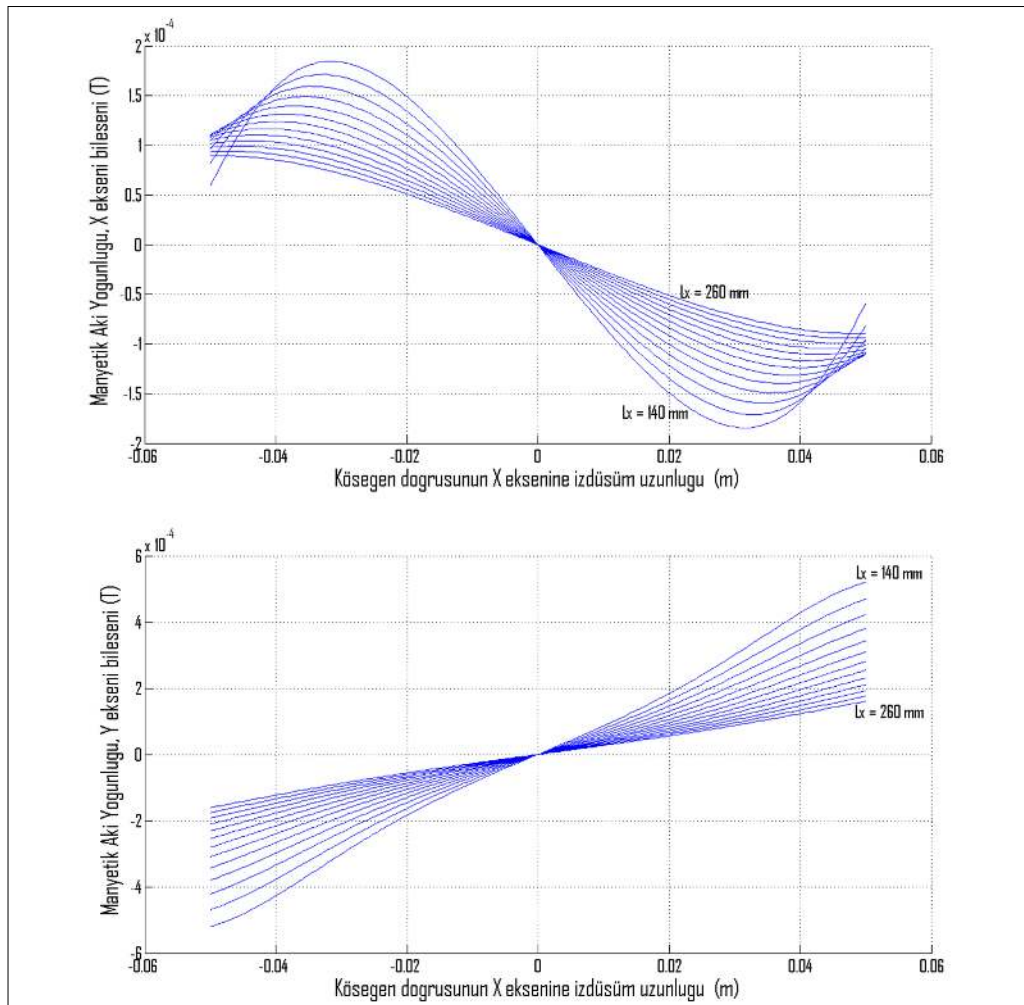
Tablo 2.8 Konum değişimi ile Y ekseninde bulunan kutup nüvelerinin düzgün değişen manyetik akı yoğunluğu bileşenleri üzerine etkisi

İşlevsel Parametreler ve Değerleri		
Sembol	Açıklama	Değer
I_{+X}	Kutup +X’ in üzerinden akacak akım	1 A
I_{-X}	Kutup -X’ in üzerinden akacak akım	-1 A
I_{+Y}	Kutup +Y’ in üzerinden akacak akım	0 A
I_{-Y}	Kutup -Y’ in üzerinden akacak akım	0 A
L_{+X}	Kutup +X’ in merkez noktasına uzaklığı	70 – 130 mm
L_{-X}	Kutup -X’ in merkez noktasına uzaklığı	70 – 130 mm
L_{+Y}	Kutup +Y’ in merkez noktasına uzaklığı	100 mm
L_{-Y}	Kutup -Y’ in merkez noktasına uzaklığı	100 mm

Öncelikle, Kutup +X ve Kutup –X’ in merkez noktasına uzaklıkları 100 mm olarak alınmış ve Tablo 2.8’ de verilen diğer işlevsel parametre değerleri kullanılarak analiz çalışması yapılmıştır. Analiz çalışmasının sonuçları Şekil 2.19’ da gösterilmiştir. Şekil 2.19 incelendiğinde, Y eksenini kutupları dahilinde bulunan nüvelerin manyetik alanı etkiledikleri görülmektedir.



Şekil 2.19 Y ekseninde bulunan kutup nüvelerinin düzgün değişen manyetik alana etkisi



Şekil 2.20 Konum değişimi ile Y ekseninde bulunan kutup nüvelerinin düzgün değişen manyetik akı yoğunluğu bileşenleri üzerine etkisi

Sonrasında, değişken konum parametrelerine bağlı olarak düzgün değişen manyetik alanının incelenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Tablo 2.8’ de verilen işlevsel parametre değerleri kullanılarak yapılan analiz çalışmaları sonucu elde edilen, köşegen doğrusu üzerindeki, manyetik akı yoğunluğu bileşenlerinin değişimi Şekil 2.20’ de gösterilmiştir.

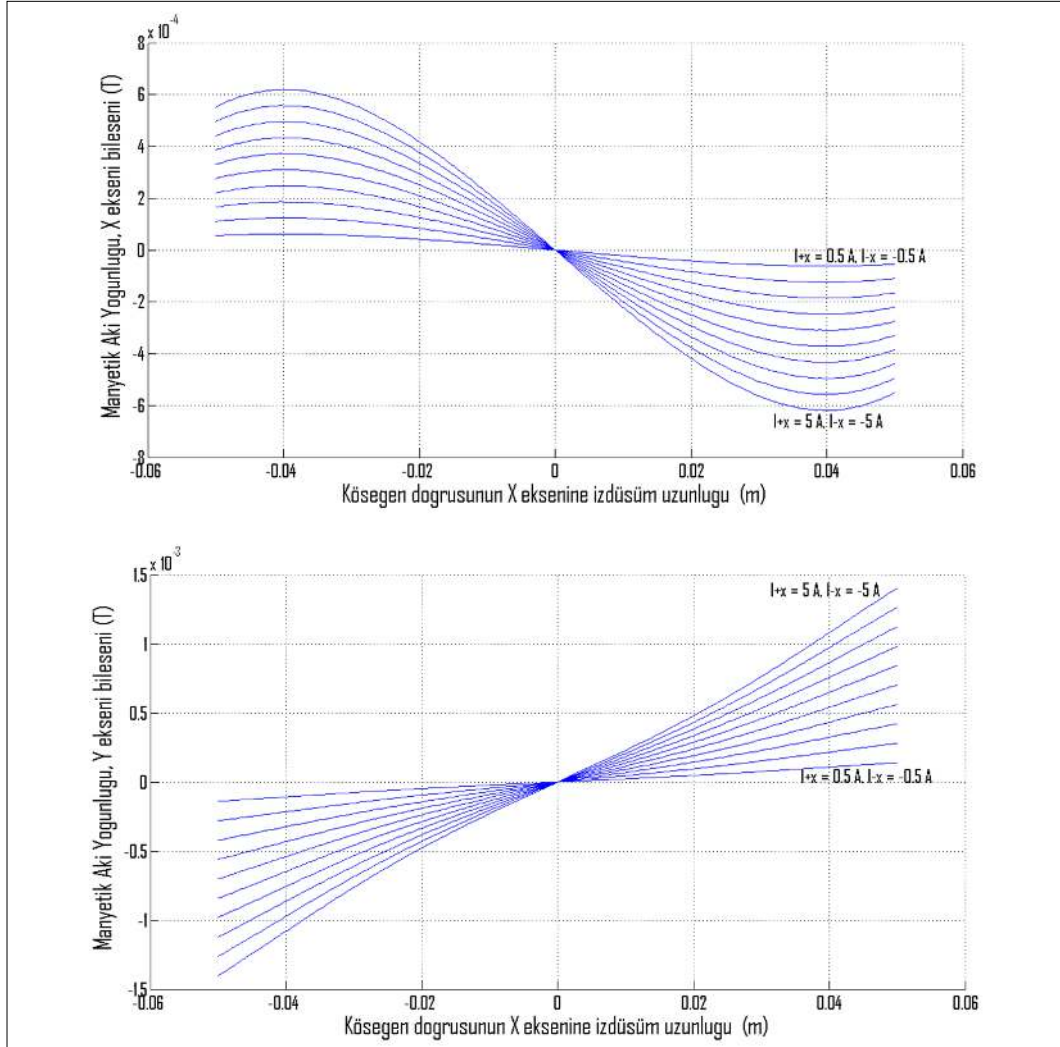
Şekil 2.20 incelendiğinde ve Y ekseninde kutupların bulunmadığı sistemle karşılaştırıldığında, nüve etkisinin manyetik akı yoğunluğu bileşenlerinin değerlerini azatlığı görülmektedir. Düzgün değişen manyetik alan karakterinin ise nüvelerden çok fazla etkilenmediği görülmektedir. Ayrıca, Konum parametresi ile manyetik alanın doğrusallığı etkilenmektedir. Kutuplar arası mesafe arttıkça görece daha yüksek doğrusallıkta manyetik alan elde edilmektedir.

2.2.2.3.2 Akım Parametresi Değişimine Bağlı Olarak, Nüvelerin Düzgün Değişen Manyetik Alan Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. Tasarım yöntemi ile belirlenen ve incelemede kullanılan işlevsel parametre değerleri Tablo 2.9’ da verilmiştir.

Tablo 2.9 İki kutup çiftli sistemde, akım değişimine bağlı olarak, düzgün değişen manyetik alan üzerine nüve etkisinin incelenmesinde kullanılan işlevsel parametreler

İşlevsel Parametreler ve Değerleri		
Sembol	Açıklama	Değer
I_{+X}	Kutup +X’ in üzerinden akacak akım	0,5 - 5 A
I_{-X}	Kutup -X’ in üzerinden akacak akım	-0,5 - -5 A
I_{+Y}	Kutup +Y’ in üzerinden akacak akım	0 A
I_{-Y}	Kutup -Y’ in üzerinden akacak akım	0 A
L_{+X}	Kutup +X’ in merkez noktasına uzaklığı	100 mm
L_{-X}	Kutup -X’ in merkez noktasına uzaklığı	100 mm
L_{+Y}	Kutup +Y’ in merkez noktasına uzaklığı	100 mm
L_{-Y}	Kutup -Y’ in merkez noktasına uzaklığı	100 mm

Tablo 2.9’ da verilen parametreler (*akım parametresi değişken*) kullanılarak yapılan analiz çalışmaları sonucu elde edilen, köşegen doğrusu üzerindeki manyetik akı yoğunluğu bileşenlerinin değişimi Şekil 2.21’ de gösterilmiştir.

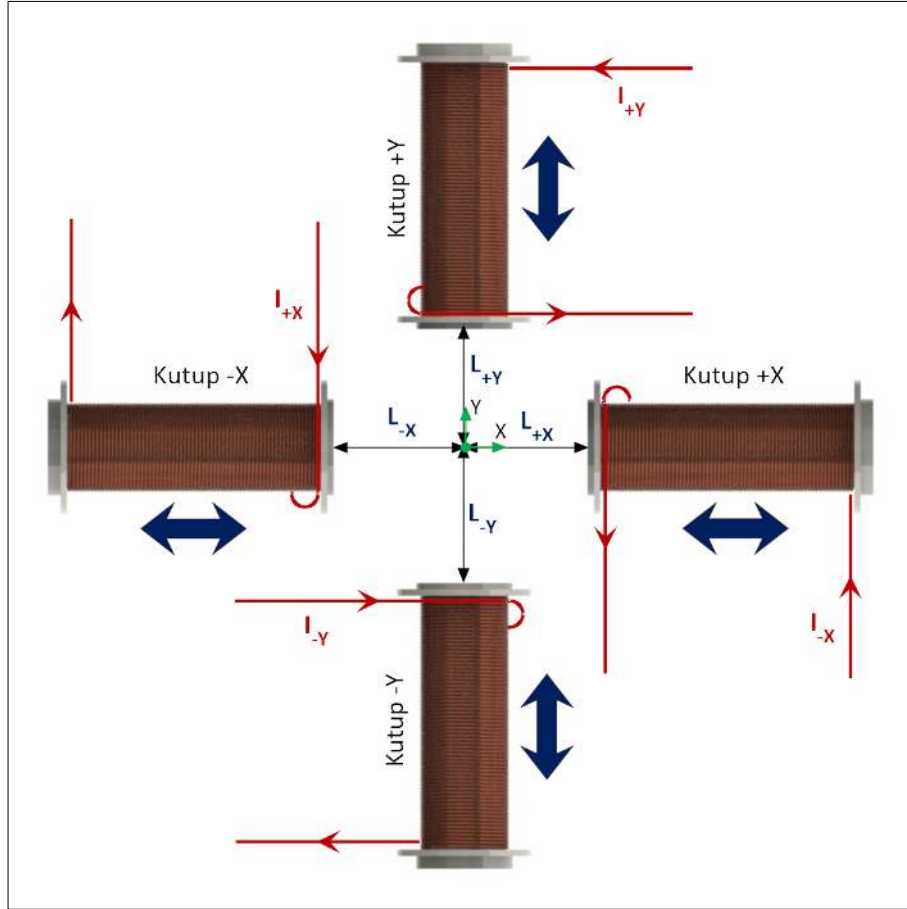


Şekil 2.21 Akım değişimi ile Y ekseninde bulunan kutup nüvelerinin düzgün değişen manyetik akı yoğunluğu bileşenleri üzerine etkisi

Şekil 2.21 incelendiğinde ve Y ekseninde kutupların bulunmadığı sistemle karşılaştırıldığında, nüve etkisinin manyetik akı yoğunluğu bileşenlerinin değerlerini azalttığı görülmektedir. Düzgün değişen manyetik alan karakterinin ise nüvelerden çok fazla etkilenmediği görülmektedir. Ayrıca, akım parametresine bağlı olarak manyetik alanın doğrusallığı etkilenmektedir. Düşük akımlarda görece yüksek doğrusallıkta manyetik alan elde edilmektedir.

2.4 Mikrorobotun Düzlemde Hareketini Gerçekleyecek Elektromanyetik Kutup Sisteminin Tasarımı ve Yapısal – İşlevsel Parametrelerin Belirlenmesi

Önceki bölümlerde, belirli bir noktada bulunan mikrorobotun, yatay düzlemde hareketi için öncelikli olarak, homojen manyetik alan etkisi ile yönlendirilmesi gerekliliği açıklanmıştır. Sonrasında, belirli bir doğrultuda yönlendirilmiş mikrorobotun aynı doğrultuda sabit ivmeli doğrusal hareketinin gerçekleştirilebilmesi için, mikrorobotun manyetizasyon vektörü ile çakışık ve düzgün değişen manyetik alan meydana getirilmesi gerekliliği belirtilmiştir. Ayrıca, hareket için ihtiyaç duyulan manyetik tork ve manyetik itme kuvvetinin hangi değerlerde olması gerektiği hususlarına da değinilmiştir. Bu bölümde ise, belirtilen tüm bu şartları yerine getirebilecek, akım ve konum kontrolü ile mikrorobota düzlemde hareket kabiliyeti kazandıracak, elektromanyetik aktüatör sistemi tasarımı üzerinde durulacaktır.



Şekil 2.22 Elektromanyetik aktüatör sistemini oluşturan kutup çiftlerinin yatay düzleme yerleşimi

Elektromanyetik aktüatör sistemi, yapısal olarak, yatay düzleme paralel ve birbirine dik eksenlerde konumlandırılmış, iki adet kutup çiftinden meydana gelmektedir. Her bir kutup çifti, merkez eksen doğrultusunda hareket kabiliyetine sahiptir. Şekil 2.22, elektromanyetik aktüatör sistemini oluşturan kutupların, yatay XY düzlemine yerleşimini göstermektedir. Kutup +X ve Kutup -X, X eksen kutup çiftini; Kutup +Y ve Kutup -Y, Y eksen kutup çiftini ifade etmektedir. XY düzleminin merkez noktası, kutup sisteminin ve mikrorobotun hareketini gerçekleştireceği çalışma alanının da merkez noktasıdır. Çift taraflı oklar, kutupların hareket kabiliyetine sahip olduğu yönleri belirtmektedir.

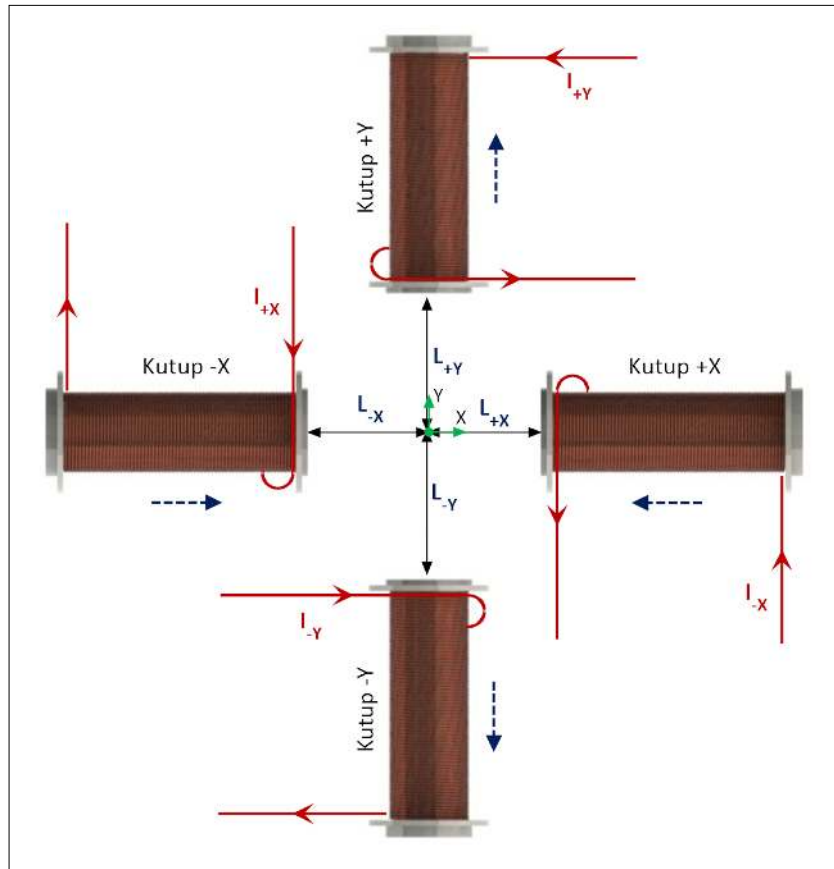
Kutup çiftlerini oluşturan ferrit nüve ve solenoid bobin ihtiva eden kutupların tüm yapısal parametreleri eşleniktir. Yapısal parametreler ve parametre değerleri, Comsol Multyphysics ve Matlab programları kullanılarak kurgulanan tasarım yöntemi ile belirlenmiştir. Yapısal parametreler Şekil 2.4' te gösterilmiştir. Yapısal parametre değerleri ise Tablo 2.1' de verilmiştir.

Aktüatör sistemi tarafından çalışma alanında meydana getirilen manyetik alan karakteri, kutupların konum ve akım kontrolü ile biçimlendirilmektedir. Manyetik alan karakteri, mikrorobota etkiyecek tork ve kuvvet değerlerinin şiddetini ve yönünü belirlemektedir. Mikrorobotun düzlemde hareketi, mikrorobotun yönlendirilmesi ve yönlendirildiği eksen itme kuvveti etkisi ile doğrusal hareketi sırasıyla gerçekleşmektedir.

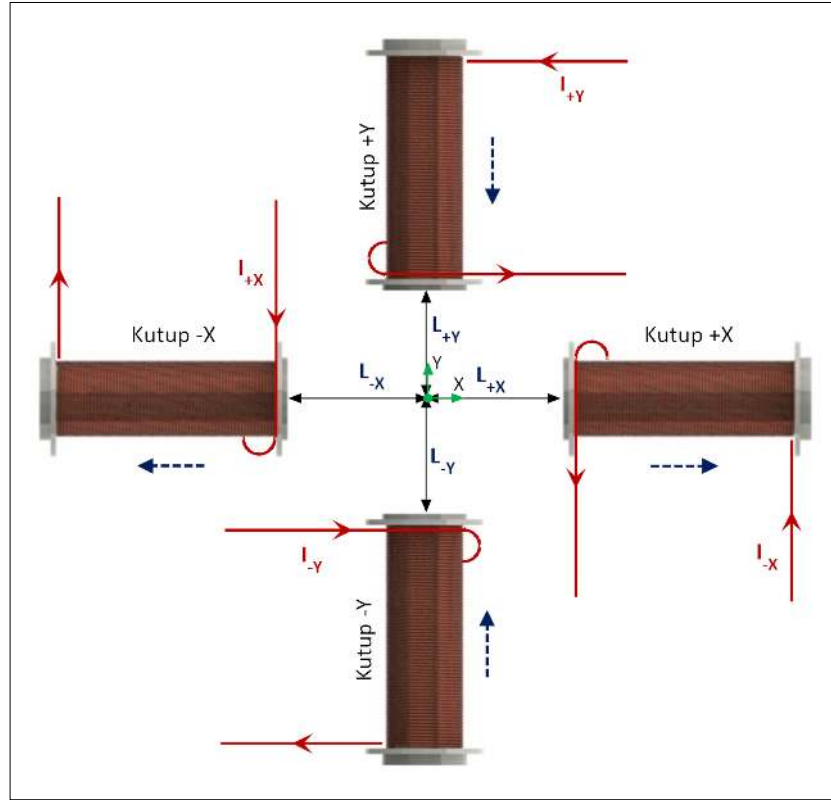
Mikrorobota düzlemde hareket kabiliyeti kazandıracak homojen manyetik alan ve düzgün değişen manyetik alan üretimi, elektromanyetik eyleyici sistemi dahilindeki kutupların konum ve akım kontrolü ile sağlanmaktadır.

Tez çalışmasının amacı, mikrorobotu X ya da Y eksenine paralel bir konumda yönlendirmek ve mikrorobota yönlendirildiği doğrultuda itme kuvveti etkisi ile doğrusal hareket yaptırmaktır. Belirtilen amaç doğrultusunda, kutup çiftlerinin yatay düzleme yerleşimi ve işlevsel parametreleri belirlenmiştir. Şekil 2.23, mikrorobotun çalışma alanında, X eksenine paralel doğrultularda yönlendirilmesini ve bu doğrultularda doğrusal hareketini gerçekleştirecek işlevsel parametreleri (kutupların

konum ve akım parametreleri); Şekil 2.24 ise, mikrorobotun çalışma alanında, Y eksenine paralel doğrultularda yönlendirilmesini ve bu doğrultularda doğrusal hareketini gerçekleştirecek işlevsel parametreleri (kutupların konum ve akım parametreleri) göstermektedir. İşlevsel parametreler, modellenen elektromanyetik eyleyici sistemi üzerinde sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan sistematik analizler sonucunda belirlenmiştir. Mikrorobotun gerçekleştirecek hareketinin şekline göre biçimlenen, kutup yerleşimi ve işlevsel parametre değerleri Tablo 2.10' da gösterilmektedir.



Şekil 2.23 Mikrorobotun X ekseninde hareketini gerçekleştirecek kutup hareketleri konfigürasyonu



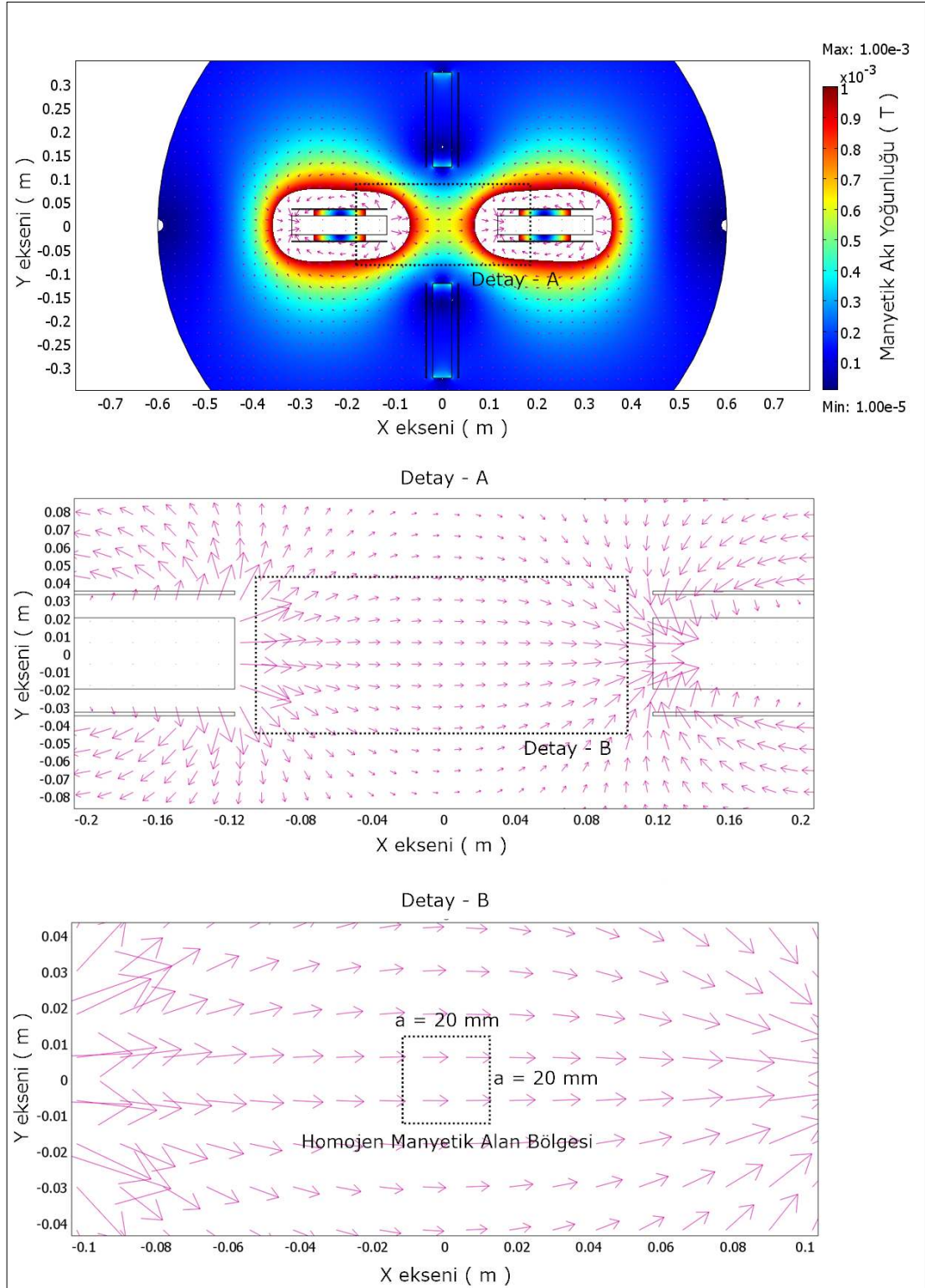
Şekil 2.24 Mikrorobotun Y ekseninde hareketini gerçekleyecek kutup hareketleri konfigürasyonu

Tablo 2.10 Mikrorobotun gerçekleyecek hareketinin şekline göre biçimlenen, kutup yerleşimi ve işlevsel parametre değerleri

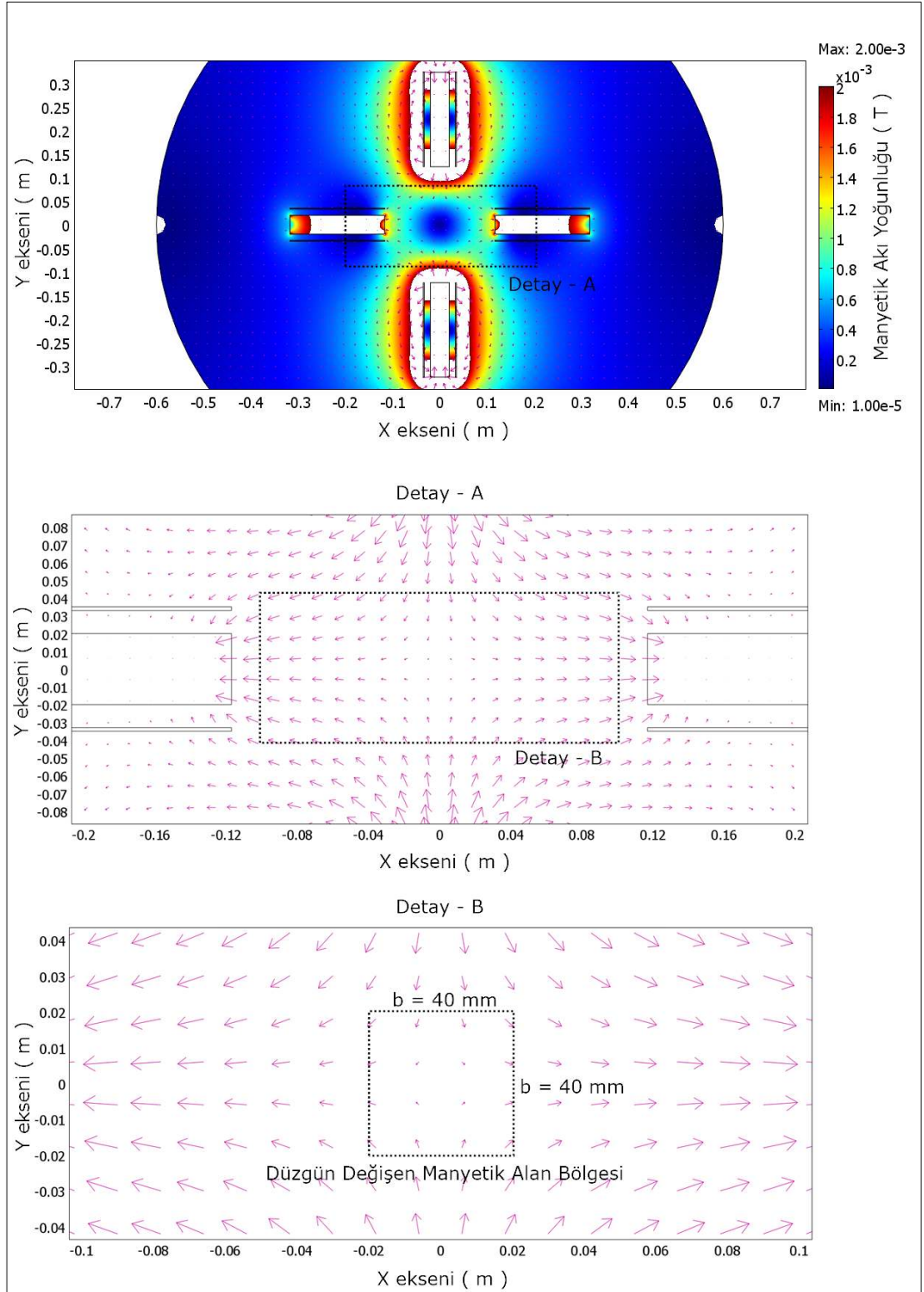
		İşlevsel Parametre Değerleri			
Mikrorobotun Hareketi	Kutup Yerleşimi	L_{+X} / L_{-X} (mm)	L_{+Y} / L_{-Y} (mm)	I_{+X} / I_{-X} (A)	I_{+Y} / I_{-Y} (A)
Yönlendirme: +X yönü	Şekil 2.23	117 / 117	123 / 123	+2,2/+2,2	0 / 0
Doğrusal Hareket: +X yönü	Şekil 2.23	117 / 117	123 / 123	+2,2/+2,2	+3,8/-3,8
Yönlendirme: -X yönü	Şekil 2.23	117 / 117	123 / 123	-2,2/-2,2	0 / 0
Doğrusal Hareket: -X yönü	Şekil 2.23	117 / 117	123 / 123	-2,2/-2,2	-3,8/+3,8
Yönlendirme: +Y yönü	Şekil 2.24	123 / 123	117 / 117	0 / 0	+2,2/+2,2
Doğrusal Hareket: +Y yönü	Şekil 2.24	123 / 123	117 / 117	+3,8/-3,8	+2,2/+2,2
Yönlendirme: -Y yönü	Şekil 2.24	123 / 123	117 / 117	0 / 0	-2,2/-2,2
Doğrusal Hareket: -Y yönü	Şekil 2.24	123 / 123	117 / 117	-3,8/+3,8	-2,2/-2,2

Tablo 2.10' da belirtilen mikrorobot hareketleri incelendiğinde, tüm hareketlerin aynı kare çalışma alanı tarafından sınırlandırıldığı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, +X yönüne doğrultma ve + X yönünde doğrusal hareketi gerçekleyecek eyleyici sisteminin yapısal ve işlevsel parametreleri kullanılarak yapılan nümerik analiz çalışmaları sonucu çalışma alanı boyutları belirlenmiştir.

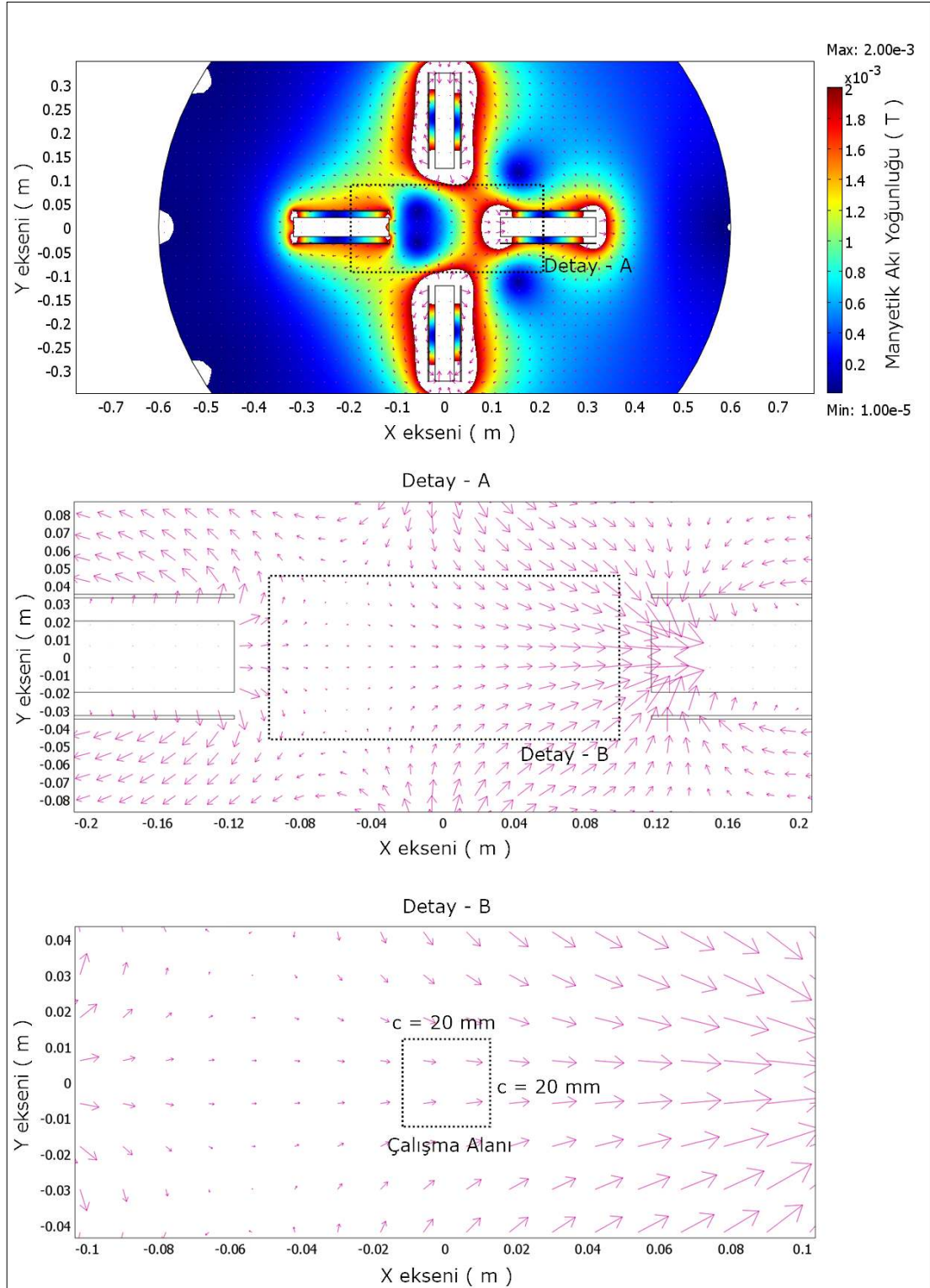
Şekil 2.25, mikrorobotu +X yönüne doğrultacak, X eksen kutup çifti tarafından düzlemde oluşturulan manyetik alan haritasını göstermektedir. Manyetik alanın homojen olduğu bölge hareketi gerçekleyeceği için, bu bölge doğrultma çalışma alanı olarak tespit edilmiştir. Şekil 2.26, mikrorobotun +X yönünde doğrusal hareketini gerçekleyecek, Y eksen kutup çiftleri tarafından düzlemde oluşturulan manyetik alan haritasını göstermektedir. Şekil 2.27 ise, mikrorobotun +X yönünde doğrusal hareketi sırasında çalışma alanında oluşacak, X ve Y eksen kutup çiftleri tarafından düzlemde oluşturulan homojen ve düzgün değişken özelliğe sahip toplam manyetik alan haritasını göstermektedir.



Şekil 2.25 Mikrorobotu X eksenine paralel yönlendirecek manyetik alan haritası



Şekil 2.26 X eksenine paralel yönlendirilmiş mikrorobota, aynı eksen üzerinde doğrusal hareket yaptıracak manyetik alan haritası



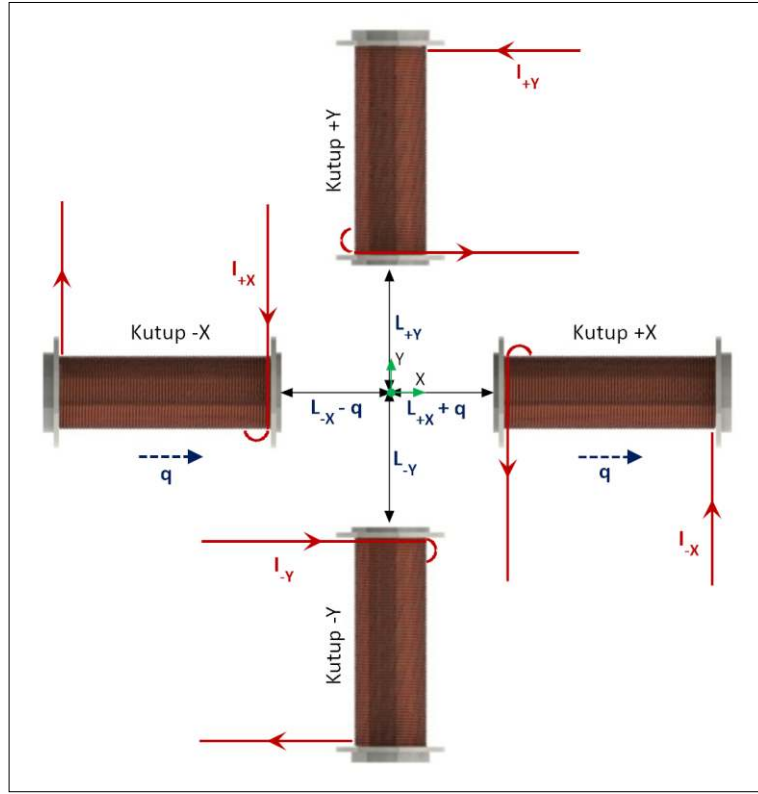
Şekil 2.27 X eksenini kutup çiftleri tarafından üretilen homojen manyetik alan ile Y eksenini kutup çiftleri tarafından üretilen düzgün değışken manyetik alanın toplamı

2.5 Kutup Çiftlerinin Konum Kontrolü ile Çalışma Alanının Genişletilmesi

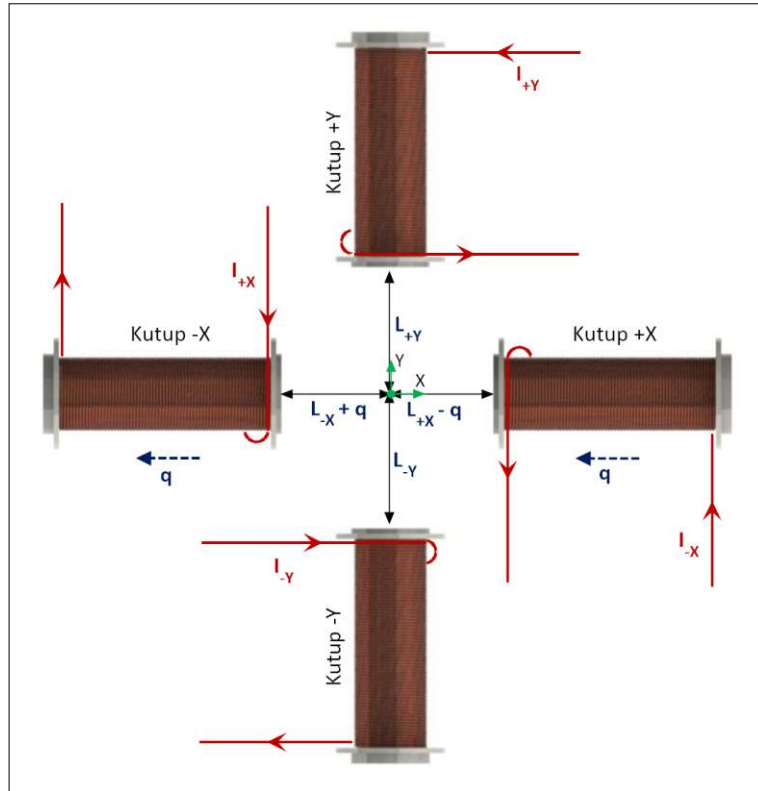
Elektromanyetik aktüatör sistemini oluşturan kutupların konum (Şekil 2.23 ve Şekil 2.24' te gösterilen hareket konfigürasyonları kullanılarak) ve akım kontrolü ile belirli bir çalışma alanında mikrorobota hareket kabiliyeti kazandırılacağı bir önceki bölümde açıklanmıştır. Bu bölümde ise, kutupların farklı hareket konfigürasyonları ile konum kontrolü gerçekleştirilerek, çalışma alanının genişletilmesi amaçlanmaktadır.

Genişletme işlemi, mevcut homojen manyetik alan bölgesinin düzlem üzerinde yer değiştirmesiyle gerçekleştirilecektir. Kutup çiftlerinin tek eksenli hareket kabiliyetine sahip olmasından kaynaklı olarak, homojen manyetik alanın üretildiği bölge (doğrultma çalışma alanı) ve düzgün değişen manyetik alanın üretildiği bölge (doğrusal hareket çalışma alanı) aynı eksen üzerinde birlikte yer değiştirememektedir. Bu nedenle, genişletilmiş çalışma alanının sınırlarının belirlenmesinde, daha geniş bir alana sahip olan düzgün değişen manyetik alanın üretildiği bölgenin sınırları belirleyici olmaktadır. Belirlenen amaç doğrultusunda, tek eksenli hareket kabiliyetine sahip kutup çiftleri kullanılarak, mevcut doğrultma çalışma alanının düzlem üzerinde belirli bölgelere taşınmasını gerçekleştirecek hareket biçimleri tasarlanmıştır.

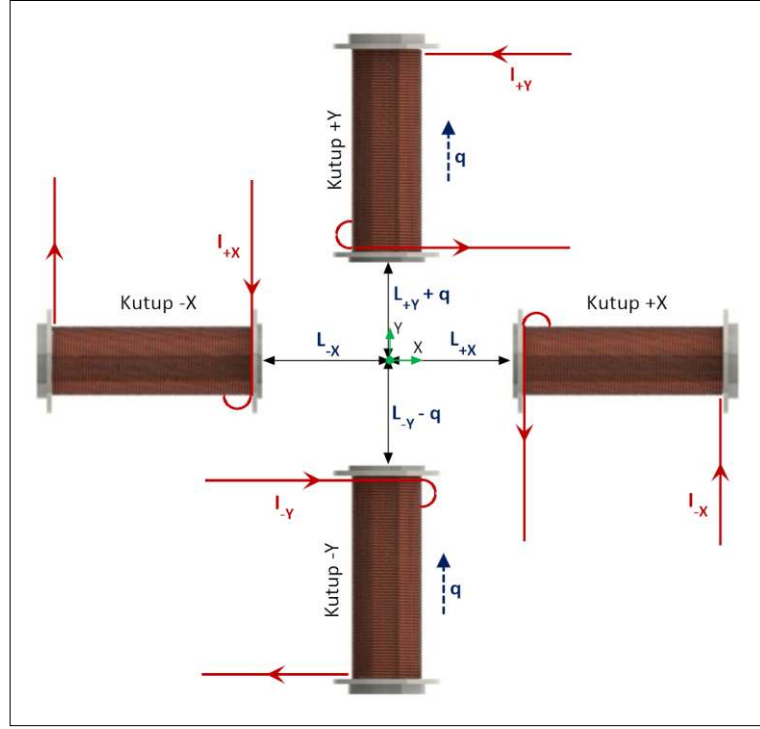
Şekil 2.28, X eksenli kutup çiftlerinin +X yönünde ($q = 10$ mm) hareketi ile çalışma alanının +X yönünde genişletilmesini gerçekleştirecek hareket konfigürasyonunu göstermektedir. Diğer tüm yapısal ve işlevsel parametreler, genişletme işlemi yapılmadığı durumda belirlenen parametrelerdir. Şekil 2.29, Şekil 2.30 ve Şekil 2.31 ise, belirtilen hareket yönlerinde çalışma alanını gerçekleştirmeye yönelik hareket konfigürasyonlarıdır. Belirlenen dört farklı hareket konfigürasyonu ile mikrorobota belirli bölgelerde doğrusal hareket yapabilme kabiliyeti kazandırılmıştır.



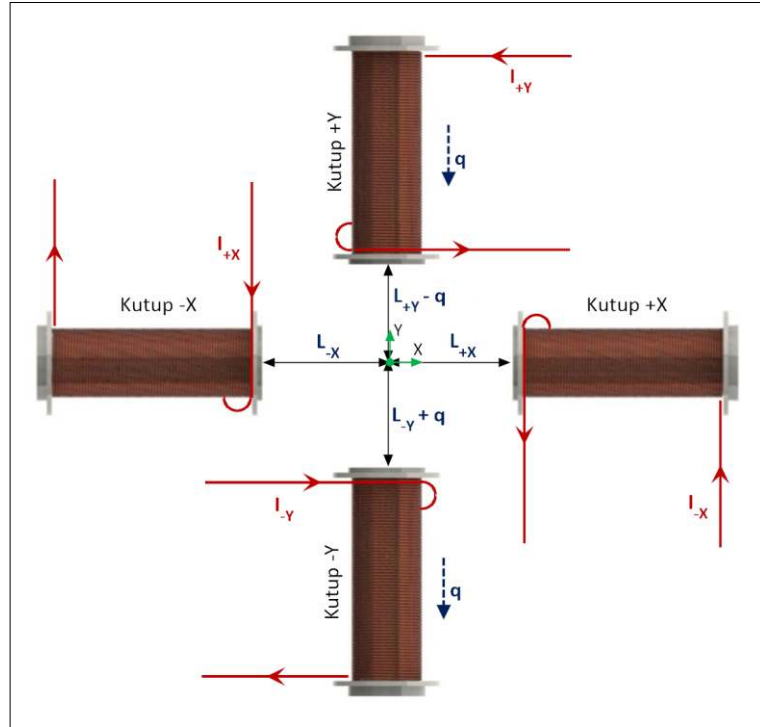
Şekil 2.28 Çalışma alanının +X yönünde genişletilmesini gerçekleyecek hareket konfigürasyonu



Şekil 2.29 Çalışma alanının -X yönünde genişletilmesini gerçekleyecek hareket konfigürasyonu



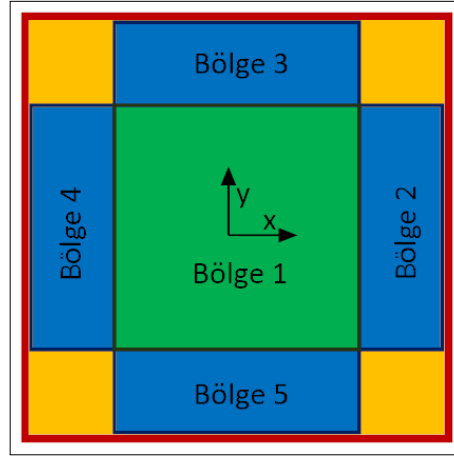
Şekil 2.30 Çalışma alanının +Y yönünde genişletilmesini gerçekleyecek hareket konfigürasyonu



Şekil 2.31 Çalışma alanının -Y yönünde genişletilmesini gerçekleyecek hareket konfigürasyonu

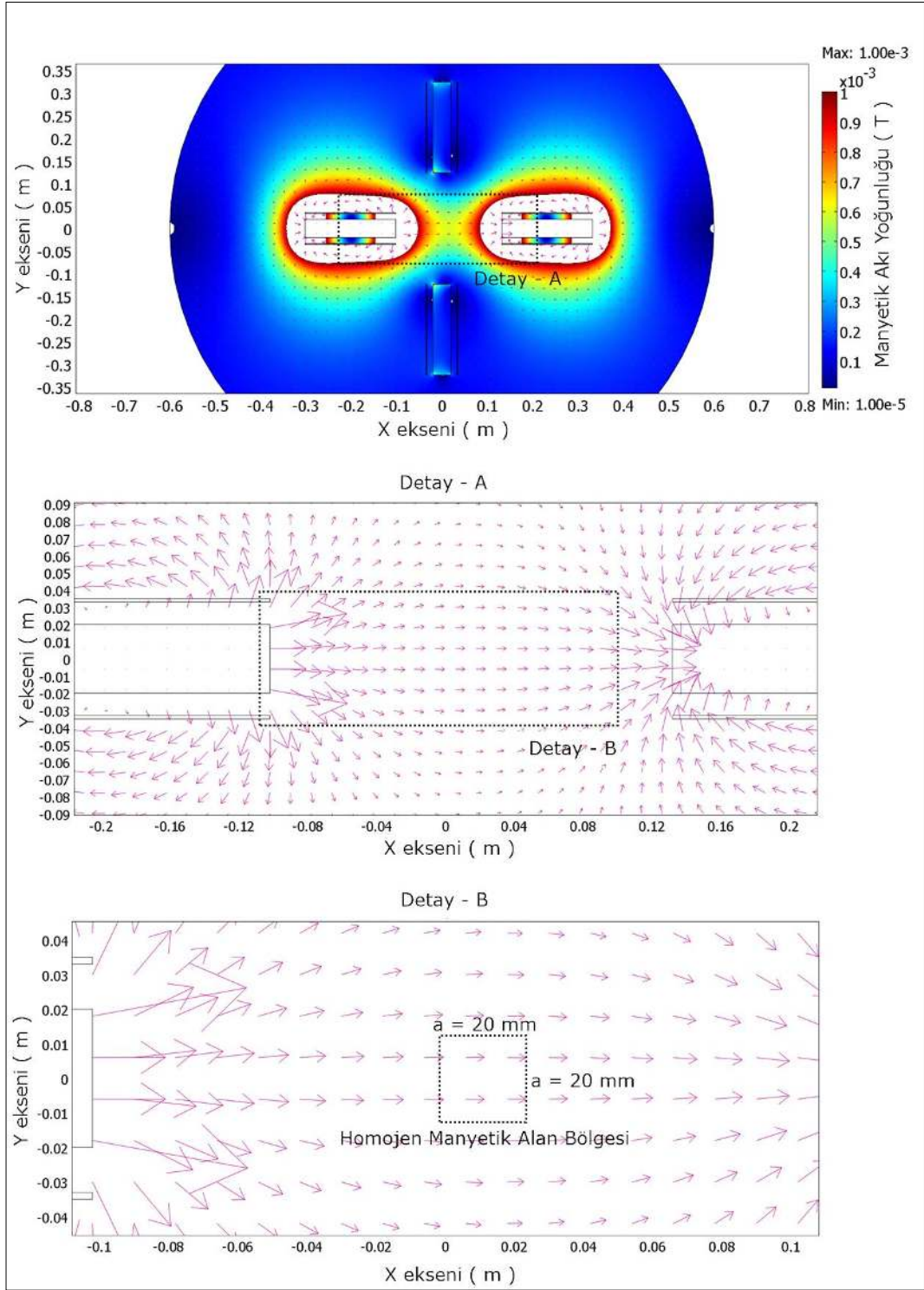
Kutup hareketleri ile gerçekleştirilen çalışma alanı genişletme işlemi sonucu elde edilen yeni çalışma alanları, kutup çiftlerinin tek eksenli hareket kabiliyetine sahip

olmaları sebebiyle, sadece tek eksenli mikrorobot hareketine olanak sağlamaktadır. Genişletme işlemi sonucu elde edilen çalışma alanlarında, genişletme eksenine dik ekseninde bulunan kutup çifti tarafından homojen manyetik alan üretilememektedir.

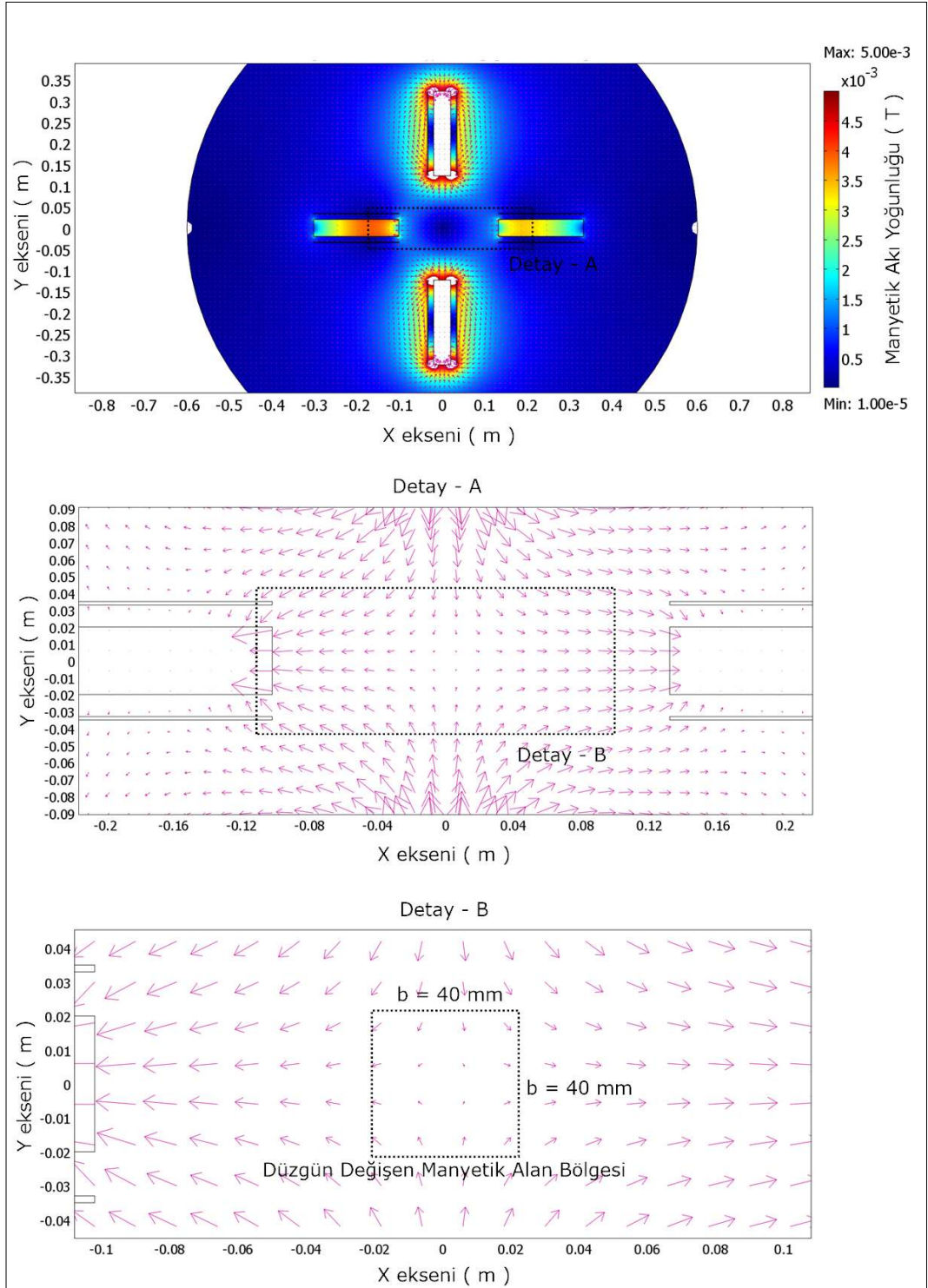


Şekil 2.32 Mikrorobotun hareket kabiliyetine sahip olduğu bölgeler

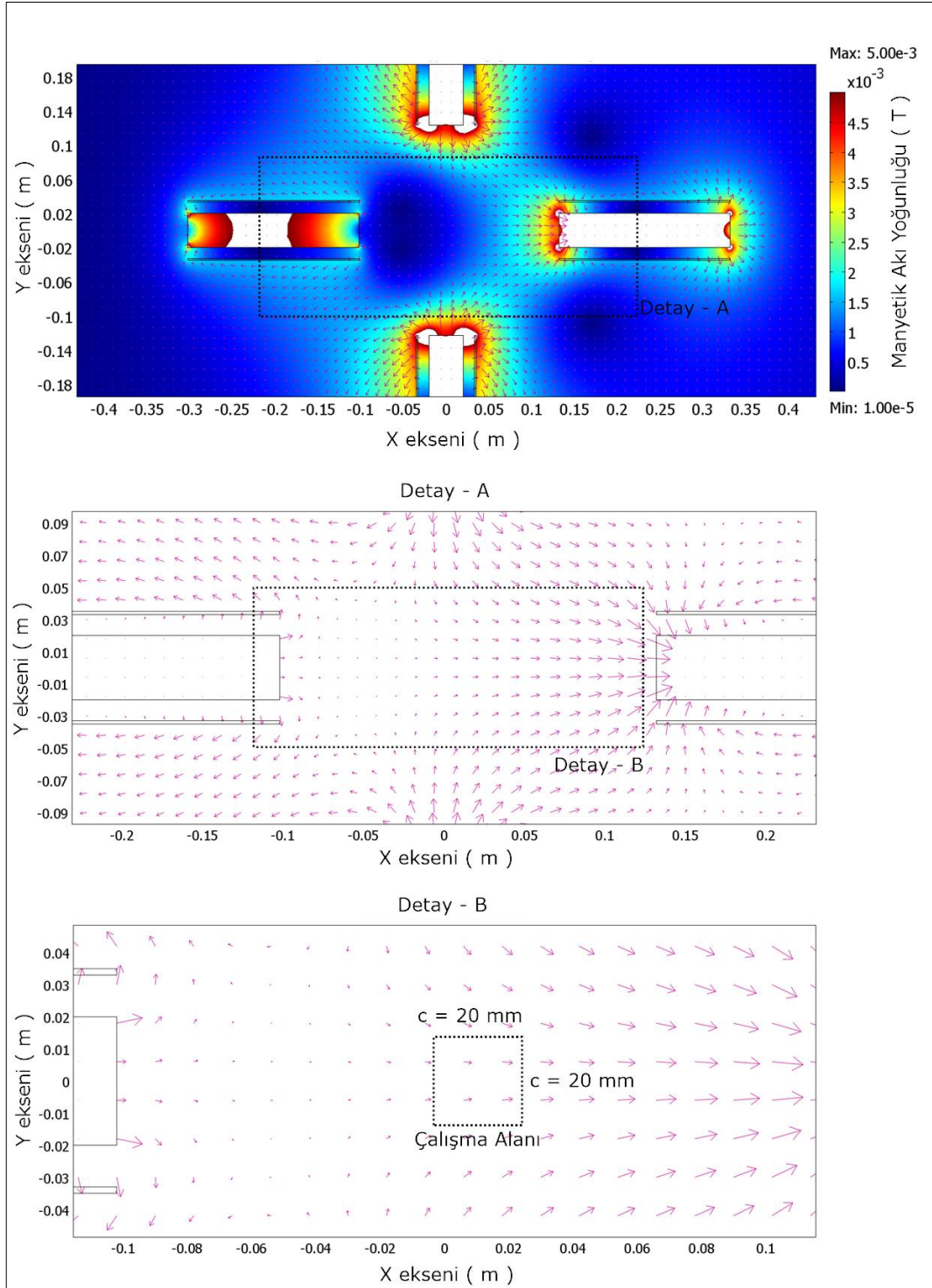
Şekil 2.32, mikrorobotun hareket kabiliyetine sahip olacağı bölgeleri gstermektedir. 1. bölgede, iki eksen üzerinde de homojen ve düzgün değişen manyetik alan meydana getirilebilmektedir. Bu işlemlerin sonucu olarak, mikrorobot belirtilen bölgede iki eksenli hareket gerçekleştirebilmektedir. Mikrorobot, Şekil 2.28' de gsterilen hareket konfigürasyonu ile 2. Bölgede, Şekil 2.30' da gsterilen hareket konfigürasyonu ile 3. Bölgede, Şekil 2.29' da gsterilen hareket konfigürasyonu ile 4. Bölgede ve Şekil 2.31' de gsterilen hareket konfigürasyonu ile 5. Bölgede hareket kabiliyeti kazanmaktadır. 2., 3., 4. ve 5. bölgelerde, iki eksen üzerinde de düzgün değişen manyetik alan üretilebilmesine rağmen, sadece bir eksen üzerinde homojen manyetik alan üretilmesinden dolayı, mikrorobot sadece tek eksen üzerinde hareket gerçekleştirebilmektedir. 2. ve 4. bölgelerde, mikrorobotu sadece X eksenine paralel doğrultacak homojen manyetik alan üretilebilmektedir. Robot, bu bölgelerde sadece X eksenine paralel doğrultularda hareket kabiliyetine sahip olmaktadır. 3. ve 5. bölgelerde ise, mikrorobotu sadece Y eksenine paralel doğrultacak homojen manyetik alan üretilebilmektedir. Robot, bu bölgelerde sadece Y eksenine paralel doğrultularda hareket kabiliyetine sahip olmaktadır. Şekil 2.28' de gsterilen hareket konfigürasyonu ve mikrorobotun +X yönünde hareketini gerçekleyecek işlevsel parametre değerleri kullanılarak yapılan analiz çalışmalarının sonuçları Şekil 2.33, Şekil 2.34 ve Şekil 2.35' de gsterilmiştir.



Şekil 2.33 X eksen kutup çiftleri tarafından üretilen homojen manyetik alan bölgesinin +X yönünde $q = 10$ mm yer değiştirmesi



Şekil 2.34 Y ekseni kutup çiftleri tarafından oluşturulan düzgün değişen manyetik alan bölgesi



Şekil 2.35 Yer değiştirmiş X eksenli kutup çiftleri tarafından homojen manyetik alan ile sabit Y eksenli kutup çiftleri tarafından düzgün değişen manyetik alanın birlikte üretilmesi

BÖLÜM ÜÇ

DONANIM TASARIMI VE ÜRETİMİ

Mikrorobotun düzlemde hareketini gerçekleştirecek elektromanyetik aktüatör sistemi temelde iki donanımdan meydana gelmektedir. Bunlar: mekanik donanım ve elektronik donanımdır. Her bir donanım takip eden bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.

3.1 Mekanik Donanım Tasarımı ve Üretimi

Mekanik donanım, belirli bir çalışma alanında gerekli özelliklere sahip manyetik alan meydana getirecek elektromanyetik kutuplardan, mikrorobota daha geniş bir çalışma alanında hareket kabiliyeti kazandıracak doğrusal hareket sistemlerinden, mikrorobotun konumunun ve hareketinin izlenebilmesini sağlayacak görüntüleme sisteminden ve hareketin gerçekleşeceği bölgeyi sınırlayan çalışma alanından meydana gelir.

3.1.1 Elektromanyetik Kutuplar

Mikrorobotun hareketi için gerekli manyetik enerjiyi sağlayacak elektromanyetik kutupların tasarımı Bölüm 2' de detaylı olarak açıklanmıştır. Bu bölümde tasarımı gerçekleştirilen elektromanyetik kutupların uygun mekanik parçalar kullanılarak üretimi anlatılmıştır. Elektromanyetik kutupların tasarım resmi Şekil 3.1' de gösterilmiştir.

İlk olarak, bakır elektrik tellerinin solenoid biçiminde üzerine sarılacağı, polietilen malzemeden (manyetik olmayan malzeme), talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak, uygun geometrik yapıya sahip karkaslar üretilmiştir.

Üretilen karkaslar üzerine, bakır elektrik tellerinin uygun biçimde sarılması amacı ile tel sarma mekanizması üretilmiştir. Tel sarma mekanizmasıyla her bir karkas üzerine, tasarımı yapılan sisteme uygun olarak, bakır elektrik teli sarımı yapılmıştır.



Şekil 3.1 Elektromanyetik kutup

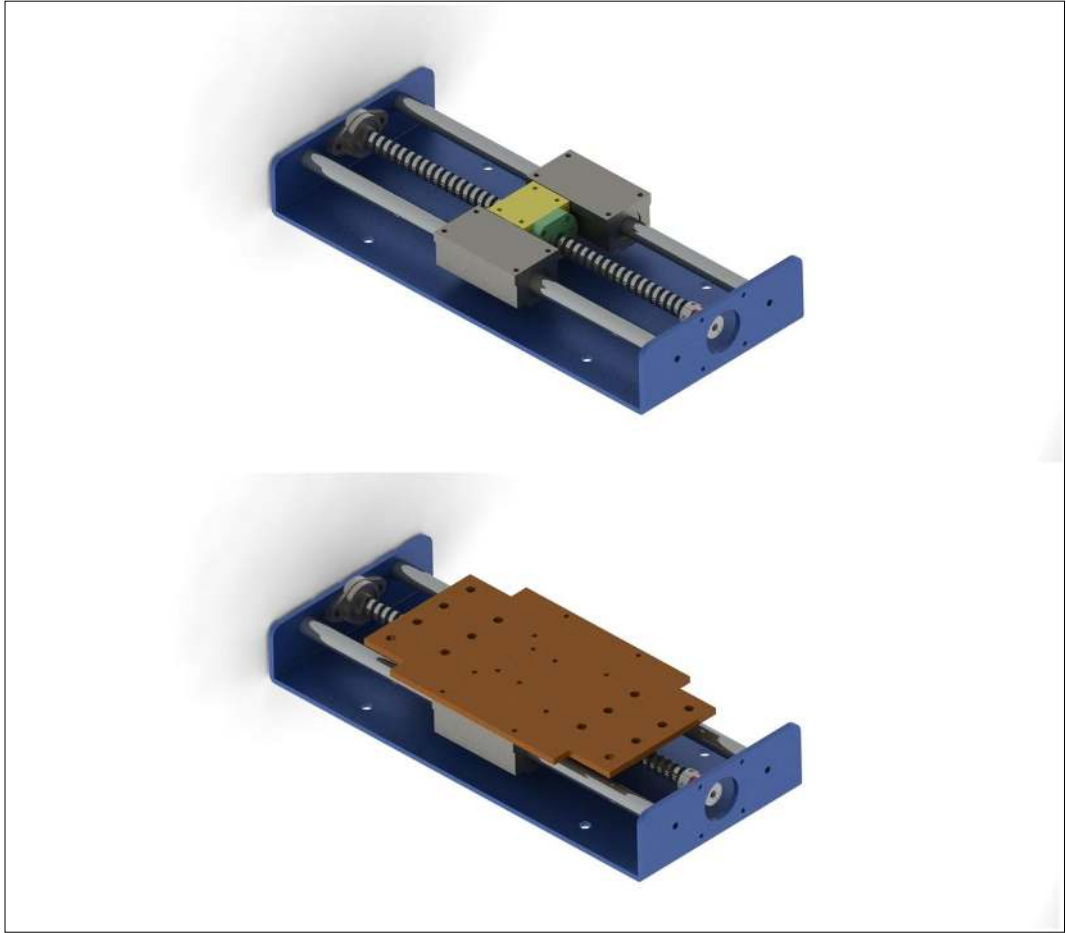
Son olarak ise, kutuplar tarafından üretilen manyetik alanın şiddetini arttırmak amacıyla, silisyumda sacların kesilip perçinli bağlantı kullanılarak montajı ile nüveler üretilmiştir.

3.1.2 Doğrusal Hareket Sistemleri

Eş yapısal parametrelere sahip elektromanyetik kutup çiftleri için, bobinler üzerinden akacak elektrik akımının karakteri ve kutupların çalışma alanının merkezine olan mesafeleri birer işlevsel parametredir. Bu çalışma kapsamında, belirtilen işlevsel parametrelerin kontrolü ile çalışma alanında oluşan manyetik alanın karakteri kontrol edilecektir. Kutupların konumları, çalışma alanında homojen veya düzgün değişen manyetik alan oluşturulmasının en önemli belirleyicisidir. Bununla birlikte, mikrorobota daha geniş bir alanda hareket kabiliyeti de kazandırmaktadır.

Belirtilen amaçlar doğrultusunda, elektromanyetik kutupların bulundukları ekseninde doğrusal hareketlerine olanak sağlayacak vidalı mil tahrikli doğrusal hareket sistemleri kullanılmıştır. Vidalı mil tahrikli doğrusal hareket sistemleri, elektrik motoru tarafından vidalı mile iletilen dönme hareketini somun aracılığıyla doğrusal

harekete çeviren sistemlerdir. Doğrusal hareket gerçekleştiren somun üzerine entegre edilen araba ile hareket istenilen sisteme iletilmektedir. Sistemin hareketinin sağlıklı bir biçimde gerçekleşmesi amacıyla, arabaya destek sağlayacak indüksiyonlu mil - lineer rulman mekanizması kullanılmıştır. Bunların yanı sıra, elektrik motorunun vidalı mile bağlantısını sağlayan kaplin ve vidalı milin rotasyonel hareketini destekleyen radyal rulman doğrusal hareket sistemlerinin diğer parçalarıdır. Doğrusal hareket sisteminin tasarım resmi Şekil 3.2' de görülmektedir.



Şekil 3.2 Vidalı mil tahrikli doğrusal hareket sistemi

3.1.3 Elektromanyetik Kutupların Doğrusal Hareket Sistemlerine Entegre Edilmesi

Doğrusal hareket sistemleri tarafından kutuplarının istenilen konumlara taşınması sağlanırken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, kutuplar tarafından meydana getirilen manyetik alan karakterinin bozulmamasıdır. Doğrusal hareket sistemlerinin

ihativa ettikleri metal parçaların yaratılan manyetik alanı minimum düzeyde etkilemesi, kutupların bahsi geçen sistemlere mümkün olduğunca uzak olmasıyla sağlanabilir. Bu amaç doğrultusunda, uygun ölçülerde alüminyum sigma profiller, pleksiglas parçalar, plastik civatalar ve somunlar kullanılarak elektromanyetik kutuplar ile doğrusal hareket sistemleri arasındaki bağlantı işlemi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan hareketli kutup sistemi Şekil 3.3' te görülmektedir.



Şekil 3.3 Elektromanyetik kutupların doğrusal hareket sistemlerine entegre edilmesi

3.1.4 Hareketli Elektromanyetik Kutupların Ana Şasiye Montajı

Çalışma kapsamında yapılan çalışmalar mikrorobotun düzlemde hareket ettirilmesini amaçlamaktadır. Bu bağlamda Bölüm 2' de detaylı bir biçimde açıklanan elektromanyetik tasarım sonucunda karar verildiği gibi aktüatör sistemimiz

birbirine dik eksenlerde birer adet elektromanyetik kutup çiftinden meydana gelmektedir. Her bir kutup çifti diğer kutup çiftinin merkez eksenine göre simetrik konumdadır. Tüm kutuplar tasarım sonucu karar verilen minimum ve maksimum yaklaşım mesafelerine sahip olacak şekilde bir ana şasi üzerine monte edilmiştir. Ana şasi kutupların yükünü taşıyacak kabiliyette, alüminyum sigma profillerin bağlantı parçalarıyla montajıyla üretilmiştir. Kutupların, belirlenen mesafelerde, ana şasiye Şekil 3.4' te görüldüğü gibi montajı yapılmıştır.

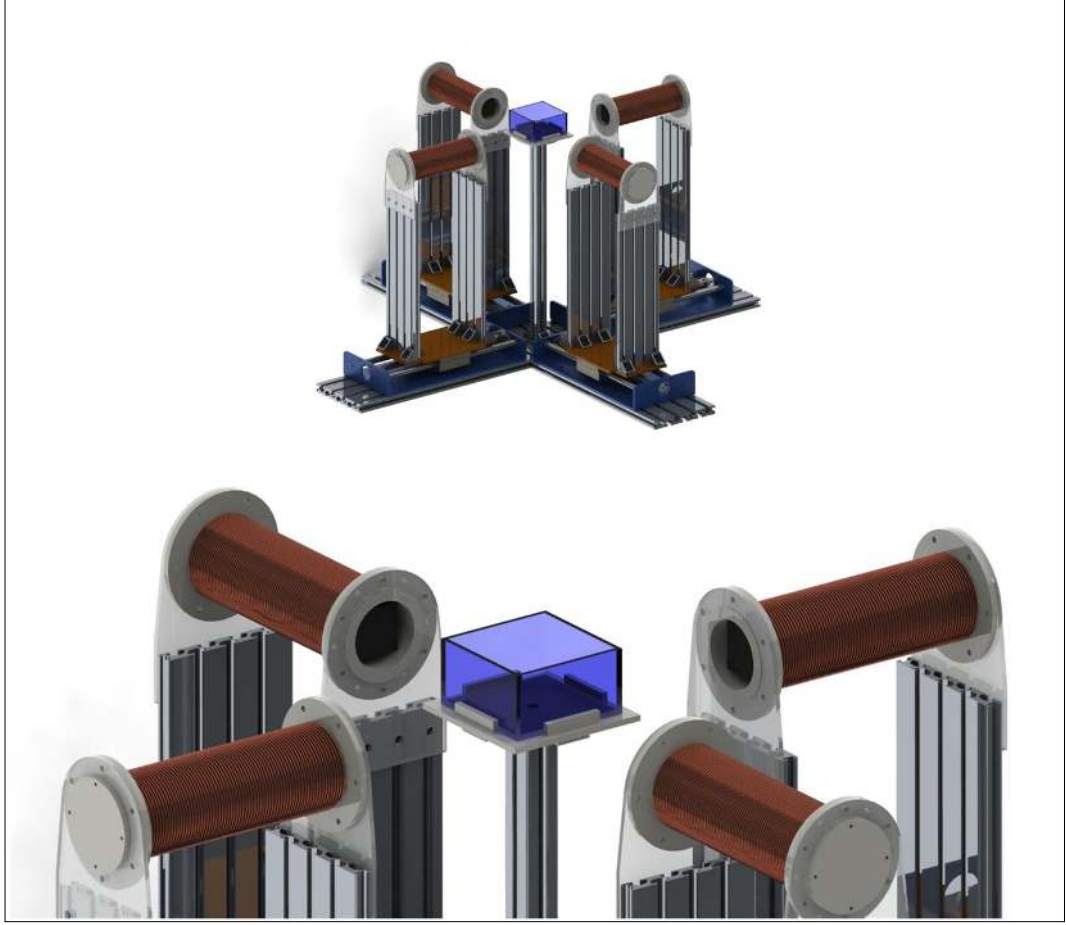


Şekil 3.4 Hareketli elektromanyetik kutupların ana şasiye montajı

3.1.5 Çalışma Alanının Ana Sisteme Entegre Edilmesi

Mikrorobotun yatay düzlemde hareketini gerçekleştirebileceği çalışma alanı cam malzemeden ve gerektiğinde mikrorobotun çeşitli sıvılar içerisinde de hareketine olanak sağlayacak şekilde üretilmiştir. Kutup çiftlerinin merkez eksenlerinin kesişim noktası, çalışma alanının da merkez noktasıdır. Çalışma alanının belirtilen merkez noktasında konumlandırılması amacıyla, oluşturulan manyetik alanı minimum düzeyde etkileyecek biçimde, alüminyum sigma profil ve pleksiglas malzemeler

kullanılarak ana şasiye montajı yapılmıştır. Çalışma alanının ana sisteme entegre edilmiş hali Şekil 3.5' te görülmektedir.



Şekil 3.5 Çalışma alanının ana sisteme entegre edilmesi

3.1.6 Görüntüleme Sisteminin Ana Sisteme Entegre Edilmesi

Bu çalışma kapsamında, kumanda sinyalleri ile hareketi gerçekleştirilen mikrorobotun konum ve hareketinin incelenmesine yönelik görüntüleme sistemi, ana sisteme entegre edilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda mikrorobotun hareketinin otonom olması, görüntüleme sisteminden alınan verilerin işlenmesi ile gerçekleştirilecektir. Diğer tüm sistem parçalarında olduğu gibi, görüntüleme sistemi de oluşturulan manyetik alanı minimum şekilde etkileyecek biçimde konumlandırılmıştır. Görüntüleme sisteminin ana sisteme entegre edilmiş hali Şekil 3.6' da görülmektedir.



Şekil 3.6 Görüntüleme sisteminin ana sisteme entegre edilmesi

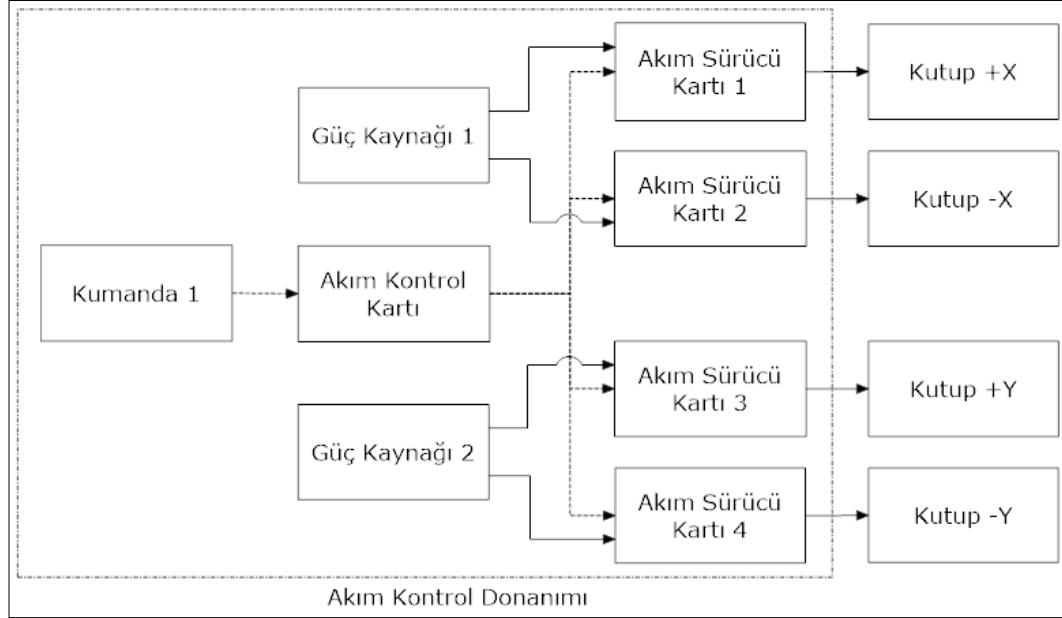
3.2 Elektronik Donanım Tasarımı ve Üretimi

Elektronik donanım içeriğinde, mikrorobotun düzlemde hareketini gerçekleyecek işlevsel parametrelerinin kontrol edilebilmesi amacı ile tasarlanmış sistemler bulunmaktadır. Bu sistemler; akım kontrol donanımı ve konum kontrol donanımı olmak üzere iki alt sistem başlığı altında tasarlanmış ve devam eden bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.

3.2.1 Akım Kontrol Donanımı

Akım kontrol donanımı, kutuplar üzerinden akacak elektrik akımının yönünün ve şiddetinin kontrol edilebilmesi amacı ile tasarlanmıştır. Akım kontrol donanımı

dahilinde; bobin sürücü kartları, akım kontrolcüsü, güç kaynakları ve kumanda bulunmaktadır. Donanımı oluşturan parçaların birbirleri ile bağlantısı, şematik olarak Şekil 3.7’ de gösterilmiştir. Şekil 3.7’ de kesik çizgiler sinyalleri; düz çizgiler elektrik akımını ifade etmektedir.



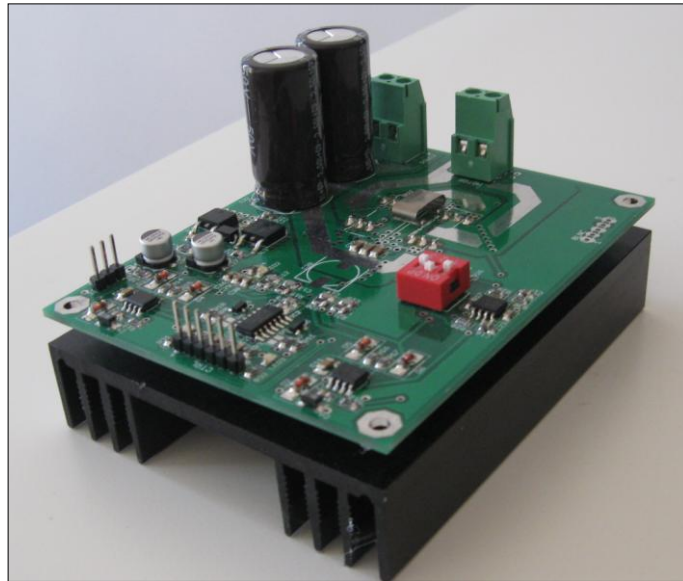
Şekil 3.7 Akım kontrol donanımının şematik olarak gösterimi

3.2.1.1 Elektromanyetik Kutup Sürücü Kartları

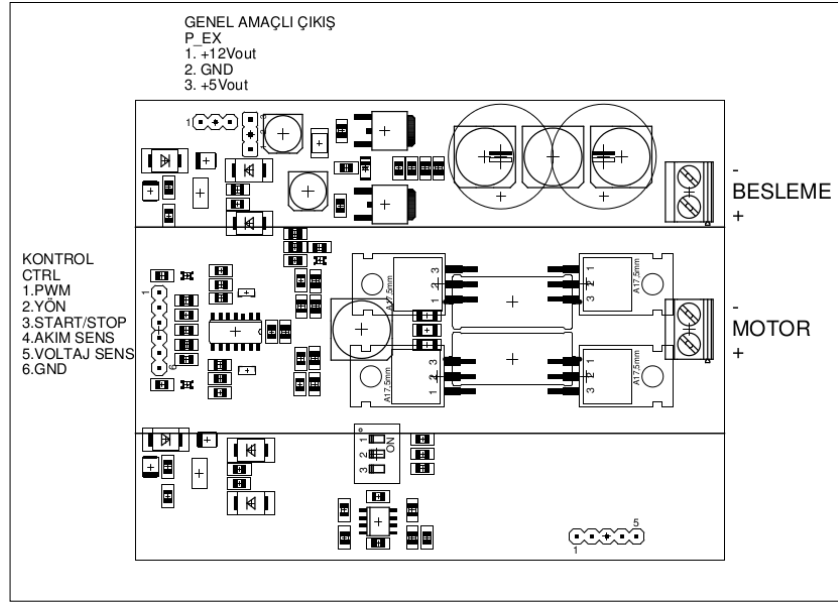
Elektromanyetik kutup sürücü kartları; güç kaynakları tarafından beslemesi yapılan elektrik enerjisinin, mikrorobota hareket kabiliyeti kazandıracak manyetik enerjiye dönüştürülmesi amacıyla, biçimlendirilmesine olanak sağlayacak elektronik devreyi içermektedir. Şekil 3.8' de üretilen sürücü kartı gösterilmektedir. Şekil 3.9' da ise, üretilen kart üzerindeki giriş/çıkış pinleri gösterilmiştir. Giriş/çıkış pinleri ve özellikleri şunlardır:

- Besleme girişi: Sürücü kartın beslemesini sağlamak amacıyla, güç kaynaklarının bağlantı pinlerini ifade etmektedir.
- Bobin çıkışı: Sürücü kart tarafından biçimlendirilen elektrik akımının bobinlere gidiş ve dönüş hattını ifade etmektedir.

- PWM girişi: Elektrik akımının şiddetinin kontrolü amacı ile PWM sinyalinin giriş hattını ifade etmektedir.
- Yön girişi: Elektrik akımının yönünü kontrol edecek dijital sinyalin giriş hattını ifade etmektedir.
- Start/Stop girişi: Bobin çıkışının açılıp kapanmasını sağlayacak dijital sinyalin giriş hattını ifade etmektedir.
- Akım sensörü çıkışı: Sürücü kart tarafından biçimlendirilen elektrik enerjisinin akım değeri bilgisinin alındığı hattı ifade etmektedir.
- Gerilim sensörü çıkışı: Sürücü kart tarafından biçimlendirilen elektrik enerjisinin gerilim değeri bilgisinin alındığı hattı ifade etmektedir.
- GND: Ortak topraklamaları ifade etmektedir.
- Genel amaçlı çıkışlar: Elektronik donanımı oluşturan diğeri donanımların (kontrol kartı, kumanda, limit anahtarları, soğutucu fan) beslemesini sağlamak amacıyla eklenmiştir.



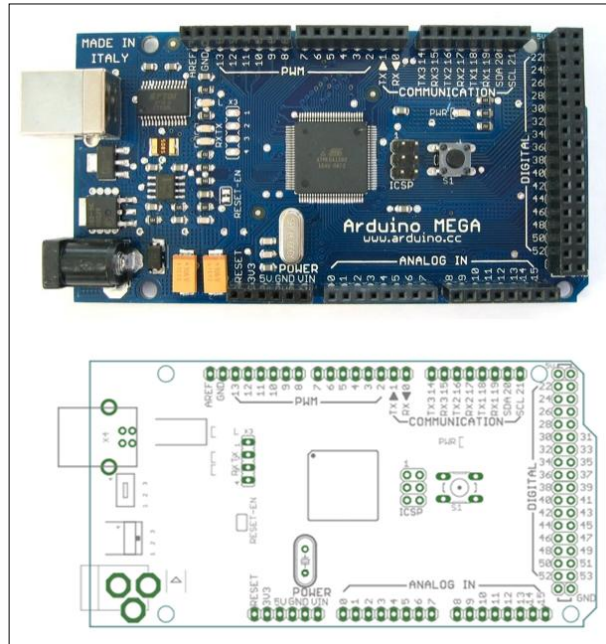
şekil 3.8 Elektromanyetik kutup sürücü kartı



Şekil 3.9 Elektromanyetik kutup sürücü kartı giriş/çıkış pinleri

3.2.1.2 Akım Kontrol Kartı

Kumanda sinyallerinin alınıp, kontrolcü içeriğindeki yazılıma uygun olarak biçimlendirilip, akım sürücü kartlarına sinyallerin gönderilmesi amacı ile kullanılmıştır. Akım kontrol kartı “Atmega 2560” entegresini ihtiva eden “ Arduino Mega” dır.



Şekil 3.10 Arduino Mega

3.2.1.3 Güç Kaynakları

Akım sürücü kartlarının elektrik beslemesi amacı ile “Meanwell S-350-24” güç kaynakları kullanılmıştır (Şekil 3.11). Şekil 3.7’ de görüleceği üzere akım sürücü kartı 1 ve 2, güç kaynağı 1; akım sürücü kartı 3 ve 4, güç kaynağı 2 tarafından beslenmektedir.

Güç kaynaklarının her biri 350 W elektriksel güç sağlayabilmektedir. Giriş gerilimi 220 V AC’ dir. Çıkış gerilimi 24 V DC sabit, çıkış akımı maksimum 14,6 A’ dir.



Şekil 3.11 Güç kaynağı

3.2.1.4 Kumanda

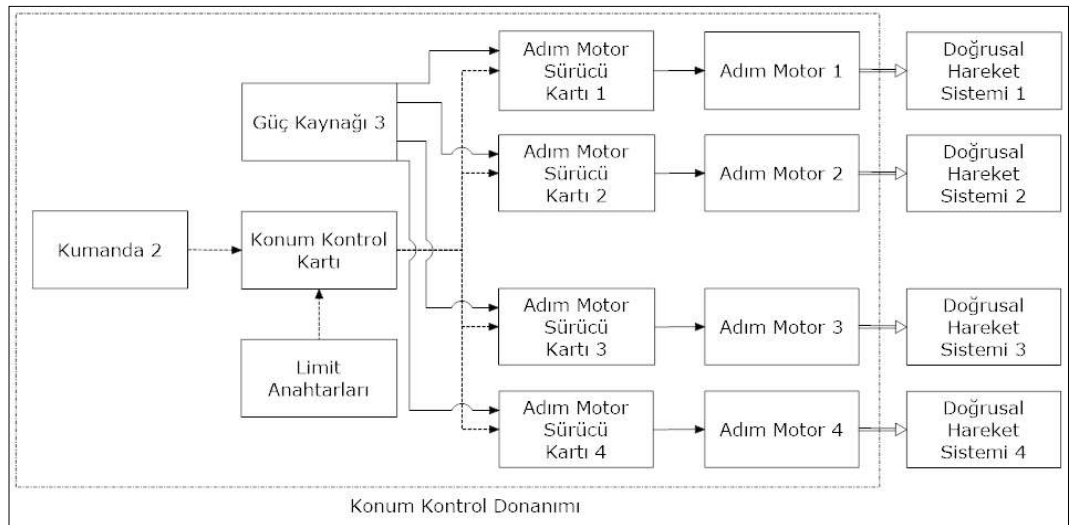
Tez çalışması sürecinde, açık devre kontrol uygulamaları yapılmıştır. Akım kontrol kartına sinyaller, bir adet iki yönlü joystick ve altı adet buton içeren kumanda tarafından gönderilmiştir.



Şekil 3.12 Kumanda

3.2.2 Konum Kontrol Donanımı

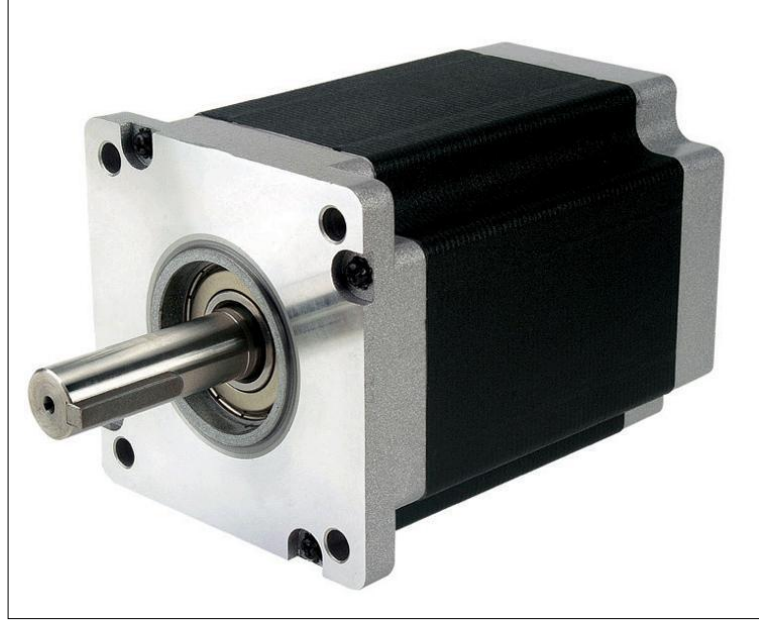
Konum kontrol donanımı, vidalı milli doğrusal hareket sistemlerinin sürümünü gerçekleyerek kutupların konum kontrolünün sağlanabilmesi amacı ile tasarlanmıştır. Konum kontrol donanımı dahilinde; adım motorlar, adım motor sürücü kartları, konum kontrolcüsü, güç kaynağı ve kumanda bulunmaktadır. Donanımı oluşturan parçaların birbirleri ile bağlantısı, şematik olarak Şekil 3.13’ te gösterilmiştir. Şekil 3.13’ te kesik çizgiler sinyalleri; düz çizgiler elektrik akımını ifade etmektedir.



Şekil 3.13 Konum kontrol donanımının şematik olarak gösterimi

3.2.2.1 Adım Motorlar

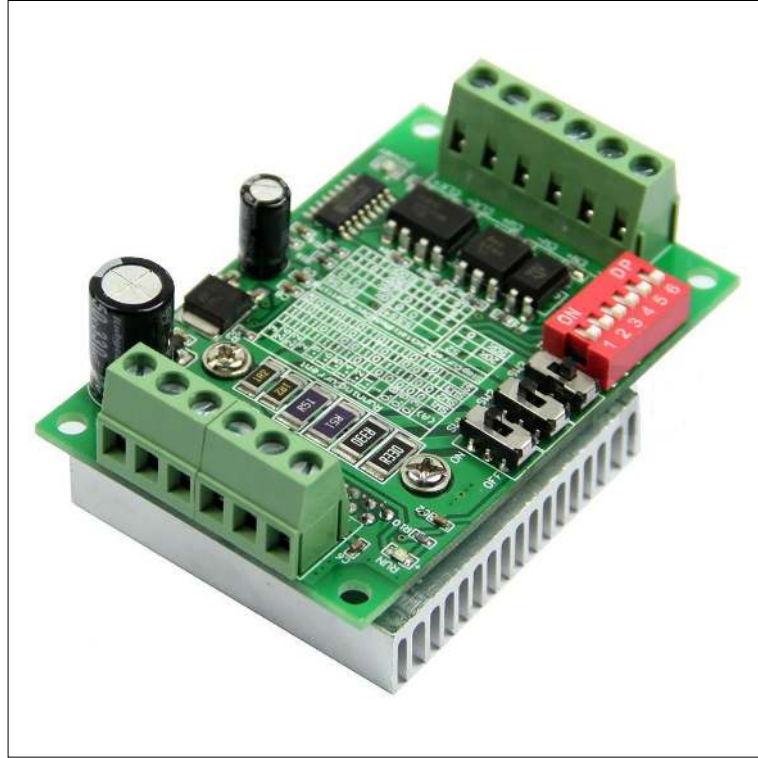
Elektromanyetik kutupların konum kontrolü amacıyla, vidalı milli doğrusal hareket sistemlerinin ihtiyaç duyduğu mekanik enerjinin sağlanmasına yönelik olarak adım motorlar kullanılmıştır. Her bir adım motor her bir doğrusal hareket sistemini sürmektedir. Kullanılan adım motorlar “Leadshine 57HS22-T” kodlu üründür (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Adım motor

3.2.2.2 Adım Motor Sürücü Kartları

Adım motorların sürülmesi amacı ile “TB6560” sürücü entegresini ihtiva eden adım motor sürücü kartları kullanılmıştır. Bahsedilen sürücü kartları ile motorlara verilecek elektrik akımının şiddeti ve adım ayarı (1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16) ayarı yapılabilmektedir.



Şekil 3.15 Adım motor sürücü kartı

3.2.2.3 Konum Kontrol Kartı

Kumanda sinyallerinin alınıp, kontrolcü içeriğindeki yazılıma uygun olarak biçimlendirilip, adım motor sürücü kartlarına sinyallerin gönderilmesi amacı ile kullanılmıştır. Konum kontrol kartı da “Atmega 2560” mikrodenetleyicisi ihtiva eden “ Arduino Mega” dır.

3.2.2.4 Limit Anahtarları

Doğrusal hareket sistemlerinin referans konuma getirilmesi amacı ile kullanılmıştır.

3.2.2.5 Güç Kaynağı

Akım sürücü kartlarının elektrik beslemesi amacı ile “Meanwell S-350-24” güç kaynakları kullanılmıştır (Şekil 3.11). Şekil 3.13’ de görüleceği üzere adım motor sürücü kartlarının tümü aynı güç kaynağı tarafından beslenmektedir.

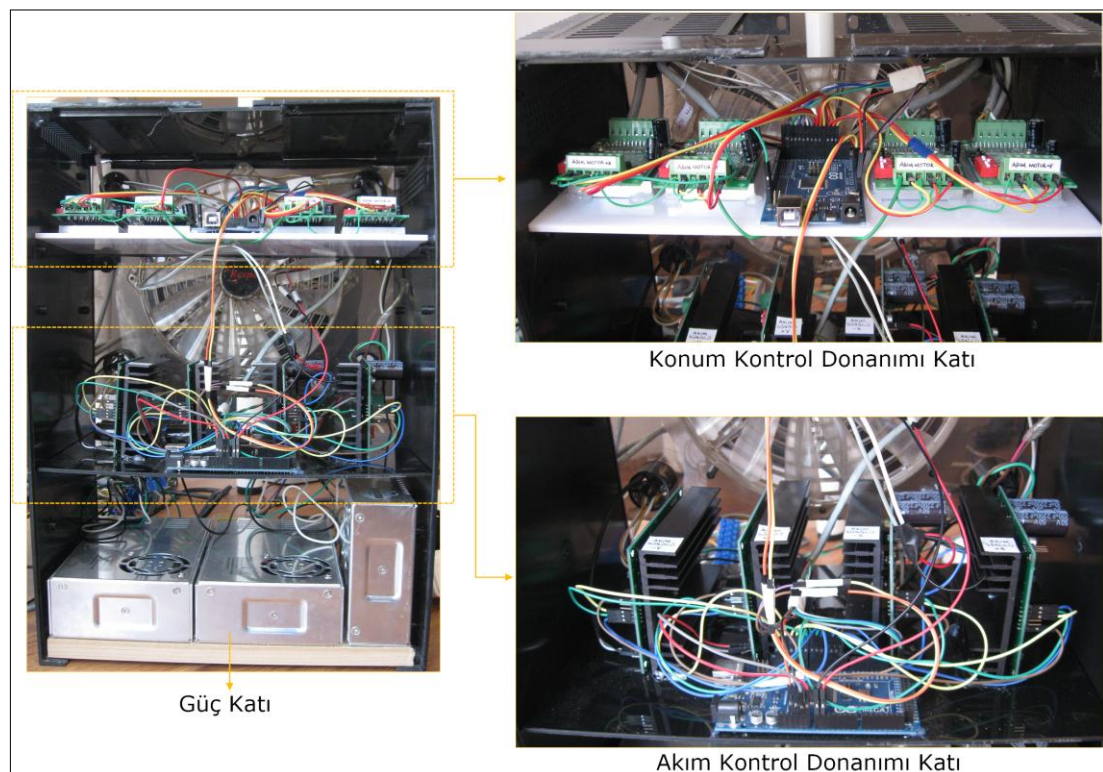
Güç kaynağı 350 W elektriksel güç sağlayabilmektedir. Giriş gerilimi 220 V AC' dir. Çıkış gerilimi 24 V DC sabit, çıkış akımı maksimum 14,6 A' dir.

3.2.2.6 Kumanda

Konum kontrol kumandası da akım kontrol kumandası ile aynı özelliklere sahiptir.

3.2.3 Eksenel Fan Tarafından Soğutmalı Elektronik Donanım Paneli

Akım ve konum kontrol donanımlarının tümünü içeriğinde barındıran, eksenel fan desteğiyle soğutmalı, kolaylıkla kartlara ulaşımına ve tamirata olanak sağlayan panel tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Elektronik donanım paneli Şekil 3.16’ da gösterilmiştir.



Şekil 3.16 Elektronik Donanım Paneli

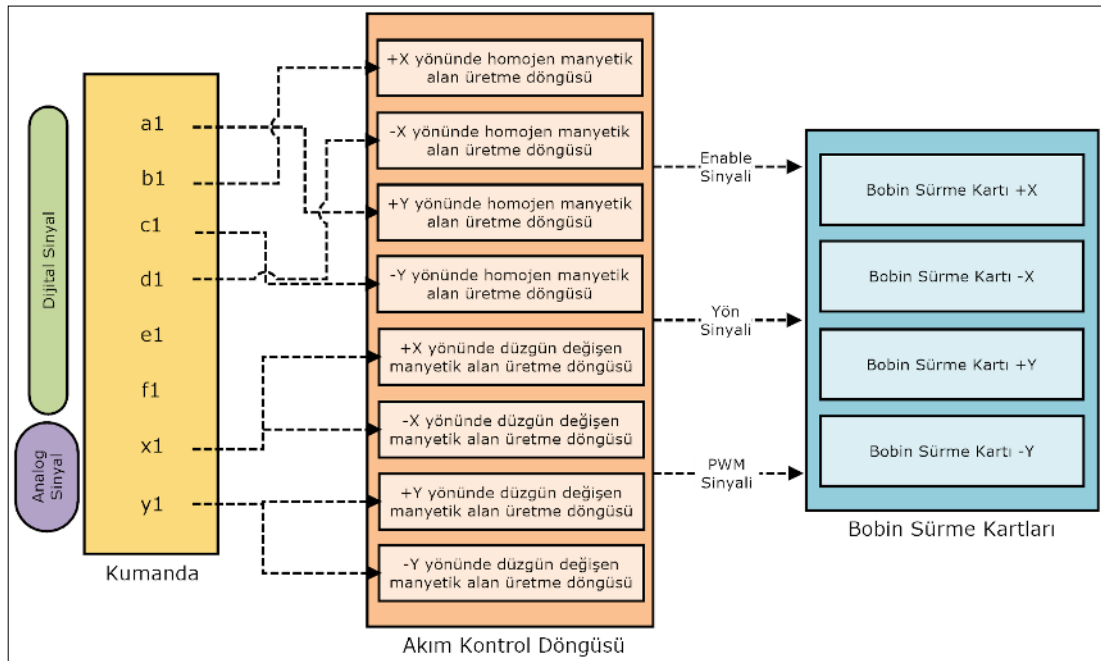
BÖLÜM DÖRT

YAZILIM

Elektromanyetik tasarım sırasında oluşturulan senaryoların yerine getirilebilmesi amacı ile “Atmega 2560” mikrodenetleyicileri üzerine, “Arduino 1.5.2” programı kullanılarak, C++ dilinde yazılımlar yapılmıştır. Yazılımlar temel olarak, iki mikrodenetleyici içeriğinde, birbirine paralel olarak çalışan döngülerden oluşmaktadır. Mikro denetleyicilerden birinin içeriğinde çalışan döngü akım parametresini; diğeri konum parametresini kontrol etmektedir. Gerçeklenen yazılım çalışmaları alt bölümlerde açıklanmıştır.

4.1 Akım Kontrol Yazılımı

Akım kontrol yazılımı temel anlamda; girdilerin tanımlanması, çıktıların tanımlanması ve kontrol döngüsü olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Girdiler ile çıktıların program üzerinde tanımlanması Şekil 4.2’ de gösterilmiştir. Kontrol döngüsü ise, kumanda sinyalleri tarafından oluşturulan girdilere, senaryoya bağlı olarak cevaplar sunacak alt döngülerden oluşmaktadır. Akım kontrol döngüsü şematik olarak Şekil 4.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Akım kontrol döngüsü

```

int a1 = 22;           // Buton A - Kumanda 1
int b1 = 24;           // Buton B - Kumanda 1
int c1 = 26;           // Buton C - Kumanda 1
int d1 = 28;           // Buton D - Kumanda 1
int x1 = A0;           // Potansiyometre X - Kumanda 1
int y1 = A1;           // Potansiyometre Y - Kumanda 1

int xp_PWM = 2;        // PWM +x
int xn_PWM = 3;        // PWM -x
int yp_PWM = 4;        // PWM +y
int yn_PWM = 5;        // PWM -y

int xp_dir = 6;        // Yön +x
int xn_dir = 7;        // Yön -x
int yp_dir = 8;        // Yön +y
int yn_dir = 9;        // Yön -y

int xp_startstop = 10; // Start/stop +x
int xn_startstop = 11; // Start/stop -x
int yp_startstop = 12; // Start/stop +y
int yn_startstop = 13; // Start/stop -y

int pwma = 90;         // I = 2.2 A
int pwmb = 90;         // I = 2.2 A
int pwmc = 144;        // I = 3.8 A
int pwmd = 144;        // I = 3.8 A
int pwme = 0;          // I = 0 A

void setup(){
    Serial.begin(9600);

    pinMode(a1, INPUT);
    pinMode(b1, INPUT);
    pinMode(c1, INPUT);
    pinMode(d1, INPUT);
    pinMode(x1, INPUT);
    pinMode(y1, INPUT);

    pinMode(xp_PWM, OUTPUT);
    pinMode(xn_PWM, OUTPUT);
    pinMode(yp_PWM, OUTPUT);
    pinMode(yn_PWM, OUTPUT);

    pinMode(xp_dir, OUTPUT);
    pinMode(xn_dir, OUTPUT);
    pinMode(yp_dir, OUTPUT);
    pinMode(yn_dir, OUTPUT);

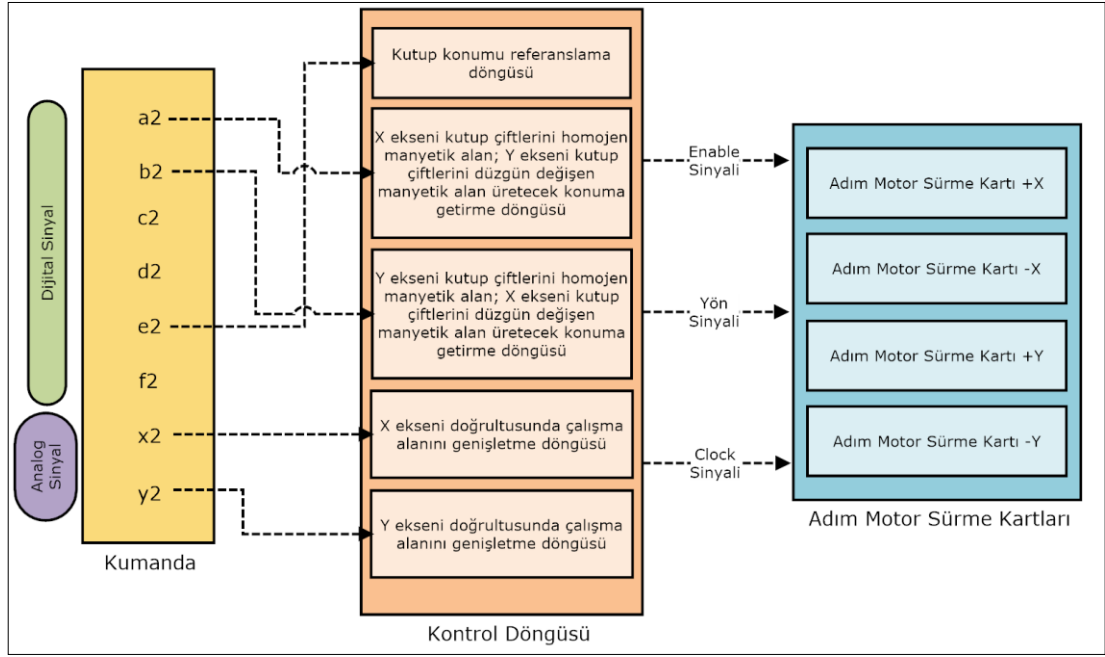
    pinMode(xp_startstop, OUTPUT);
    pinMode(xn_startstop, OUTPUT);
    pinMode(yp_startstop, OUTPUT);
    pinMode(yn_startstop, OUTPUT);
}

```

Şekil 4.2 Akım kontrol döngüsünün girdi ve çıktıların tanımlanması

4.2 Konum Kontrol Yazılımı

Konum kontrol yazılımı da temel anlamda; girdilerin tanımlanması, çıktıların tanımlanması ve kontrol döngüsü olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Girdiler ile çıktıların program üzerinde tanımlanması Şekil 4.4' de gösterilmiştir. Kontrol döngüsü ise, kumanda sinyalleri tarafından oluşturulan girdilere, senaryoya bağlı olarak cevaplar sunacak alt döngülerden oluşmaktadır. Konum kontrol döngüsü şematik olarak Şekil 4.3' de gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Konum kontrol döngüsü

```

int a2 = 32; // Buton A - Kumanda 2
int b2 = 30; // Buton B - Kumanda 2
int c2 = 28; // Buton C - Kumanda 2
int d2 = 26; // Buton D - Kumanda 2
int e2 = 24; // Buton E - Kumanda 2
int f2 = 22; // Buton F - Kumanda 2
int x2 = A0; // Potansiyometre X - Kumanda 2
int y2 = A1; // Potansiyometre Y - Kumanda 2

int enxp = 43; // Enable +x
int enxn = 7; // Enable -x
int enyp = 49; // Enable +y
int enyn = 4; // Enable -y

int dir_xp = 41; // Yön +x
int dir_xn = 6; // Yön -x
int dir_yp = 47; // Yön +y
int dir_yn = 3; // Yön -y

int ste_xp = 39; // Clock +x
int ste_xn = 5; // Clock -x
int ste_yp = 45; // Clock +y
int ste_yn = 2; // Clock -y

int lmts_xp = 9; // Limit Anahtarı +x
int lmts_xn = 11; // Limit Anahtarı -x
int lmts_yp = 8; // Limit Anahtarı +y
int lmts_yn = 10; // Limit Anahtarı -y

int t=350;
int r1;
int r2;
int a;
int b;
int c;

void setup() {
  pinMode(a2,INPUT);
  pinMode(b2,INPUT);
  pinMode(c2,INPUT);
  pinMode(d2,INPUT);
  pinMode(e2,INPUT);
  pinMode(f2,INPUT);
  pinMode(x2,INPUT);
  pinMode(y2,INPUT);

  pinMode(enxp,OUTPUT);
  pinMode(enxn,OUTPUT);
  pinMode(enyp,OUTPUT);
  pinMode(enyn,OUTPUT);

  pinMode(dir_xp,OUTPUT);
  pinMode(dir_xn,OUTPUT);
  pinMode(dir_yp,OUTPUT);
  pinMode(dir_yn,OUTPUT);

  pinMode(ste_xp,OUTPUT);
  pinMode(ste_xn,OUTPUT);
  pinMode(ste_yp,OUTPUT);
  pinMode(ste_yn,OUTPUT);

  pinMode(lmts_xp,INPUT);
  pinMode(lmts_xn,INPUT);
  pinMode(lmts_yp,INPUT);
  pinMode(lmts_yn,INPUT);

  digitalWrite(enxp,LOW); // Enable +x => LOW => Active
  digitalWrite(enxn,LOW); // Enable -x => LOW => Active
  digitalWrite(enyp,LOW); // Enable +x => LOW => Active
  digitalWrite(enyn,LOW); // Enable -x => LOW => Active
}

```

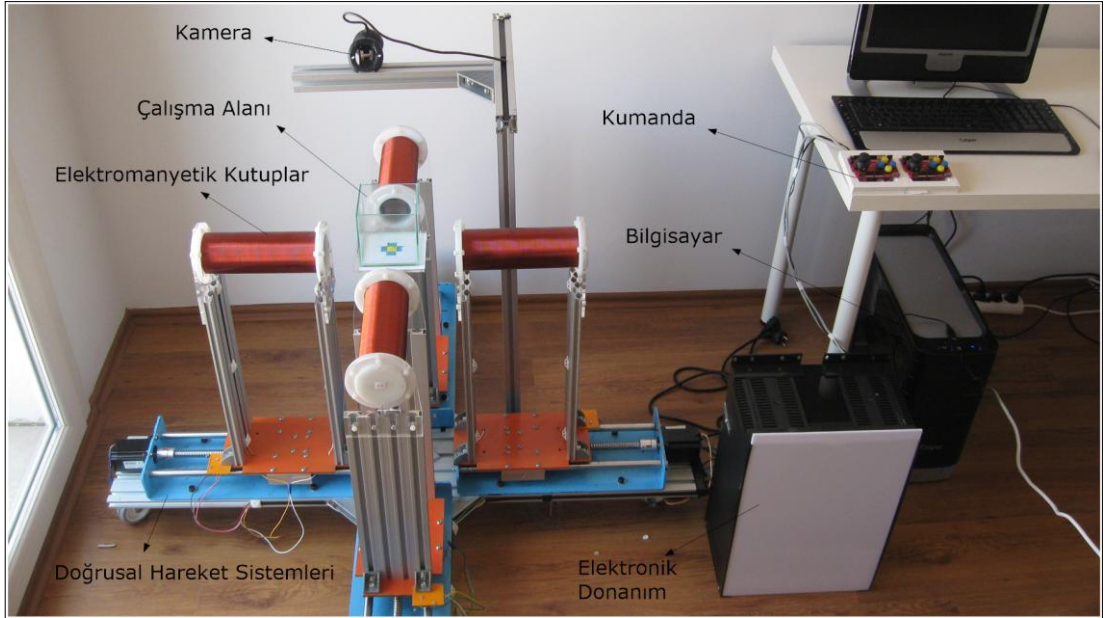
Şekil 4.4 Konum kontrol döngüsünün girdi ve çıktıların tanımlanması

BÖLÜM BEŞ

DENEYSEL ÇALIŞMA

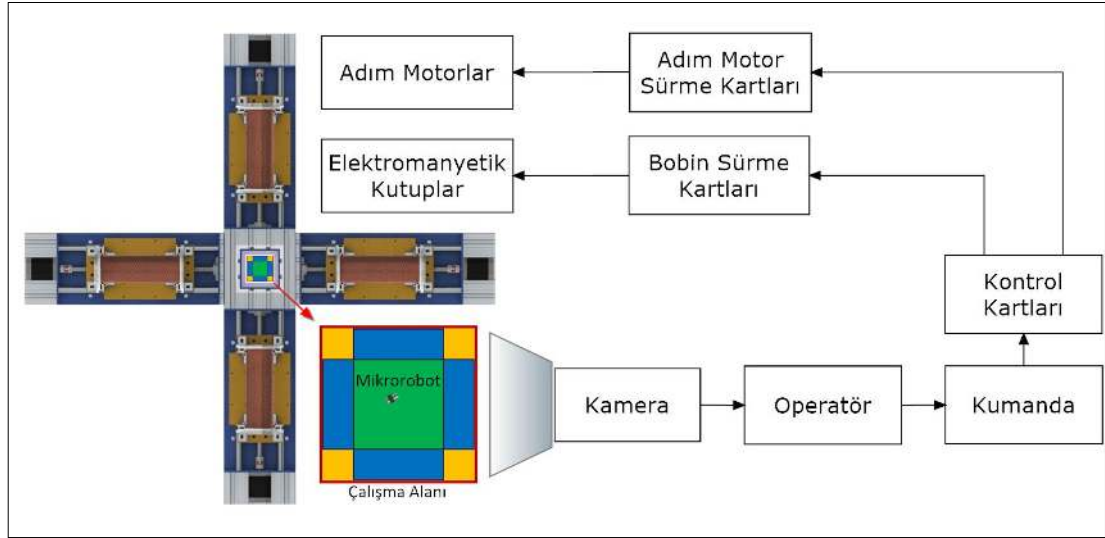
5.1 Elektromanyetik Aktüatör Sistemi Kurulumu

Tasarlanan elektromanyetik aktüatör sistemi tarafından mikrorobotun amaçlanan hareketlerinin gerçekleşmesinin incelenmesi amacı ile testlerin yapılacağı bir deney sistemi üretilmiştir. Deney sistemini oluşturan ana kısımlar Şekil 5.1’ de gösterilmiştir. Elektromekanik yapıyı oluşturan tüm parametreler, sistem tasarımında belirlenen parametrelerdir.



Şekil 5.1 Elektromanyetik aktüatör sistemi kurulumu

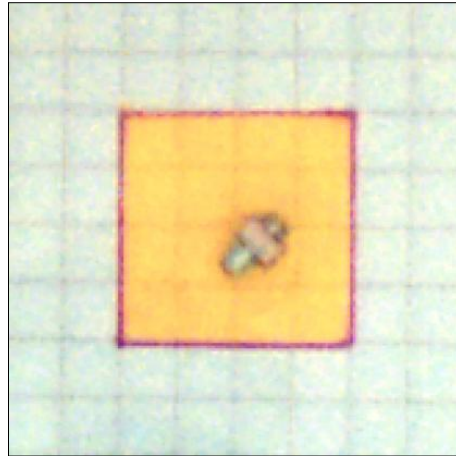
Şekil 5.2 deney sisteminin çalışma prensibini göstermektedir. Sistemin temel kontrol sistemi açık devre kontroldür. Operatör, kamera aracılığıyla mikrorobotun konumunu daimi olarak gözlemlemektedir. Mikrorobotun konum bilgisine ve istenilen hareket biçimine göre, kontrol kartlarına kumanda sinyalleri gönderilmektedir. Kumanda sinyalleri kontrol döngüsünde değerlendirilip sürücü kartlara aktarılmaktadır. Sürücü kartlar tarafından, aktüatörlere gönderilen elektrik akımının biçimlendirilmesi ile elektromanyetik kutupların konum ve akım kontrolü gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.2 Elektromanyetik aktüatör sisteminin çalışma prensibi

5.2 Mikrorobotun Düzlemsel Hareketinin İncelenmesi

Mikrorobotun belirlenen çalışma sınırları ($20 \times 20 \text{ mm}^2$) içerisinde, yatay X-Y düzleminde bulunduğu başlangıç konumu Şekil 5.3’ de gösterilmiştir.

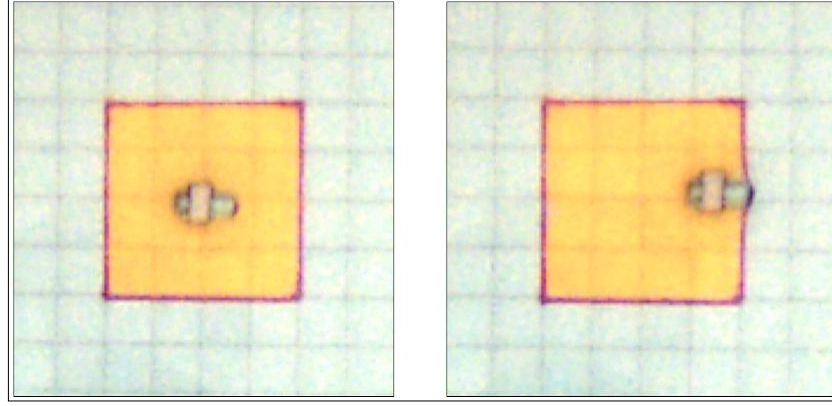


Şekil 5.3 XY yatay düzleminde bulunan mikrorobotun başlangıç konumu

Çalışmanın amacı, mikrorobotun çalışma sınırları içerisinde hareket kabiliyetinin test edilmesidir. Bu amaçla mikrorobota belirlenen hareket kurgusu kullanılarak, hareketler yaptırılmıştır.

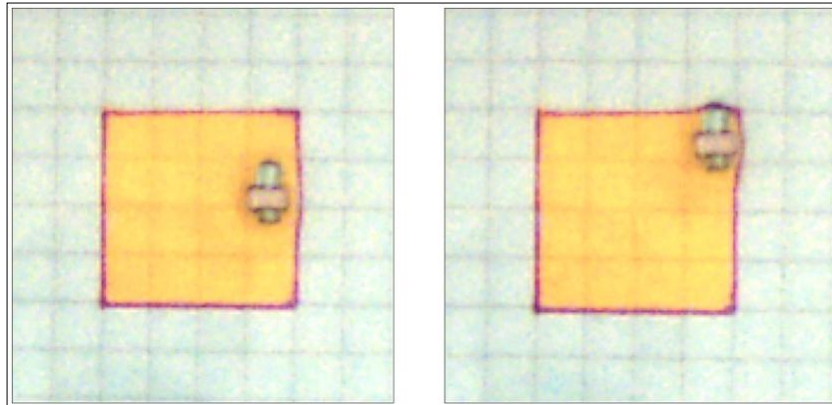
Mikrorobot öncelikle, +X yönünde, X eksen kutup çiftleri tarafından oluşturulan homojen manyetik alan etkisi ile yönlendirilmiştir. Yönlendirmeyi gerçekleyen

homojen manyetik alan etkin iken, Y eksen kutup çiftleri tarafından düzgün değişken manyetik alan oluşturulmuştur. Düzgün değişken manyetik alanın etkisi ile mikrorobot +X yönünde doğrusal hareket gerçekleştirmiştir. Mikrorobotun +X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi Şekil 5.4' te gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Mikrorobotun +X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi

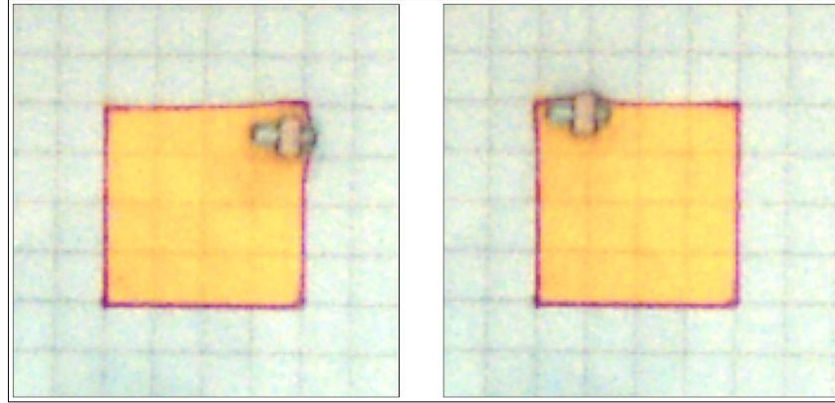
Mikrorobot, çalışma alanı sınırına geldiğinde, +Y yönünde, Y eksen kutup çiftleri tarafından oluşturulan homojen manyetik alan etkisi ile yönlendirilmiştir. Yönlendirmeyi gerçekleyen homojen manyetik alan etkin iken, X eksen kutup çiftleri tarafından düzgün değişken manyetik alan oluşturulmuştur. Düzgün değişken manyetik alanın etkisi ile mikrorobot +Y yönünde doğrusal hareket gerçekleştirmiştir. Mikrorobotun +Y yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi Şekil 5.5' de gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Mikrorobotun +Y yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi

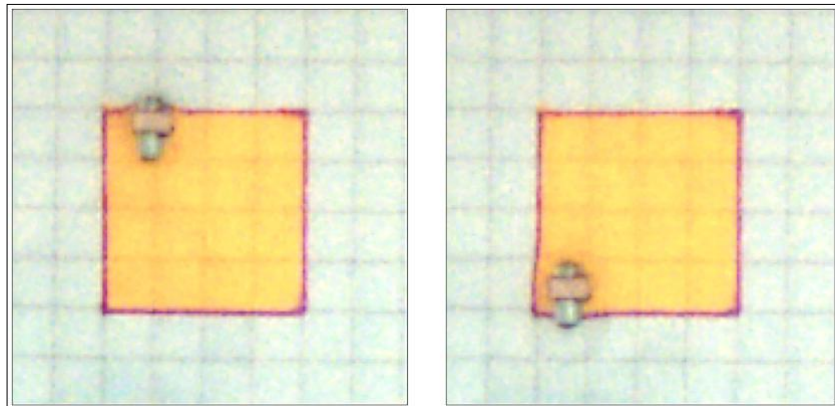
Mikrorobot, çalışma alanı sınırına geldiğinde, -X yönünde, X eksen kutup çiftleri

tarafından oluşturulan homojen manyetik alan etkisi ile yönlendirilmiştir. Yönlendirmeyi gerçekleyen homojen manyetik alan etkin iken, Y eksen kutup çiftleri tarafından düzgün değişken manyetik alan oluşturulmuştur. Düzgün değişken manyetik alanın etkisi ile mikrorobot -X yönünde doğrusal hareket gerçekleştirmiştir. Mikrorobotun -X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi Şekil 5.6' de gösterilmiştir.



Şekil 5.6 Mikrorobotun -X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi

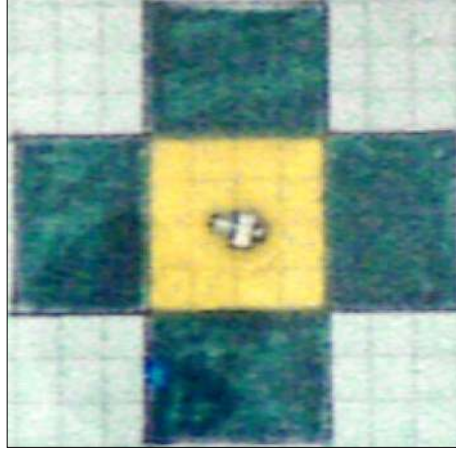
Mikrorobot, çalışma alanı sınırına geldiğinde, -Y yönünde, Y eksen kutup çiftleri tarafından oluşturulan homojen manyetik alan etkisi ile yönlendirilmiştir. Yönlendirmeyi gerçekleyen homojen manyetik alan etkin iken, X eksen kutup çiftleri tarafından düzgün değişken manyetik alan oluşturulmuştur. Düzgün değişken manyetik alanın etkisi ile mikrorobot -Y yönünde doğrusal hareket gerçekleştirmiştir. Mikrorobotun -Y yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi Şekil 5.7' de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Mikrorobotun -Y yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi

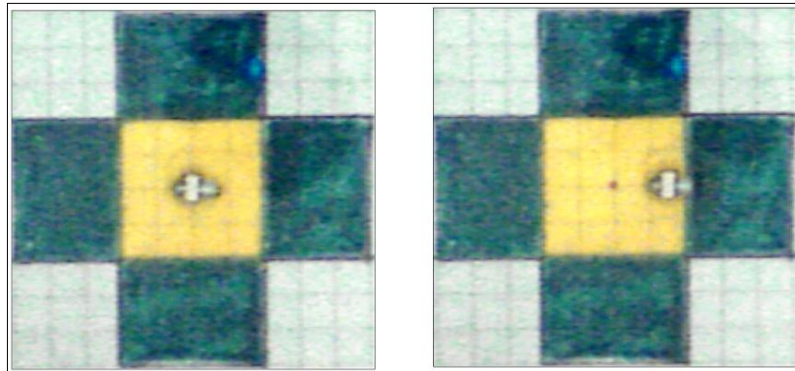
5.3 Mikrorobotun Genişletilmiş Çalışma Alanında Hareketinin İncelenmesi

Mikrorobotun çalışma alanı sınırları içerisinde, yatay XY düzleminde başlangıç konumu Şekil 5.8' de gösterilmiştir. Sarı renkli alan mikrorobotun düzlemsel harekete sahip olduğu bölgeyi; mavi renkli alanlar ise mikrorobota doğrusal hareket kabiliyetinin kazandırıldığı bölgeleri ifade etmektedir.



Şekil 5.8 Çalışma alanı sınırları içerisinde mikrorobotun başlangıç konumu

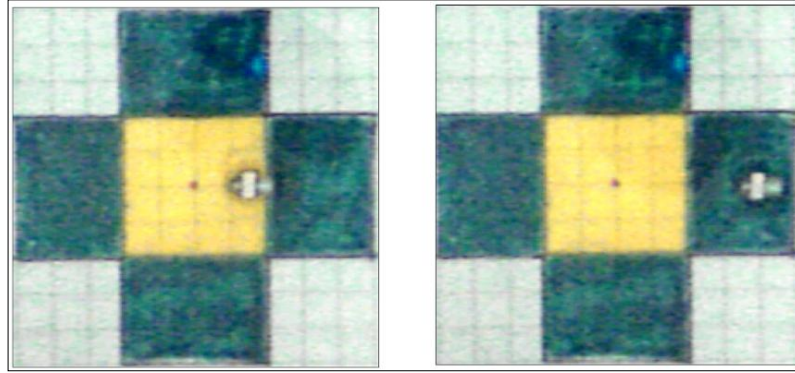
Mikrorobot öncelikle, +X yönünde, X eksen kutup çiftleri tarafından oluşturulan homojen manyetik alan etkisi ile yönlendirilmiştir. Yönlendirmeyi gerçekleyen homojen manyetik alan etkin iken, Y eksen kutup çiftleri tarafından düzgün değişken manyetik alan oluşturulmuştur. Düzgün değişken manyetik alanın etkisi ile mikrorobot +X yönünde doğrusal hareket gerçekleştirmiştir. Mikrorobotun +X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi Şekil 5.9' da gösterilmiştir.



Şekil 5.9 Mikrorobotun sabit çalışma alanında, +X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi

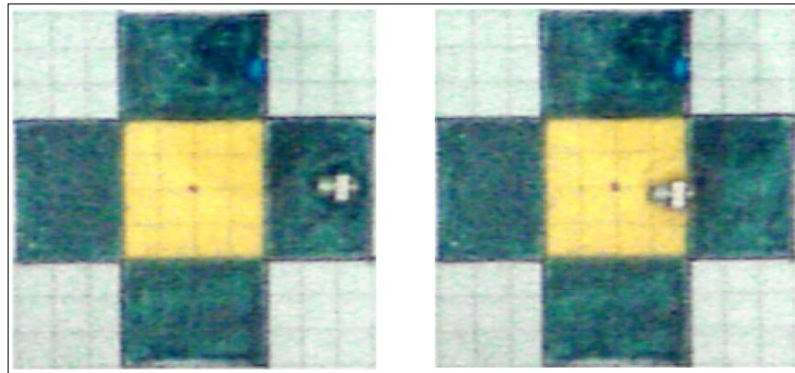
Mikrorobotun +X yönünde sabit çalışma alanının sınırına gelmesi sonrası,

homojen manyetik alan oluşturan X eksen kutup çiftleri +X yönünde hareket ettirilmiştir. Kutupların hareketi sonucu homojen manyetik alan bölgesi +X yönünde taşınmıştır. Y eksen kutup çiftleri tarafından oluşturulan düzgün değişken manyetik alanın etkisi ile mikrorobotun +X yönünde doğrusal hareket gerçekleştirmiştir. Mikrorobotun genişletilmiş çalışma alanı sınırlarında gerçekleştirdiği +X yönünde doğrusal hareket Şekil 5.10' da gösterilmiştir.



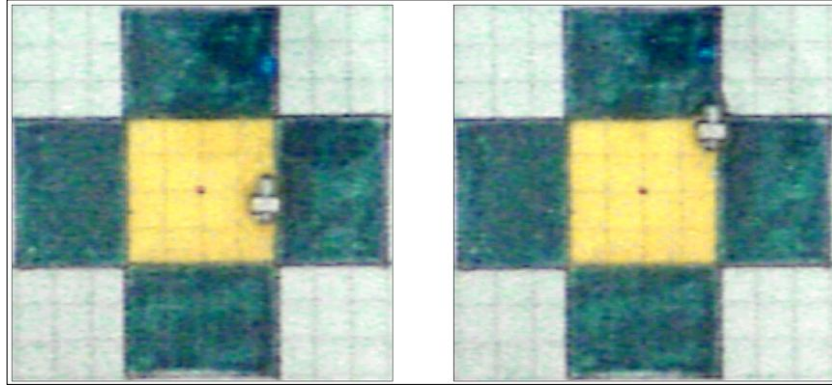
Şekil 5.10 Mikrorobotun genişletilmiş çalışma alanı sınırlarında, +X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi

Mikrorobotun +X yönünde doğrusal hareketi ile genişletilmiş çalışma alanı sınırlarına gelmesi sonrası, mikrorobot X eksen kutup çiftleri tarafından -X yönünde yönlendirilmiştir. -X yönünde yönlendirilmiş mikrorobot, Y eksen kutup çiftleri tarafından oluşturulan düzgün değişken manyetik alan etkisi ile aynı yönde doğrusal hareket gerçekleştirmiştir. Mikrorobotun genişletilmiş çalışma alanı sınırları içerisinde, -X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi Şekil 5.11' de gösterilmiştir.



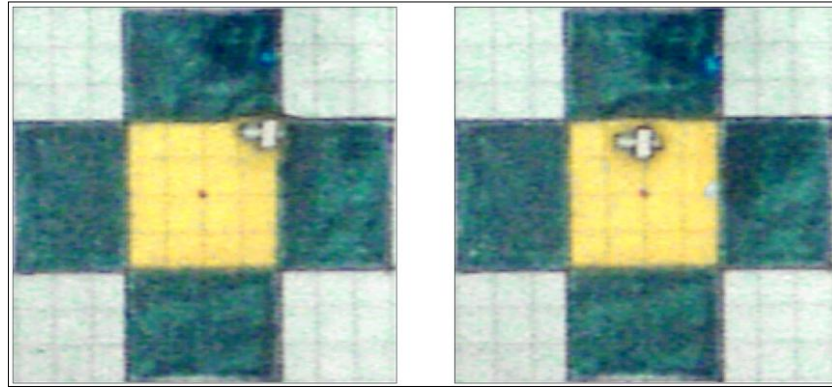
Şekil 5.11 Mikrorobotun genişletilmiş çalışma alanı sınırlarında, -X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi

Mikrorobot, düzlemsel hareket yapabildiği çalışma alanına geldiğinde, Y eksen kutup çiftleri tarafından oluşturulan homojen manyetik alan etkisi ile +Y yönünde yönlendirilmiştir. +Y yönünde yönlendirilen mikrorobot, X eksen kutup çiftleri tarafından oluşturulan düzgün değişen manyetik alanın etkisi ile +Y yönünde doğrusal hareket gerçekleştirmiştir. Mikrorobotun +Y yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi Şekil 5.12' de gösterilmiştir.



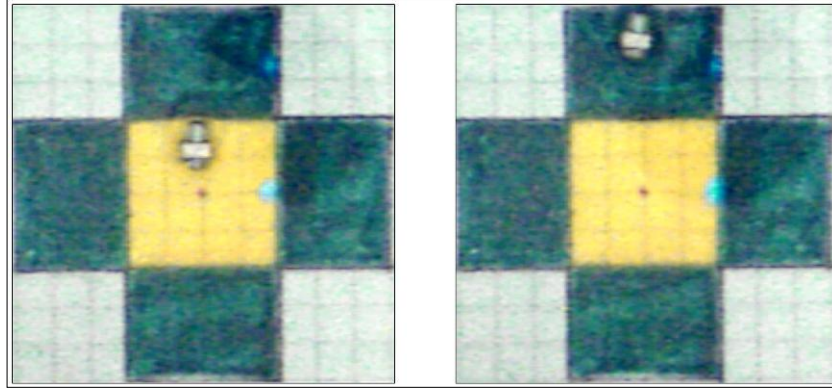
Şekil 5.12 Mikrorobotun, sabit çalışma alanında, +Y yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi

Mikrorobot, +Y yönünde hareketiyle çalışma alanı sınırına geldiğinde, X eksen kutup çiftleri tarafından oluşturulan homojen manyetik alanın etkisi ile -X yönünde yönlendirilmiştir. -X yönünde yönlendirilen mikrorobot, Y eksen kutup çiftleri tarafından oluşturulan düzgün değişen manyetik alanın etkisi ile -X yönünde doğrusal hareket gerçekleştirmiştir. Mikrorobotun -X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi Şekil 5.13' te gösterilmiştir.



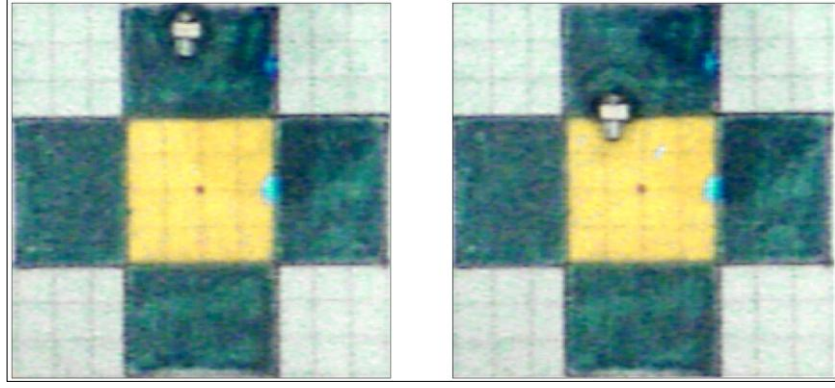
Şekil 5.13 Mikrorobotun sabit çalışma alanında, -X yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi

Mikrorobotun Y ekseninde genişletilmiş çalışma alanında hareketinin incelenmesi amacı ile homojen manyetik alan oluşturacak Y eksen kutup çiftleri +Y yönünde hareket ettirilerek homojen manyetik alan +Y yönünde taşınmıştır. Genişletilmiş çalışma alanında, +Y yönünde oluşturulan homojen manyetik alanın etkisi ile mikrorobot +Y yönünde yönlendirilmiştir. X eksen kutup çiftleri tarafından oluşturulan düzgün değişen manyetik alanın etkisi ile mikrorobot aynı yönde doğrusal hareket gerçekleştirmiştir. Mikrorobotun genişletilmiş çalışma alanı sınırlarında +Y yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi Şekil 5.14' te gösterilmiştir.



Şekil 5.14 Mikrorobotun genişletilmiş çalışma alanı sınırlarında +Y yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi

Mikrorobotun +Y yönünde doğrusal hareketi ile genişletilmiş çalışma alanı sınırlarına gelmesi sonrası, mikrorobot Y eksen kutup çiftleri tarafından -Y yönünde yönlendirilmiştir. -Y yönünde yönlendirilmiş mikrorobot, X eksen kutup çiftleri tarafından oluşturulan düzgün değişen manyetik alan etkisi ile aynı yönde doğrusal hareket gerçekleştirmiştir. Mikrorobotun genişletilmiş çalışma sınırları içerisinde, -Y yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi Şekil 5.15' de gösterilmiştir.



Şekil 5.15 Mikrorobotun genişletilmiş çalışma alanı sınırlarında, -Y yönünde yönlendirilmesi ve doğrusal hareketi

BÖLÜM ALTI

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması öncesinde yapılan ve literatürde yer alan çalışmalar kapsamında, sabit elektromanyetik kutuplardan meydana gelen aktüatörlerin akım kontrolü ile mikrorobotların hareket ettirilmesi amaçlanmıştır. Fakat yapılmış tüm çalışmaların sonucunda, mikrorobotların görece küçük çalışma uzaylarında hareket kabiliyeti kazandıkları tespit edilmiştir.

Elektromanyetik aktüatörler tarafından tahrik ve kontrol edilen mikrorobotların cerrahi operasyonlarda kullanılabilmesi için, mikrorobotların geniş çalışma uzaylarında hareket kabiliyeti kazanması en önemli zorunluluktur. Mikrorobotlara geniş çalışma uzaylarında hareket kabiliyeti kazandırılması amacına yönelik olarak ise iki tür yöntem belirlenmiştir. Bunlar:

- *Elektromanyetik aktüatör yapılarının mevcut sistemlere göre görece büyüülmesi sonucu mikrorobotlara daha geniş çalışma uzaylarında hareket kabiliyeti kazandırılması:* Belirlenen bu yöntem yüksek kurulum maliyetleri ve operasyonun gerçekleşeceği bölgelerin dışında da yüksek manyetik alan şiddeti oluşturmamasından kaynaklı olarak kullanışlı değildir.
- Elektromanyetik aktüatör sistemini oluşturan kutupların sistematik hareketi ile çalışma uzayının taşınabilmesi prensibine dayalı olarak mikrorobota geniş çalışma uzaylarında hareket kabiliyeti kazandırılması: Tez çalışmasının da konusu olan bu yöntem ile mevcut çalışma uzayı mikrorobotun hareket biçimine bağlı olarak sürekli olarak taşınabilecektir. Bu yöntemin en önemli avantajı, belirli bölgelerde manyetik alan oluşturarak, operasyon sırasında operasyon bölgesi haricinde diğer bölgelerin manyetik alana maruz kalarak zarar görmesini engellemesidir. Ayrıca, sabit kutuplu elektromanyetik aktüatör sistemlerine göre görece küçük sistem yapısına sahip olması, düşük kurulum maliyetleri diğer önemli avantajlarıdır.

KAYNAKLAR

- Abbott, J. J., Nagy, Z., Beyeler, F., ve Nelson, B. J. (2007a). Robotics in the small, part I: microbotics. *Robotics & Automation Magazine*, 14(2), 92-103.
- Abbott, J. J., Ergeneman, O., Kummer, M. P., Hirt, A. M., ve Nelson, B. J. (2007b). Modeling magnetic torque and force for controlled manipulation of soft-magnetic bodies. *Robotics*, 23(6), 1247-1252.
- Choi, H., Cha, K., Choi, J., Jeong, S., Jeon, S., Jang, G. ve Park, S. (2010). EMA system with gradient and uniform saddle coils for 3D locomotion of microrobot. *Sensors and Actuators A: Physical*, 163(1), 410-417.
- Choi, H., Choi, J., Jang, G., Park, J. O., ve Park, S. (2009a). Two-dimensional actuation of a microrobot with a stationary two-pair coil system. *Smart Materials and Structures*, 18(5), 055007.
- Choi, H., Choi, J., Jeong, S., Yu, C., Park, J. O., ve Park, S. (2009b). Two-dimensional locomotion of a microrobot with a novel stationary electromagnetic actuation system. *Smart Materials and Structures*, 18(11), 115017.
- Choi, J., Choi, H., Jeong, S., Park, B. J., Ko, S. Y., Park, J. O., ve Park, S. (2012). Position-based Compensation of Electromagnetic Fields Interference for Electromagnetic Locomotive Microrobot. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*.
- Haga, Y., ve Esashi, M. (2004). Biomedical microsystems for minimally invasive diagnosis and treatment. *Proceedings of the IEEE*, 92(1), 98-114.
- Jeong, S., Choi, H., Ko, S. Y., Park, J. O., ve Park, S. (2012). Remote controlled micro-robots using electromagnetic actuation (EMA) systems. *In Biomedical*

Robotics and Biomechatronics (BioRob), 4th IEEE RAS & EMBS International Conference, 482-487.

Kummer, M. P., Abbott, J. J., Kratochvil, B. E., Borer, R., Sengul, A., ve Nelson, B. J. (2010). OctoMag: An electromagnetic system for 5-DOF wireless micromanipulation. *Robotics*, 26(6), 1006-1017.

Martel, S., Mathieu, J. B., Felfoul, O., Chanu, A., Aboussouan, E., Tamaz, S., ve Mankiewicz, M. (2007). Automatic navigation of an untethered device in the artery of a living animal using a conventional clinical magnetic resonance imaging system. *Applied Physics Letters*, 90(11), 114105-114105.

Mathieu, J. B., Martel, S., Yahia, L. H., Soulez, G., ve Beaudoin, G. (2005). Preliminary investigation of the feasibility of magnetic propulsion for future microdevices in blood vessels. *Bio-Medical Materials and Engineering*, 15(5), 367-374.

Mathieu, J. B., Martel, S., Yahia, L., Soulez, G., ve Beaudoin, G. (2003). Preliminary studies for using magnetic resonance imaging systems as a mean of propulsion for microrobots in blood vessels and evaluation of ferromagnetic artefacts. In *Electrical and Computer Engineering, IEEE CCECE, Canadian Conference*, 835-838.

Schurle, S., Peyer, K. E., Kratochvil, B. E., ve Nelson, B. J. (2012). Holonomic 5-DOF magnetic control of 1D nanostructures. In *Robotics and Automation (ICRA), IEEE International Conference*, 1081-1086.

Yesin, K. Berk, Karl Vollmers, ve Bradley J. Nelson. (2006). Modeling and control of untethered biomicrorobots in a fluidic environment using electromagnetic fields. *The International Journal of Robotics Research*, 527-536.