T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKRO –ROBOT KOLU DİZAYNI, ÜRETİMİ VE GÖRSEL GERİ BESLEME İLE TEMASSIZ MANİPÜLASYONU

AYŞE İLGİNOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN
YARD. DOÇ. DR. HÜSEYİN ÜVET

İSTANBUL, 2016

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKRO-ROBOT KOLU DİZAYNI, ÜRETİMİ VE GÖRSEL GERİ BESLEME İLE TEMASSIZ MANİPÜLASYONU

Ayşe İLGİNOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 17.11.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yard. Doç. Dr. Hüseyin ÜVET

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yard. Doç. Dr. Hüseyin ÜVET

Yıldız Teknik Üniversitesi

Yard. Doç. Dr. Kadir ERKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Yard. Doç. Dr. Korhan KAYIŞLI

Nişantaşı Üniversitesi

Bu çalışma, TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı'nın 113E584 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu tezde sağlık sektöründe sıkça kullanılan mikro robot kolları üzerine alternatif bir yöntem geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Tasarım-simülasyon, üretim ve deney düzeneği olarak 3 farklı aşaması olan bu çalışmada sonuç olarak 2 farklı deney düzeneği kurulmuş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans tez danışmanlığımı üstlenerek hiçbir zaman yardımını esirgemeyip, hoşgörüsünü eksik etmeyen ve bana yol gösteren değerli hocam Yard. Doç. Dr. Hüseyin Üvet'e ve gösterdiği destek ve yardımları için değerli hocam Yard. Doç. Dr. Kadir Erkan'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Tez çalışmam sırasında benimle akademik tecrübelerini paylaşan ve daima destekleyen sevgili mesai arkadaşlarım Müh. Rahmetullah Varol ve Arş. Gör. Yusuf Kahraman'a ve her zaman yanımda olan, manevi desteklerini esirgemeyen nişanlım Dr. Müh. Ali Doğrul'a, abime, anneme ve babama sonsuz şükranlarımı sunarım.

Aralık, 2016

Ayşe İLGİNOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vi

ŞEKİL LİSTESİ viii

ÇİZELGE LİSTESİ xii

ÖZET xii

ABSTRACT xiv

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 4
1.3 Hipotez 4

BÖLÜM 2

MİKRO ROBOT KOLU DİZAYNI, SİMÜLASYONU VE ÜRETİMİ 5

2.1 Mikro Robot Kolu Tasarımı 5
2.2 Mikro Robot Kolu Simülasyonları 8
2.2.1 100 µm Çapındaki Polistiren Küreye Etki Eden Sürüklenim Kuvvetinin Analizi 8
2.2.2 Manyetik Kuvvetlerin Mikro Robot Kol Sistemine Etkisinin Analizi 9
2.2.2.1 Mıknatısların Kuzey Kutuplarının +Z Yönünde Olma Durumu 11
2.2.2.2 Mıknatısların Kuzey Kutuplarının Merkezden Dışa Doğru Olma Durumu 17
2.2.2.3 Mıknatısların Kuzey Kutuplarının Yatay Konumda Birbirlerine Göre Çapraz Olma Durumu 22
2.2.3 Mıknatısların Konumlandırma Analiz Sonuçları 27
2.2.4 Mikro Robot Kolunun Mikro Akışkan Kanal İçindeki Hareketinin Analizi 27

2.3 Nikel Kaplı Polimer Mikro Robot Kolu Üretimi 32
2.3.1 Polimer Malzeme Seçimi ve İşlenmesi 32
2.3.2 Akımsız Nikel Kaplama Yöntemiyle Yüzeyin Kaplanması İşlemi 35

BÖLÜM 3

MİKRO ROBOT KOLU İÇİN TEMASSIZ MANİPÜLASYON TEKNİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ 36

3.1 Manyetik Alanla Manipülasyon Deney Düzeneğinin Geliştirilmesi 36
3.2 Elektromıknatısla Geliştirilen Deney Düzeneği 43
3.2.1 Sistemin Dinamik Modeli 47
3.3 Levitasyon Doğrulaması 52

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER 56

KAYNAKLAR 60

ÖZGEÇMİŞ 64

SİMGE LİSTESİ

A	Robotun kesit alanı
B	Manyetik akı yoğunluğu
c_d	Sürüklenme katsayısı
F_d	Akışkan direnci
F_{mag}	Manyetik kuvvet
F_{mag_z}	Dikey eksendeki manyetik kuvvet
H	Manyetik alan şiddeti
I	Elektromıknatıs üzerinden geçen akım
m	Manyetik dipol momenti
M	Manyetizasyon vektörü
v	Robotun göreli hızı
V	Parçacığın hacmi
V_r	Robotun hacmi
ρ_r	Robotun yoğunluğu
θ_x	Hexapodun x ekseni etrafındaki dönüş açısı
μ_0	Manyetik geçirgenlik
χ	Manyetik yalıtkanlık katsayısı
μ_r	Manyetik geçirgenlik katsayısı
∇U	Potansiyel enerji gradyanı
ρ_f	Sıvı yoğunluğu

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Mikro robot kolu teknik resmi……8
Şekil 2. 2 Mikro robot kolu sistemini oluşturan parçalar……8
Şekil 2. 3 Mikro robot kolu sistemi önden görünümü……9
Şekil 2. 4 Polistiren küreye 3 ms boyunca uygulanan 1 µN 'luk kuvvet sonucu etkiyen sürüklenim kuvveti grafiği……10
Şekil 2. 5 Polistiren kürenin hızı uygulanan kuvvet doğrultusunda artmaktadır……10
Şekil 2. 6 Bu grafik 250 µm kalınlığındaki polipropilenden üretiken robot gövdesinin hacmine ve yoğunluğuna bağlı olarak mikro robot kolunun 1x1 mm'lik ayaklarına nikelin kaplama kalınlığını veren grafiktir……12
Şekil 2. 7 Mıknatısların manyetik alan çizgileri……13
Şekil 2. 8 Nikel kaplamalar üzerinden geçen manyetik alan çizgileri……14
Şekil 2. 9 Nikel kaplama ile mıknatıslar arasındaki mesafenin değişimine bağlı kuvvet ve tork grafikleri……14
Şekil 2. 10 Mıknatıslar mikro-robot koluna göre z-ekseninde -3 mm, y ekseninde -2 mm uzaklıktayken 500 nm nikel kaplama üzerindeki manyetik alan çizgileri……15
Şekil 2. 11 500 nm kaplama nikellerden z-ekseninde 3 mm uzaklıktaki mıknatısların ekseninde -2 mm' den 2 mm'ye hareketi sonucunda mikro robot koluna etki eden kuvvet ve tork grafikleri……16
Şekil 2. 12 Mıknatısların z ekseninde mikro robot kolundan 3 mm uzağa sabitlenmiş ve z eksenine göre 45 derece dönmüş konumundaki görüntüsü……16
Şekil 2. 13 90 derece dönme esnasında x ve y eksenleri yönünde oluşan kuvvetler..17
Şekil 2. 14 500 nm kaplama nikellerden z-ekseninde 3 mm uzaklıktaki mıknatısların z ekseninde 90° hareketi sonucunda mikro robot koluna etki eden kuvvet ve tork grafikleri……17
Şekil 2. 15 Mıknatısların kırmızı ile gösterilen kuzey kutupları merkezden dışarı olacak şekilde yerleştirilmiştir……18
Şekil 2. 16 Mıknatısların kırmızı ile gösterilen kuzey kutupları merkezden dışarı olacak şekildeki gibi yerleştirilmiştir……18
Şekil 2. 17 Nikel kaplama ile mıknatıslar arasındaki mesafenin değişimine bağlı kuvvet ve tork grafiği……19
Şekil 2. 18 Mıknatıslar nikel kaplamaya göre z-ekseninde -3 mm, y-ekseninde -2 mm uzaklıktayken 500 nm nikel kaplama üzerindeki manyetik alan çizgileri…20

Şekil 2. 19 500 nm kaplama nikellerden z-ekseninde 3 mm uzaklıktaki mıknatısların y-ekseninde -2 mm' den 2 mm'ye hareketi sonucunda mikro robot koluna etki eden kuvvet ve tork grafikleri……20
Şekil 2. 20 Mıknatısların z ekseninde mikro robot kolundan 3 mm uzağa sabitlenmiş ve z eksenine göre 45 derece dönmüş konumundaki görüntüsü……..21
Şekil 2. 21 90 derece dönme esnasında x ve y eksenleri yönünde oluşan kuvvetler..22
Şekil 2. 22 500 nm kaplama nikellerden z-ekseninde 3 mm uzaklıktaki mıknatısların z ekseninde 90° hareketi sonucunda mikro robot koluna etki eden kuvvet ve tork grafikleri……..22
Şekil 2. 23 Mıknatıslar yatayda çapraz yerleştirilmiştir……23
Şekil 2. 24 Çapraz yerleştirilen mıknatısların 500 nm kalınlığındaki nikel kaplamalarda oluşturduğu manyetik alan çizgileri görülmektedir……..23
Şekil 2. 25 Nikel kaplama ile mıknatıslar arasındaki mesafenin değişimine bağlı kuvvet ve tork grafiği……23
Şekil 2. 26 Mıknatıslar nikel kaplamaya göre z-ekseninde -3 mm, y-ekseninde mikro robot kolundan -1 mm uzaklıktayken 500 nm nikel kaplama üzerindeki manyetik alan çizgileri……..24
Şekil 2. 27 500 nm kaplama nikellerden z-ekseninde 3 mm uzaklıktaki mıknatısların y ekseninde -2 mm' den 2 mm'ye hareketi sonucunda mikro robot koluna koluna etki eden kuvvet ve tork grafikleri……25
Şekil 2. 28 Mıknatısların z-eksenine göre 45 derece konumundaki görüntüsü…..26
Şekil 2. 29 500 nm kaplama nikellerden z-ekseninde 3 mm uzaklıktaki mıknatısların z ekseninde 90° hareketi sonucunda mikro robot koluna etki eden kuvvet grafikleri……26
Şekil 2. 30 500 nm kaplama nikellerden z-ekseninde 3 mm uzaklıktaki mıknatısların z ekseninde 90° hareketi sonucunda mikro robot koluna etki eden kuvvet grafiği……..26
Şekil 2. 31 Robot Koluna ait sınır koşullarının tanımlanmıştır……..27
Şekil 2. 32 Robot kolunun ve 10-12 m/s hız ile akmakta olan sıvının akış çizgilerinin yukarıdan görünümüdür……28
Şekil 2. 33 Robot koluna z ekseni yönünde etkiyen toplam kuvveti göstermektedir..28
Şekil 2. 34 Robot koluna z ekseni yönünde etkiyen net kuvvet grafiğidir……..29
Şekil 2. 35 Robot koluna x ekseni yönünde etkiyen manyetik kuvvet grafiğidir……..30
Şekil 2. 36 Robot koluna x ekseni yönünde etkiyen net kuvvet grafiğidir……..30
Şekil 2. 37 Mikro-robot kolunun yatayda ilerlemesi sonucunda; mikro-robot kolu üzerinde mavi ve yeşille belirtilen iki noktanın z ekseni doğrultusunda konum değiştirmesi……31
Şekil 2. 38 Mikro hassasiyette CNC ile işlenen mikro-robot kolu……34
Şekil 3. 1 Hexapod'un farklı konum ve yönelimlerde çekilmiş görüntüleri……..36
Şekil 3. 2 Hexapod kontrolcüsüne ait donanım mimarisi……38
Şekil 3. 3 Hexapod kontrolcüsü bağlantı panosu……38
Şekil 3. 4 Hexapod kontrol paneli……39
Şekil 3. 5 Mıknatısların taşınması için üretilen mıknatıs yatağı……40
Şekil 3. 6 Sabit mıknatıslar kullanılarak oluşturulan kontrol sistemi……41
Şekil 3. 7 Deadband durumu……42

Şekil 3. 8 Tek sarımın, merkez eksenin üzerinde bulunan mikro robota uyguladığı manyetik kuvvetin dikey eksendeki mesafeye göre değişimi……..46
Şekil 3. 9 Kullanılan bobin teli çapına göre mikro robot üzerinde oluşan dikey manyetik kuvvetin değişimini gösteren grafik……47
Şekil 3. 10 Manyetik kuvvet ile kaldırma kuvvetinin elektromıknatıs üzerinden geçen akım değerine göre grafiği……..48
Şekil 3. 11 COMSOL modeli ile farklı akım değerleri için robot-mıknatıs arası mesafeye karşılık elde edilen manyetik kuvvet değerleri……50
Şekil 3. 12 Sistemde kullanılan elektromıknatısa ait bir görüntü……51
Şekil 3. 13 Sistemde kullanılan doğrusal yükseltece ait bit görüntü……..53
Şekil 3. 14 Elektromıknatısın açık kaynak kontrolü için oluşturulmuş Simulink modeli……54
Şekil 3. 15 Veri toplama kartına gönderilen kontrol komutuna karşılık akım sensöründen okunan akım değeri……55
Şekil 3. 16 Elektro mıknatısa gönderilen kontrol sinyaline karşılık, robotun lazer sensöründen okunan yüksekliğinin grafiği……56
Şekil 3. 17 Mikro robotun su haznesi içinde (a)yukarı ve (b)aşağı hareketinin mikroskop ile çekilmiş görüntüleri……57
Şekil 3. 18 Mikro robotun kontrolü için Simulink üzerinde oluşturulan PID kontrol Modeli……57

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Polipropilen Malzemesinin Teknik Değerleri……32
Çizelge 3.1 Hexapod kontrolü için kullanılan komutlar……39
Çizelge 3.2 Sistemde kullanılabilecek boyutlardaki bazı bobin tellerinin teknik Özellikleri……45
Çizelge 3.3 Sistemde kullanılan doğrusal yükseltece ait bazı teknik özellikler……52

ÖZET

MİKRO ROBOT KOLU DİZAYNI, ÜRETİMİ VE GÖRSEL GERİ BESLEME İLE TEMASSIZ MANİPÜLASYONU

Ayşe İLGİNOĞLU

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yard.Doç. Dr. Hüseyin ÜVET

Son zamanlarda kablosuz ve milimetre seviyesinden daha hassas manevra edilebilen, umut vadeden mikro ve nano cihazlar üretilmektedir. Bu cihazlar çok küçük ve kontrolsüz olduklarından akışkan sistemler içerisinde mikro objeler üzerinde işlem yapmaya olanak sağlamaktadır. Ayrıca yüksek hızlarda çalışıp, kısa zamanda pek çok işlem yükünü kaldırabilmekte ve böylece birçok alanda yararlı bir şekilde kullanılabilmektedirler. Bu alandaki potansiyel uygulamalara bakılırsa, mikro-mekanik bileşenler ile bütünleşik sistemler oluşturan ve mikro objeler üzerinde çalışan mikro-robotların kullanıldığı görülür.

Bu tez çalışmasında sağlık sektöründe sıkça kullanılan mikro robot kolların üzerine alternatif bir yöntem geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Dizayn-simülasyon, üretim ve deney düzeneği olarak 3 farklı aşaması olan bu çalışmada sonuç olarak 2 farklı deney düzeneği kurulmuş ve elde edilen sonuçları karşılaştırma imkanı bulunmuştur. Çalışmamızda literatürde ilk kez sıvıda kaldırma kuvveti ile levitasyon tekniği kullanılarak bir mikro robot kolunun hareketi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Böylece sıvı dolu bir kap içerisindeki mikro robot kolunun yüzeyle etkileşimi kesilerek sürtünme en aza indirilebilmiştir. Çalışmamda ayrıca robot kolunun çeşitli geri besleme yöntemleri ile yüksek hassasiyette hareket kontrolü araştırılmıştır. Geliştirilen ve geliştirilmekte olan geri besleme algoritmaları ile mikroakışkan-çip içeresinde tam sistem otomasyonu

sağlanması hedeflenmektedir. Mevcut kontrolcü geliştirilerek ve farklı kontrol yöntemleri kullanarak daha iyi sonuçların alınması gelecek çalışmalar arasında yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler : Mikro robotik, Manyetik levitasyon, Mikro akışkanlar, Lab on a Chip

ABSTRACT

DESIGN/IMPLEMENTATION OF A MİCRO ROBOTIC ARM AND NON-CONTACT MANIPULATION WİTH VISUAL SERVOING

Ayşe İLGİNOĞLU

Mechatronics Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Asst.Prof. Hüseyin ÜVET

Recently, promising developments on untethered micro and nano devices that can maneuver with submillimeter accuracy have been accomplished. Since these devices are very small and uncontrolled, they allow manipulation of micro objects within fluidic systems. They can also operate at high speeds and tolerate a high throughput of operations. Micro robots that constitute an integrated system with micro-mechanical components and manipulate micro objects are often utilized at the potential applications in this area.

In this study, an alternative method for the manipulation of micro robots that are used frequently in healthcare industry has been developed. As a result of this study, which is divided into the sections of design-simulation, fabrication and experimental setup, two final experimental setups are built and compared. For the first time, manipulation of micro robots by levitating the robot inside a fluidic environment is investigated. Thus, by levitating a micro robot in a fluid chamber the friction force on the micro robot is minimized. I this study, I have also investigated the high accuracy control of micro robots by means of various feedback methods. Through the constructed feedback algorithms, development of a fully automated system inside a microfluidic-chip is aimed. Obtaining better results by improving these feedback algorithms and using different control methods are among the projected future studies.

Keywords: Micro-robotics, magnetic levitation, microfluidics, lab-on-a-chip

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Son zamanlarda kablosuz ve milimetre seviyesinden daha hassas manevra edilebilen, umut vadeden mikro ve nano cihazlar üretilmektedir. Bu cihazlar çok küçük ve kontrolsüz olduklarından akışkan sistemler içerisinde mikro objeler üzerinde işlem yapmaya olanak sağlamaktadır. Ayrıca yüksek hızlarda çalışıp, kısa zamanda pek çok işlem yükünü kaldırabilmekte ve böylece birçok alanda yararlı bir şekilde kullanılabilmektedirler. Bu alandaki potansiyel uygulamalara bakılırsa, mikro-mekanik bileşenler ile bütünleşik sistemler oluştran ve mikro objeler üzerinde çalışan mikro-robotların kullanıldığı görülür. Örneğin Mikro-Opto-Elektro-Mekanik sistemler bütünleşik mekanik, optik ve elektriksel sistemleri kullanarak çok küçük ölçeklerdeki optik sinyallerle işlem yaparlar, bu yüzden de üretimleri çok hassas bir mikro bütünleşik sistem gerektirir. Endüstriyel biyoteknoloji ve tıp alanı da ayrıca mikro robot kullanımı için uygun alanlardır. Hatta mikro robotlar organik hücrelerle aynı ölçekte işlem yapmalarından hücrelerin hareket ve sıralama gibi işlemlerinde verimli çalışırlar. Bu özelliklerinden dolayı 6-10 mikrometre ölçeklerinde kan hücresi gibi tanecikler üzerinde işlem yapmak üzere lab-on-a-chip (mikroakışkan-çiplerin) sistemlere yerleştirilirler.

Mikroakışkan-çiplerin getirdiği en önemli yenilikler birçok işlemi aynı anda yapabilmeleri, hücre ayırma işlemleri ve mikrokanallarla hücrelerin sürekli tanımlanarak takip edilebilmeleridir. Ayrıca dar ve kısıtlı bir alanda hücrelerin işlenmesi ve analiz edilmesi için uygun bir ortam sağlamaktadırlar. Bu nedenle mikroakışkan çip uygulamalarının hücreler üzerinde analiz, değerlendirme, çoğaltma gibi işlemlerde

kullanımı çok yaygınlaşmıştır. Mikroakışkan çiplerde çok sayıda hücre üzerinde işlemler yapılırken, sıvı kuvveti ,elektroforez kuvveti(Eriyik içinde dağılmış iyonların elektrik akımı etkisiyle, pozitif veya negatif kutba doğru hareketi) , ve yüzey akustik dalgaları gibi birçok kuvvet kullanılmıştır. Ancak bu teknikler tek hücreyi doğru manipüle etmek için çoğu zaman uygun olmazlar. Çünkü tek hücre üzerinde işlem yapmak için uygun kuvvetler üretemedikleri gibi kontrolü zordur veya hücreye zarar verebilecek etkileri mevcuttur.

Hücre manipülasyonu ve sağlık alanında sıkça kullanılan bir diğer sistem ise, yüksek hassasiyetle işlem yapma, yüksek güç sağlama ve hücre işlemleri sırasındaki esnek yapıları ile mikro mekanik araçlardır. Bu araçlar, hücreleri kavrama, kesme vb. hücre manipülasyonundaki mekanik işlemlerde net sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte bu araçlar yüksek hacimlerinden dolayı açık havada çalışmaktadır ve hücre manipülasyonu sırasında, hücreler bir pipet vs. yardımıyla teker teker alınacağı için, mikro akışkan çipin aksine, her bir hücre için mikroskobun ve aracın yer değiştirmesi gerekmektedir. Bu durum, mikro mekanik araçların hücre manipülasyonundaki kullanımını sınırlandırmaktadır.

Mikro-robotlar hem mikro akışkan cihazların hem de mikro mekanik manipülatörlerin avantajlarını kapsamaktadırlar. Mikro-robotlar mikroakışkan-çipe yerleştirilir ve temassız güç kaynaklarıyla yönlendirilir. Böylece mikro-robotlar ele alınan hücreyi, mikroskop altında, mikro mekanik manipülatör gibi işler. Mikro robotun hacmi de yeterince küçüktür ve mikro akışkan çipin kapalı bir alan olması dolayısıyla ortam koşulları hücre manipülasyonuna gayet uygundur. Buna ek olarak mikro akışkan çip içindeki kanallar sayesinde hücreleri arka arkaya işleme becerisine sahip olacaktır. Mikroakışkan-çipler, iş akış kontrol avantajıyla birlikte, hücreler üzerinde doğru ve güçlü mekanik işlemler gerçekleştirme konusunda etkin bir yere sahiptir. Ancak mikro-robotlar hücre işlemleri, düşük konumlama hassasiyeti, düşük çıkış kuvveti ve düşük işlem hızı dolayısıyla sadece tek hücrelerle sınırlandırılmıştır. Örneğin yumurta hücresinin çekirdeğini ayırma işlemi sırasında birkaç yüz mikro-Newtonluk bir kuvvet gerekmesine rağmen birçok on-çip robot bu kuvveti sağlayacak güçte değildir. Buna ek olarak işlem hızı sensörlerle karşılaştırıldığında istenilen seviyenin çok altında kalmaktadır. Birçok sensör saniyede binlerce hücre ya da partikülü mikroçip içerisinden

kolayca bulabilmektedir. Bundan dolayı daha yaygın işlemler için işlem hızını artırmak gerekmektedir.

Mikro-robotik uygulamalara en başarılı araçlardan biri olan optik cımbızlar, bir lazer yardımıyla nanometre ölçeklerindeki hücreler üzerinde işlem yapabilseler de çıkış güçleri piko-Newton düzeylerinde kalır ve üzerinde işlem yapılacak nesneler azalır. Manyetik alan bu alanda kullanılabilecek bir başka güç kaynağı olsa da onun da çıkış gücü mikro-Newtonlar düzeyinde olduğu için birçok uygulamada başarısız olabilir. Sistemin doğru çalışması ve yaygın kullanımı için yüksek hassasiyet, yüksek hız ve yeterli güç öğeleri gerekli ve önemlidir. Sabit bir mıknatısla kullanılan MMT(Magnetically Driven Microtool) sağladığı mili-Newtonlar düzeyindeki kuvvetle hücreler üzerindeki kesme, yer değiştirme vs. işlemlerde geniş alanlarda kullanılabilir. Bir çalışmada bahsedilen MMT yapısında sürtünmenin azalması için cam yüzeye ultrasonik titreşim uygulanmıştır. Sonuç olarak 1.1 mikrometre hassasiyetinde konumlama ve birkaç mili-Newton düzeyinde kuvvet elde edilmiştir. Ancak ultrasonik titreşimle sürtünme azaltma MMT'nin vektörel hızına bağlıdır ve bu hız 5 Hz üzerine çıktığında mıknatısla MMT arasındaki konum farkı 150 mikrometreyi aşmaktadır. Buda yüksek hızda manipülasyon gerektiren işlemler için büyük bir dezavantaj oluşturmaktır.

Son çalışmalarda düşük sürtünme ile yüksek çıkış gücü, yüksek konumlama hassasiyeti ve yüksek hız için nikel(Ni) ve silikon(Si) kullanılarak yeni bir robot-kolu tasarlanmıştır. Bu çalışma sıvı sürtünmesini azaltmak için platform yüzeyi silikondan yapılmış ve alt kısmı arka arkaya 'V' şekilleriyle tasarlanmış yani V-groove (V-olukları) kazılmıştır. Hareket eden kısımlar ise sabit mıknatıstan daha fazla kuvvet alsın diye nikelden yapılmıştır. Robot kolunun düzgün hareket etmesi için bir piezoelektrik seramik ile ultrasonik titreşimler verilir. Normalde hareketin hızlanmasıyla hassasiyetin düşmesi beklenirken, mikro-robot kolunun yüzeyinin yapısı yüksek hızlarda da sıvı titreşimini azaltarak yüksek hassasiyette çalışmasına izin vereceği bulunmuştur. Bu çalışmada görüleceği gibi hareket hassasiyeti artırmak için mutlaka ultrasonik titreşime ihtiyaç duymaktadır. Bu titreşimin aynı zamanda etkileşime girilecek mikro-objeyi de hareket ettireceği açıktır. Buda düşük boyutta mikro-objelerin manipülasyonunu zorlaştırabilecek hatta boyutlar ufaldıkça imkânsızlaştırabilecektir.

1.2 Tezin Amacı

Tez çalışmasının amacı sağlık sektöründe sıkça kullanılan mikro-robot kollarının üzerine alternatif bir yöntem bir geliştirmektir. Üretimi hedeflenen mikro-robot kolu manyetik alan etkisi altında çalışabilecek, temassız olarak hareket ettirilebilecek ve bu sayede lab-on-a-chip (mikroakışkan kanallara ve odalara sahip mikro-çipler) içine yerleştirilebilmesine olanak sağlayacak şekilde dizayn edilmilştir. Literatürde ilk kez sıvıda kaldırma kuvveti ile levitasyon tekniği kullanılarak bir mikro-robot kolunun hareketi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Böylece mikroakışkan-çip içinde mikro-robot kolunun yüzeyle etkileşimi kesilerek sürtünme en aza indirilebilmiştir. Bu şekilde gelecekte tıp ve biyomedikal alanlarında yoğun olarak çalışılan tek hücre operasyonları (hücre-klonlama, yapay-dölleme, yapay-deri) veya tek hücreleri analizleri (kanser, anemi) gibi çalışmalar için inovatif çözümler geliştirebilecek bir mikro-robot kolu üretilebileceği amaçlanmaktadır. Bu çalışmada ayrıca robot kolunun çeşitli geri besleme yöntemleri ile yüksek hassasiyette hareket kontrolü araştırılmıştır. Geliştirilen ve geliştirilmekte olan geri besleme algoritmaları ile mikroakışkan-çip içeresinde tam sistem otomasyonu sağlanması hedeflenmektedir.

1.3 Hipotez

Tez çalışmasının özgün değeri mikro-robotik uygulamalarının olumlu, insanlığa ve insan sağlığına faydalı bir şekilde kullanımının araştırılmasıdır. Tez çalışmasında nihai olarak mikro-robot kolunun Lab-on-a-chip sistemler için literatürde ilk defa manyetik alanda, buoyant kuvvetinin etkisini kullanılarak hareket ettirilmesi amaçlanmıştır. Mikro-robot kolu buoyant kuvveti ile sıvı içinde sağlayacağı levitasyon sayesinde havada tutularak sürtünmenin azaltılması ve bu sayede yüksek hassasiyette hareket elde edilmesi hedeflenmektedir. Şu anda Lab-on-a-chip sistemlerde yapay dölleme, hücre klonlama ve sağlıklı doku kültürü oluşturmada en önemli darboğazlardan biri mikro-robotların bu sistemlere entegrasyonunda yaşanan problemlerdir. Bu amaçla sıvı içerisinde askıda kalması sağlanan mikro-robotun 2 farklı deney düzeneği ile manipüle edilmesi sağlanmış ve elde edilen sonuçlar ışığında kıyaslamalar yapılmıştır.

BÖLÜM 2

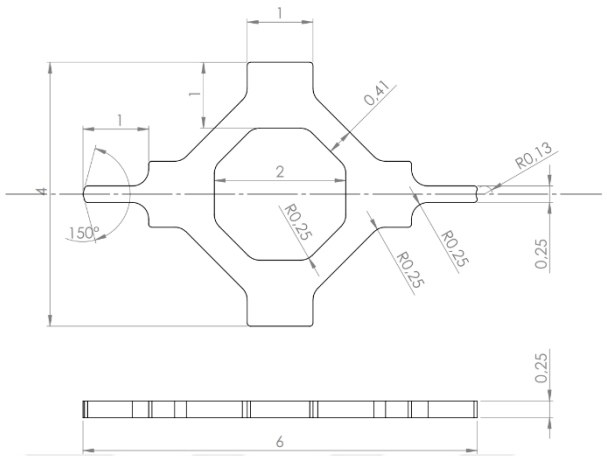
MİKRO ROBOT KOLU DİZAYNI, SİMÜLASYONU VE ÜRETİMİ

2.1 Mikro Robot Kolu Tasarımı

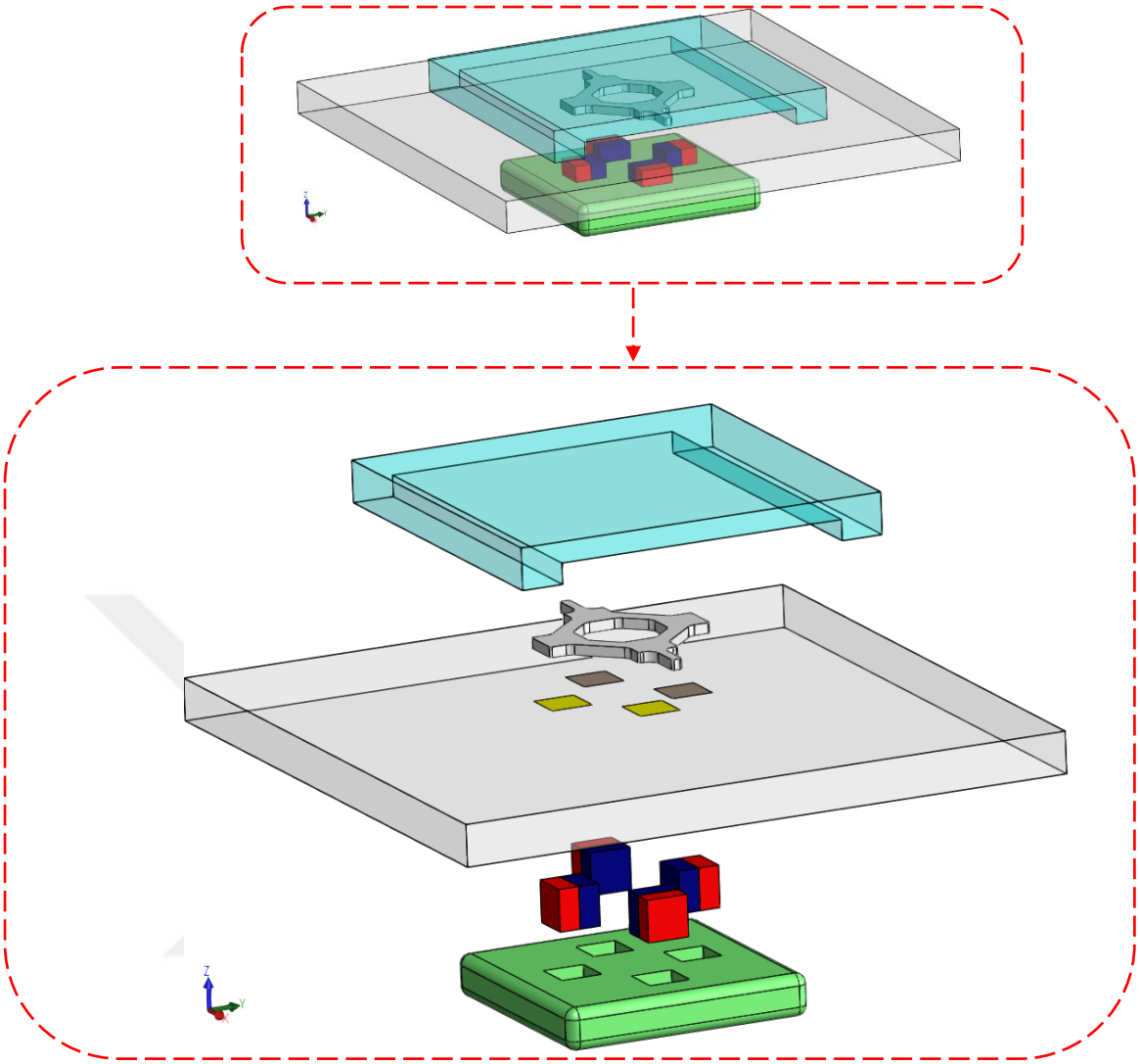
Bu başlık altında üretilen mikro-robot kolunun tasarımı açıklanacaktır. 100 µm boyutuna kadar hücreleri veya partikülleri manipüle edecek mikro robot kolu şu şekilde tasarlanmıştır :

Manipüle edilecek olan cismin partikül çapının 100 µm olduğu göz önünde bulundurularak mikro-robot kolunun kalınlığı Şekil 2.1' de görüldüğü üzere 250 µm' dir. Bunun sebebi ilerleyen bölümlerde görüleceği üzere batan hacmi artırarak kaldırma kuvvetinden maksimum düzeyde yararlanılmak istenilmesidir. Partiküllerin manipülasyonunu sağlayacak olan mikro-robot kolunun uç genişliği 250 µm, uzunluğu ise 1mm' dir. Tasarlanan mikro robot kolunun boyutlarına göre; mikro-robot kolunun içinde bulunduğu mikro-akışkan kanalın yüksekliği 500µm olmaktadır. Bu sayede 250 µm kalınlığındaki mikro-robot kolunun mikro akışkan kanalın alt ve üst duvarlarına değmemesi için yeterli alan sağlanmıştır. Gerektiğinde petri kabı içinde de kullanılabilecek bir mikro-robot kolu sistemi tasarlanmıştır. Sıvı içindeki mikro-robot kolunun 3 eksende kontrolünü yapabilmek için 4 adet mıknatıs kullanılmıştır. 4 mıknatıs kullanılmasının sebebi maksimum denge ve hassas yönelimi sağlayarak mikro-robot kolunu hareket ettirmektir ve önerilen yapı ile en iyi şekilde gerçekleştirilebilir. Piyasada rahat bulunabilen 1 mm^3 boyutlarında sabit mıknatıslar kullanılmıştır. Manyetik analizlerin yapıldığı bolümde görüleceği üzere; mikro-robot kolunu hareket

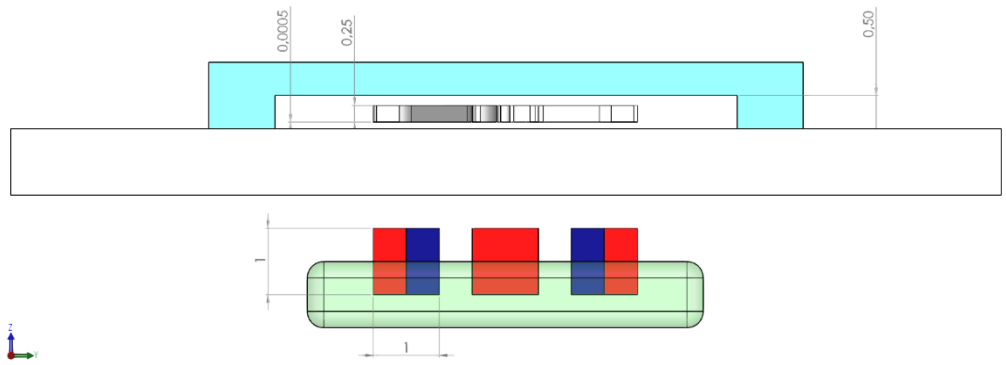
ettirecek gerekli manyetik kuvvet 1 mm^3 sabit mıknatıslarla sağlanabilmektedir. Bu sebepten dolayı tasarımda mikro-robot kolu üzerinde 1x1 mm' lik nikel kaplanacak bir birinden ayrık ayaklar (kare bölgeler) yer almaktadır. Tasarım sonucunda 4x6 mm en ve boyunda bir mikro robot kolu üretilmiştir.



Şekil 2. 1 Mikro robot kolu teknik resmi



Şekil 2. 2 Mikro robot kolu sistemini oluşturan parçalar



Şekil 2. 3 Mikro robot kolu sistemi önden görünümü. Şekildeki tüm birimler mm'dir.

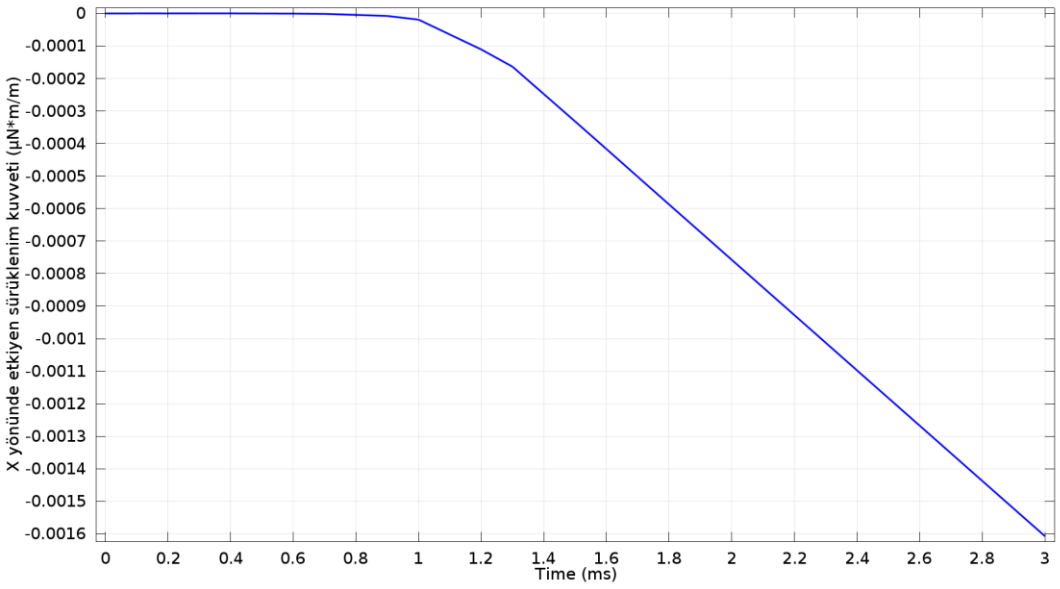
2.2 Mikro Robot Kolu Simülasyonları

2.2.1 100 µm Çapındaki Polistiren Küreye Etki Eden Sürüklenim Kuvvetinin Analizi

Tez çalışmasında 100 µm ve altı partikülleri mikro-robot kolu ile manipüle etmek istenmektedir. Bu partiküllerin sıvı içindeki sürüklenim (drag) kuvvetini yenmesi için mikro-robot kolunun sahip olması gereken kuvvetin tayini üzerine çalışılmıştır. Bu durumun simülasyonu şu şekilde gerçeklemiştirilmiştir; 3 milisaniyelik bir simülasyon içerisinde polistiren küreye 1 µN kuvvet uygulanmıştır. Bu kuvvetin etkisiyle sıvının(saf suyun) içinde bulunan polistiren kürenin üzerinde sürüklenim kuvvetinin etkisiyle hareket edip etmeyeceği gözlemlenmiştir.

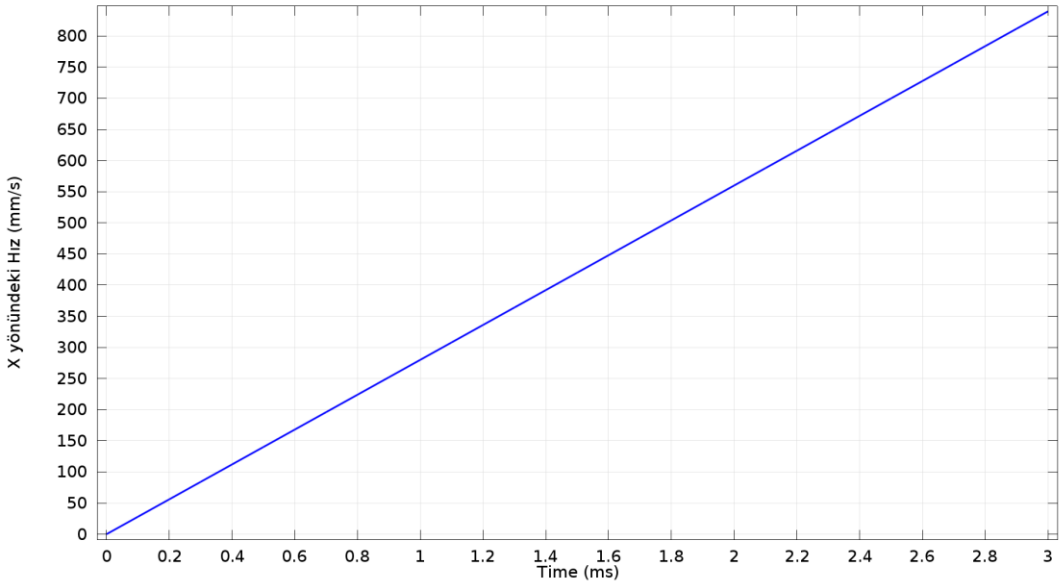
Şekil 2.1 Robot kolunun bulunduğu mikro-akışkan çip içerisinde bulunan polistiren küre ve mavi akış çizgileri olarak belirtilen 10^{-12} m/s hızında laminar akış ortamı görülmektedir. Polistiren küreye 3 ms boyunca 1 µN değerinde bir kuvvet uygulanacaktır.

Polistiren' e 1µN değerinde uygulanan kuvvet sonucunda meydana gelen sürüklenim kuvvetinin grafiği Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2. 4 Polistiren küreye 3 ms boyunca uygulanan 1 µN 'luk kuvvet sonucu etkiyen sürüklenim kuvveti grafiğidir. Grafikten de görüldüğü üzere sürüklenim kuvveti değeri, polistiren küreye uygulanan 1 µN'luk kuvvet değerinin 1000 kat altındadır.

Ayrıca polystrene kürenin hızı uygulanan kuvvet doğrultusunda artmaktadır. Bunun sebebi kürenin sabit 1 µN değerindeki kuvvet ile sabit bir ivmeye sahip olmasıdır. Bir diğer önemli husus ise sürüklenim kuvvetinin kürenin hızı ile orantılı olarak artmasıdır.



Şekil 2. 5 Polistiren kürenin hızı uygulanan kuvvet doğrultusunda artmaktadır. Bunun sebebi kürenin sabit 1 µN değerindeki kuvvet ile sabit bir ivmeye sahip olmasıdır.

Sonuç olarak; 100 mikron çapındaki polistiren kürenin, uygulanan 1 uN kuvvet doğrultusunda sıvı içerisinde rahatlıkla hareket ettiği gözlemlenmiştir. Robot koluna x ekseni doğrultusunda etkiyecek olan manyetik kuvvetin, robot kolunu ve polistiren küreyi hareket ettirmeye yetecek bir kuvvet olduğu görülmüştür.

2.2.2 Manyetik Kuvvetlerin Mikro Robot Kol Sistemine Etkisinin Analizi

Bu bölümde mikro-robot koluna temas edilmeksizin, mikro-robot kolunu hareket ettirecek manyetik kuvvetler üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmanın temel amacı; manyetik kuvvet etkisiyle mikro robot kolunu mikro akışkan kanal içerisinde yüzdürmektir. Mikro akışkan kanal içerisindeki mikro robot koluna etki eden sıvının kaldırma kuvveti manyetik kuvvetler ile dengelenerek mikro robot kolunun sıvı içerisinde askıda kalması sağlanmaktadır. Bunu sağlamak için mikro robot kolu malzemesi, içerisinde bulunduğu sıvının yoğunluğundan düşük olacak bir polimerden seçilmiştir. Elde edilen dikey (z ekseninde) kuvvet ile mikro-robot kolu mikro-akışkan kanal içindeki sıvıda yüzebilecek, yatay(x veya y ekseninde) kuvvet sayesindeyse 100 µm ve altıdaki objeleri manipüle

edilebilecektir. Manyetik kuvvetleri en verimli şekilde kullanmak için mıknatısların yönü belirlenecektir. Bu kapsamda mıknatıslar farklı konumlarda yerleştirilerek analizle yapılmıştır. Bu bölümde yapılan analizlerde; sabit mıknatısların, manyetik geçirgenliği μ_0 olan bir ferromanyetik malzeme üzerinde meydana getirdiği kuvvet Maxwell denklemlerinin iki çifti kullanılır.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = \mathbf{0} \tag{2.1}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \tag{2.2}$$

Manyetik akı yoğunluğu (B) için : (Manyetik alan şiddeti **H**)

$$\vec{B} = \mu_0\left(\vec{H} + \vec{M}\right) = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} + \mu_0 \cdot \overrightarrow{M_p} \tag{2.3}$$

İntegral formu :

$$\oint_S \boldsymbol{B} \cdot d_s = 0 \tag{2.4}$$

$$\oint_C \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{I} = I \tag{2.5}$$

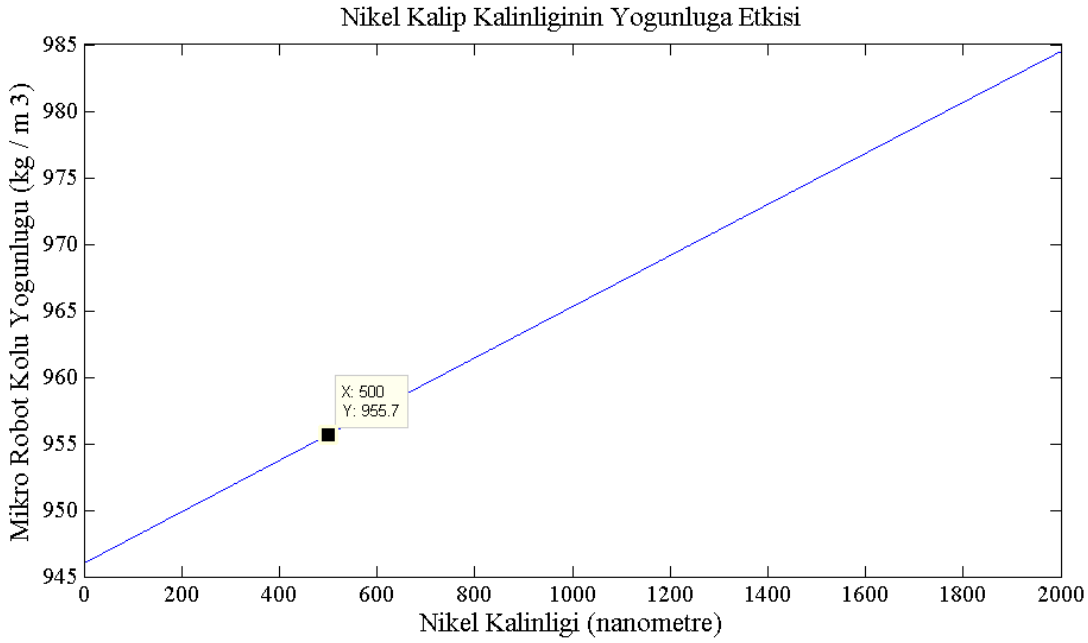
Bir q yüküne etki eden kuvvet ise aşağıdaki formül ile bulunur;

$$F_m = q\mathbf{u} \times \mathbf{B} \tag{2.6}$$

Manyetik kuvvetlerin mikro robot kol sistemine etkisinin analizi için Ansys sonlu elemanlar programının Maxwell modülü kullanılmıştır.

Mikro-robot koluna temas edilmeksizin mikro-robot kolunu hareket ettirecek manyetik kuvveti en verimli şekilde kullanmak için, çalışmalara sabit mıknatısların konumlandırılmasını belirmekle başlanıldı.

Nikel kaplamanın kalınlığı Şekil 2.6’dan yola çıkılarak 500 nm kabul edildi.



Şekil 2. 6 Bu grafik 250 µm kalınlığındaki polipropilenden üretiken robot gövdesinin hacmine ve yoğunluğuna bağlı olarak mikro robot kolunun 1x1 mm'lik ayaklarına nikelin kaplama kalınlığını veren grafiktir. Mıknatısların yönünün tayini için simülasyonlarda 500 nm kaplama kalınlığı kullanılmıştır.

Mıknatısların konumunun belirlenmesinde 3 farklı durum için analiz yapılmıştır.

- Mikro robot kolunun yüzmesi (mikro akışkan kanal içinde) için mıknatısları z ekseninde (dikey) mikro robot kolundan -1,5 mm'den -7 mm uzaklığa götürerek
- Mikro robot kolunu yatayda hareket ettirebilmek için; mikro-robot kolundan z ekseninde -3 mm uzaklığa sabitlenen mıknatısları, y-ekseninde -2 mm den +2 mm götürerek
- Mikro robot kolunun dönme hareketini görmek için; mikro-robot kolundan z ekseninde -3 mm uzaklığa sabitlenen mıknatısları 90° döndürerek.

Bu sayede mıknatıslar farklı şekillerde konumlandırılmış ve aralarında karşılaştırma yapılarak ideal konum tespit edilmiştir.

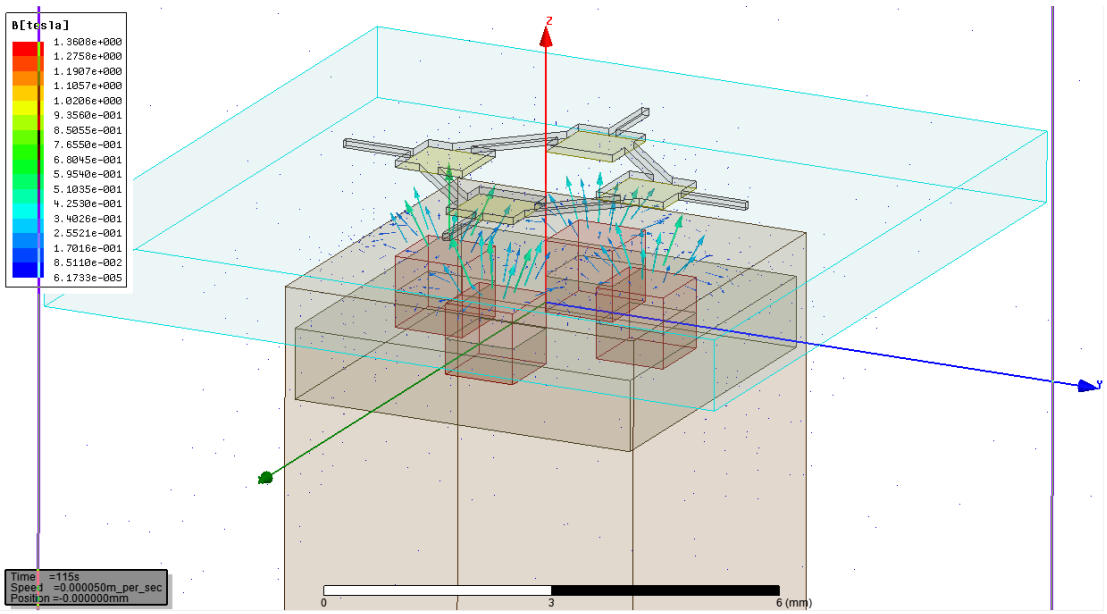
2.2.2.1 Mıknatısların Kuzey Kutuplarının +Z Yönünde Olma Durumu

Bu bölümde robotik sistemi hareket ettirecek sabit mıknatısların kuzey kutupları z ekseninde pozitif yönde iken analiz yapılmıştır. Kuvvet ve tork grafikleri elde edilmiştir.

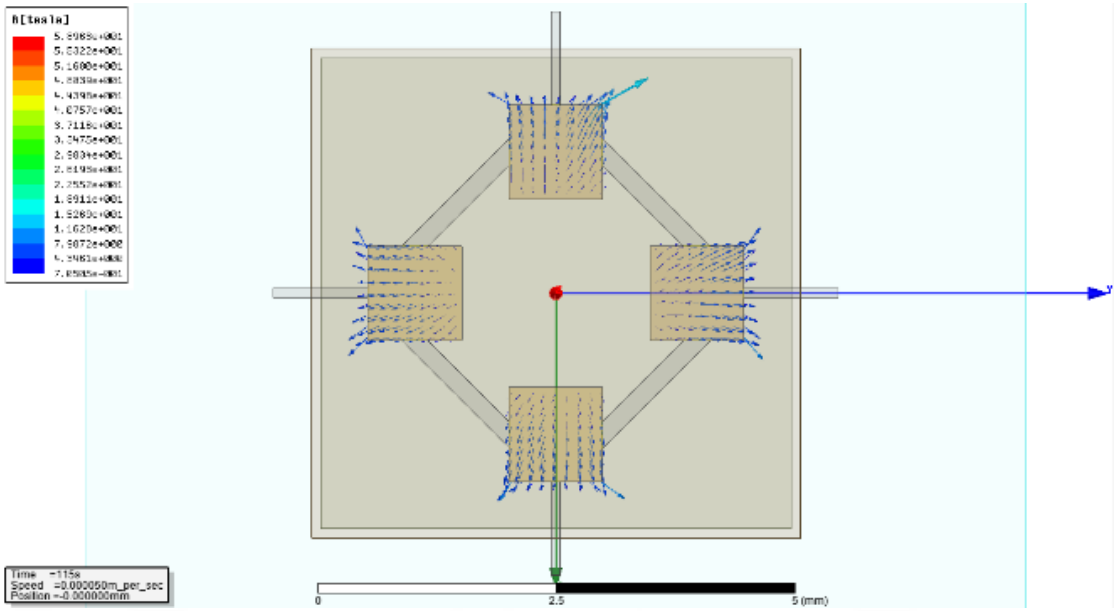
Sonuç kısmında daha sonraki bölümlerde (farklı konumlarda yerleştirilen mıknatıslar) elde edilen grafiklerle karşılaştırmalar yapılmıştır.

a. Z Ekseninde Mıknatısların Dikey Hareketinin Mikro Robot Koluna Etkisi

Bu bölümde mıknatıslar z ekseninde, nikel kaplamaya göre, -1,5 mm den -7 mm uzaklığa götürülürken kuvvette ve torktaki değişimler gözlemlenmiştir. Şekil 2.2 (üst) da mıknatısların kuzey kutbundan çıkan manyetik alan çizgileri, Şekil 2.2(alt) de ise nikel plakalardan geçen manyetik alan çizgileri görülmektedir.



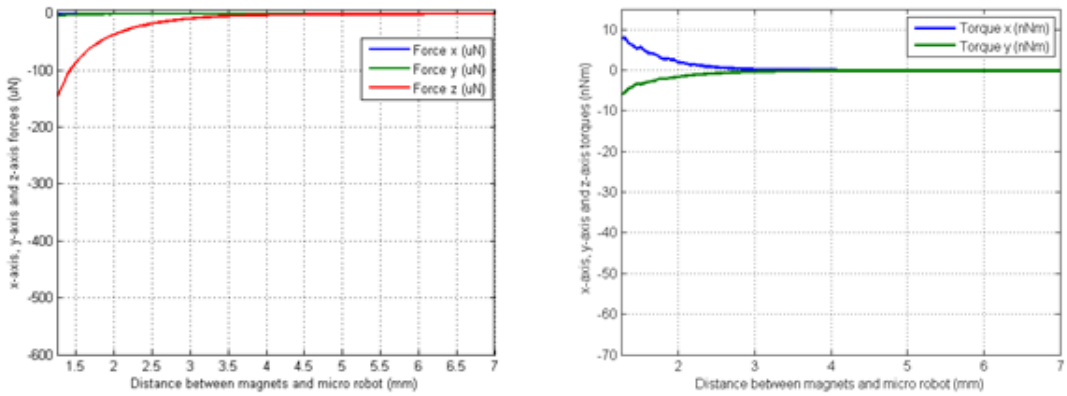
Şekil 2. 7 Mıknatısların manyetik alan çizgileri



Şekil 2. 8 Nikel kaplamalar üzerinden gecen manyetik alan çizgileri

Mikro robot kolunu aşağıya çekecek (mikro-akışkan kanaldaki sıvı içinde) –z yönündeki manyetik kuvvetin grafiği aşağıda Grafik 2.4'de verilmiştir. Karşılaştırmalı y

orumlar sonuç bölümünde yer almaktadır.



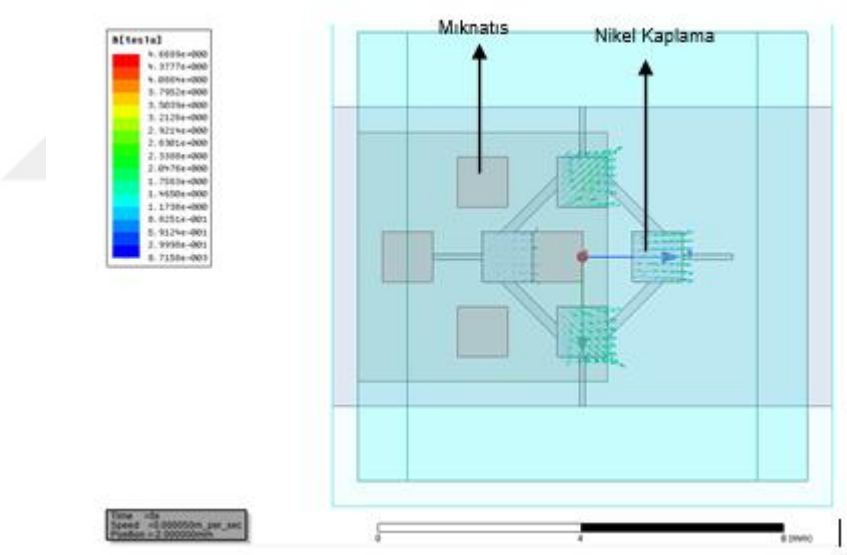
Şekil 2. 9 Nikel kaplama ile mıknatıslar arasındaki mesafenin değişimine bağlı kuvvet ve tork grafikleri

Şekil 2.9'da görüldüğü üzere mıknatısların kuzey kutuplarının +y yönünde olduğu konumdayken z ekseninde hareketinin sonucunda maksimum -147 uN kuvvet ve nNm mertebelerinde tork elde edildiği gözlemlenmiştir.

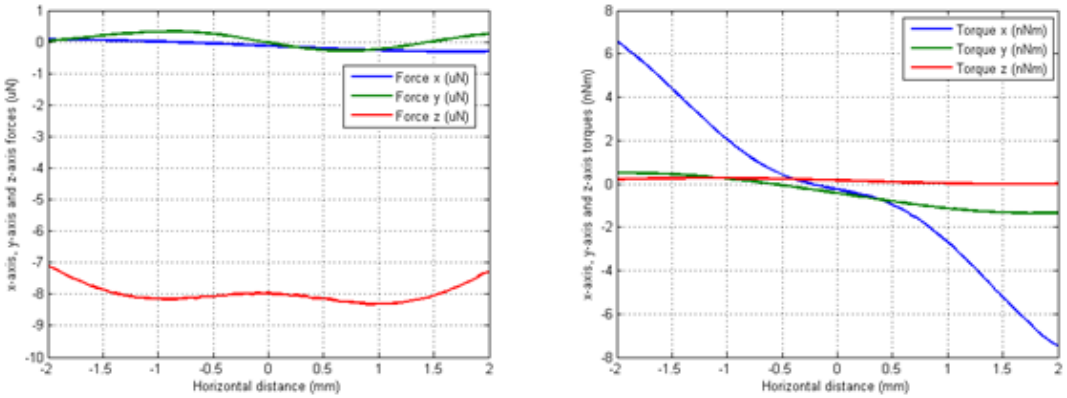
b. Z ekseninde Sabit Bir Noktada Konumlandırılan Mıknatısların Y ekseninde Hareketinin Mikro Robot Koluna Etkisi

Bu kısımda z ekseninde sabit bir noktada konumlandırılmış mıknatısların y eksenindeki yatay hareketinin nikel kaplamalara (dolayısıyla mikro robot koluna) etkisi gözlemlenmiştir. Mıknatıslar nikel kaplamalardan z ekseninde -3 mm uzaklığa sabitlenmiştir. Y eksenine göre, -2 mm konumundan +2 mm konumuna götürülürken kuvvette ve torktaki değişimler gözlemlenmiştir.

Şekil 2.4'de mıknatıslar mikro-robot koluna göre z ekseninde -3 mm, y ekseninde -2 mm uzaklıktayken 500 nm kalınlığındaki nikel kaplama üzerinde oluşan manyetik alan çizgileri görülmektedir. Mıknatıslar yatayda mikro robot kolundan yaklaşık 1 mm uzaklaştığı anda ise sistem maksimum kuvvet değerine ulaşmaktadır. Mikro robot koluna 0,3291 µN kuvvet uygulayabilecek duruma gelmektedir.



Şekil 2. 10 Mıknatıslar mikro-robot koluna göre z-ekseninde -3 mm, y-ekseninde -2 mm uzaklıktayken 500 nm nikel kaplama üzerindeki manyetik alan çizgileri

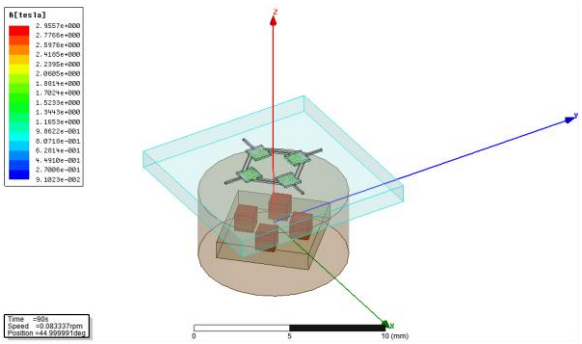


Şekil 2. 11 500 nm kaplama nikellerden z-ekseninde 3 mm uzaklıktaki mıknatısların; y-ekseninde -2 mm' den 2 mm'ye hareketi sonucunda mikro robot koluna etki eden kuvvet ve tork grafikleri

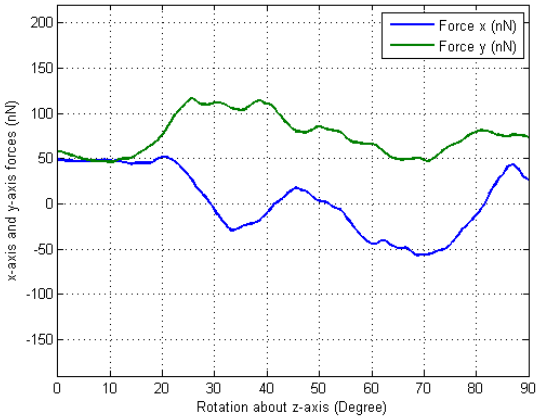
Şekil 2.10'da görüldüğü üzere mıknatısların kuzey kutuplarının +y yönünde olduğu konumdayken; y-ekseninde hareketinin sonucunda maksimum birkaç yüz nN mertebelerinde kuvvet ve nNm mertebelerinde düzensiz tork değerleri gözlemlenmiştir. Sıfır noktasındaki y yönündeki torkun kayma nedenin kuplaj etkisinden ortaya çıktığı sanılmaktadır.

c. Z ekseni etrafında Mıknatısların 90° Dönme Hareketinin Mikro Robot Koluna Etkisi

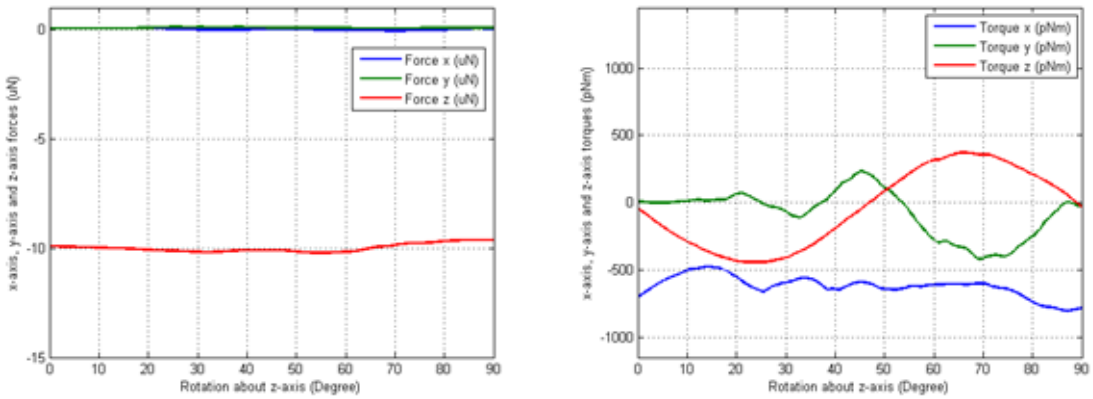
Burada ise mıknatıslar, mikro robot kolundan z ekseninde yine -3 mm uzaklığa yerleştirilmiştir. Mıknatısların z ekseni etrafında 90° döndürülmesinin nikel kaplamalara dolayısıyla mikro robot koluna etkisi gözlemlenmiştir. Şekil 3-4' te z eksenine göre -3 mm konumunda bulunan mıknatıslar yz-düzlemine 45° açı yaparken 500 nm kalınlığındaki nikel kaplama üzerinde oluşan manyetik alan çizgileri görülmektedir.



Şekil 2. 12 Mıknatısların z ekseninde mikro robot kolundan 3 mm uzağa sabitlenmiş ve z eksenine göre 45 derece dönmüş konumundaki görüntüsü



Şekil 2. 13 90 derece dönme esnasında x ve y eksenleri yönünde oluşan kuvvetler



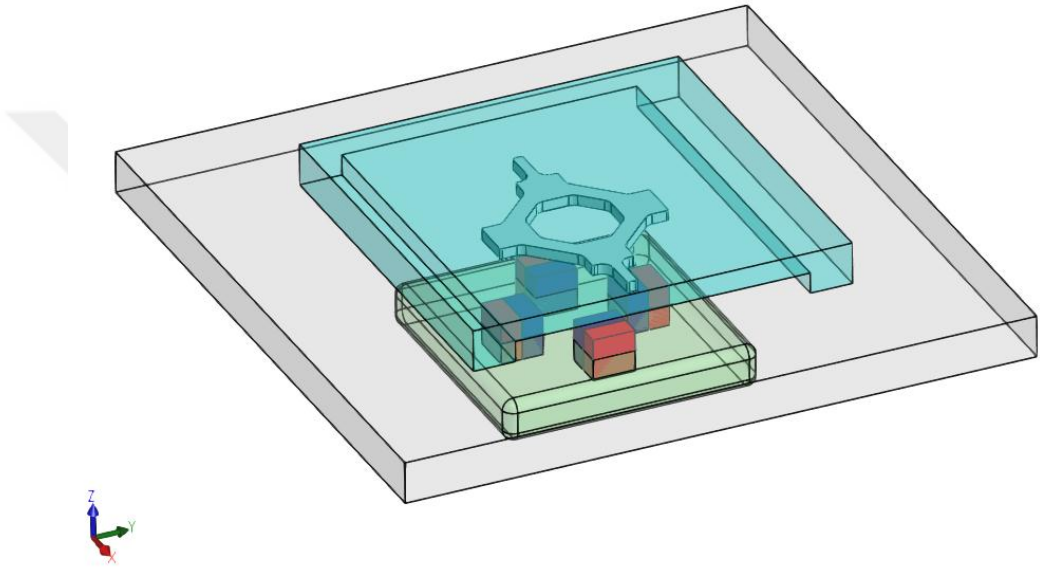
Şekil 2. 14 500 nm kaplama nikellerden z-ekseninde 3 mm uzaklıktaki mıknatısların z-ekseninde 90° hareketi sonucunda mikro robot koluna etki eden kuvvet ve tork grafikleri

Şekil 2.14'de görüldüğü üzere mıknatısların kuzey kutuplarının +y yönünde olduğu konumdayken dönme hareketinin sonucunda nN mertebelerinde sistemi döndürecek düzensiz bir kuvvet eğrisi ve z ekseni etrafında dönme sağlayacak pNm mertebelerinde

tork eğrisi gözlemlenmiştir. x ve y eksenlerinde ise düzensiz tork eğrileri gözlemlenmiştir.

2.2.2.2 Mıknatısların Kuzey Kutuplarının Merkezden Dışa Doğru Olma Durumu

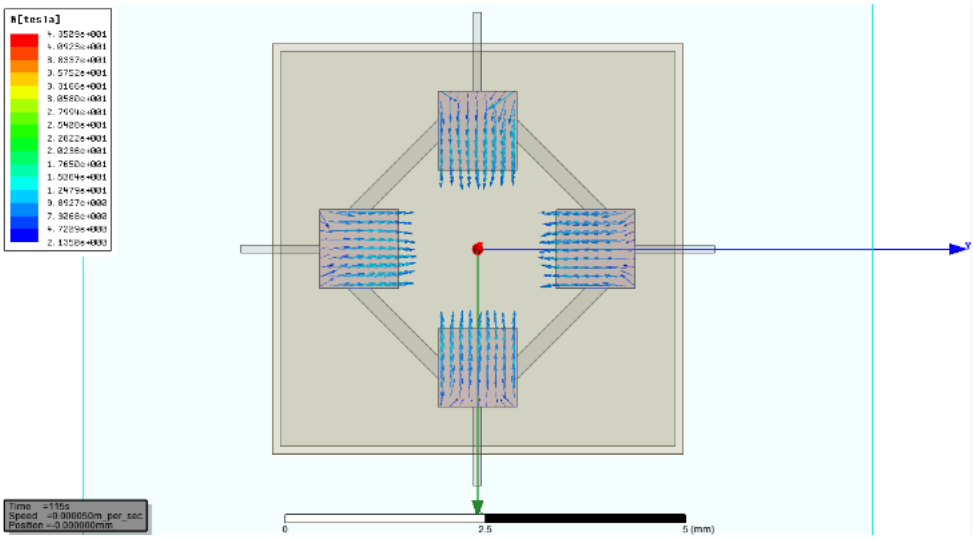
Bu bölümde; robotik sistemi hareket ettirecek sabit mıknatısların kuzey kutuplarının yönü sistemin merkezinden dışarı doğru yöndeyken sonuçlar incelenmiştir. (Sekil 2.6) Kuvvet ve tork grafikleri elde edilmiştir. Konumlandırmanın belirlendiği bölümün sonuç kısmında bu grafikler; diğer durumlarda elde edilen grafiklerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 2. 15 Mıknatısların kırmızı ile gösterilen kuzey kutupları merkezden dışarı olacak şekilde yerleştirilmiştir.

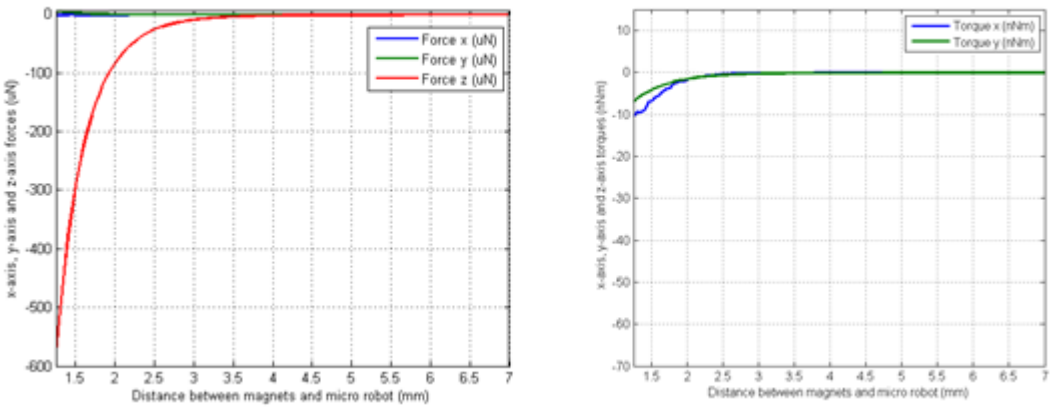
a. Dışa Bakan Mıknatısların Dikey Hareketinin Mikro Robot Koluna Etkisi

Burada mıknatıslar x ve y-eksenlerinde, nikel kaplamaya göre, -1,5 mm den -7 mm uzaklığa götürülürken kuvvette ve troktaki değişimler gözlemlenmiştir. Sekil 2.7'de mıknatısların nasıl yerleştirildiği ve nikel plakalardan geçen manyetik alan çizgileri görülmektedir.



Şekil 2. 16 Mıknatısların kırmızı ile gösterilen kuzey kutupları merkezden dışarı olacak şekildeki gibi yerleştirilmiştir. Bu durumda mıknatısların 500 nm kalınlığındaki nikel kaplamalarda oluşturduğu manyetik alan çizgileri b' de görülmektedir.

Mikro akışkan kanaldaki sıvı içinde bulunan mikro robot kolunu aşağıya çekecek kuvvet olan–z yönündeki kuvvetin grafiği aşağıda Şekil 2.17'de verilmiştir. Grafiklerde de görüldüğü üzere bu konumdaki mıknatısların, kutupları z-eksenine bakacak şekilde konulduğu durumdan daha etkin bir sonuç alındığı görülmektedir.



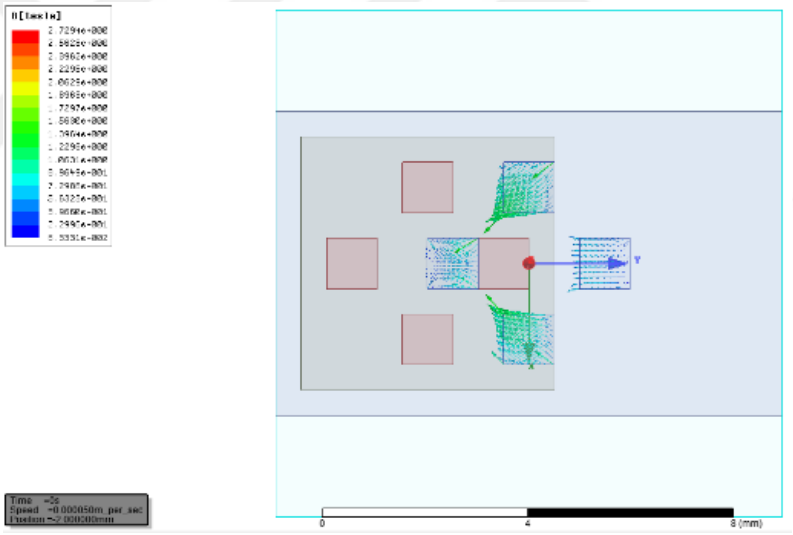
Şekil 2. 17 Nikel kaplama ile mıknatıslar arasındaki mesafenin değişimine bağlı kuvvet ve tork grafiği

Şekil 2.17'de görüldüğü üzere mıknatısların kuzey kutuplarının merkezden dışarı bakarken; z-ekseninde hareketinin sonucunda maksimum -568 µN kuvvet ve nNm mertebelerinde tork elde edildiği gözlemlenmiştir.

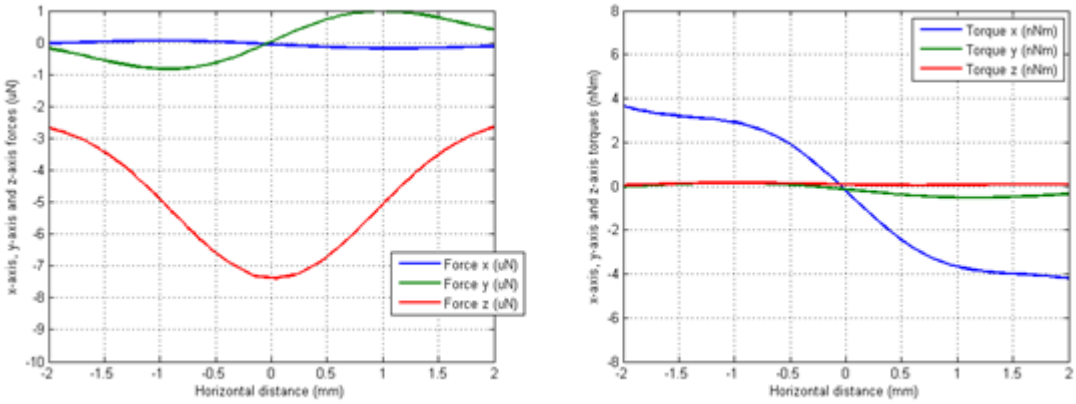
b. Y Ekseninde Mıknatısların Yatay Hareketinin Mikro Robot Koluna Etkisi

Burada mıknatısların y-eksenindeki yatay hareketinin nikel kaplamalara yani mikro robot koluna etkisi gözlemlenmiştir. Z- ekseninde nikel kaplamalardan 3 mm uzaklığa yerleştirilen mıknatıslar y-eksenine göre, -2 mm den 2 mm uzaklığa götürülürken kuvvette ve troktaki değişimler gözlemlenmiştir. Sekil 2.8'de mıknatıslar nikel kaplamaya göre z-ekseninde -3 mm, y-ekseninde -2 mm uzaklıktayken 500 nm nikel kaplama üzerinde oluşan manyetik alan çizgileri görülmektedir.

Mıknatıslar yatayda mikro robot kolundan yaklaşık 1 mm uzaklaştığında maksimum kuvvet değerine ulaşıyor ve mikro robot koluna 0,83 µN kuvvet uygulayabiliyor. Bununla beraber mıknatıslar mikro robot kolundan yatayda uzaklaştıkça dikeydeki kuvvete olması gereken azalmada simülasyon sonuçlarında görülmüştür.



Şekil 2. 18 Mıknatıslar nikel kaplamaya göre z-ekseninde -3 mm, y-ekseninde -2 mm uzaklıktayken 500 nm nikel kaplama üzerindeki manyetik alan çizgileri

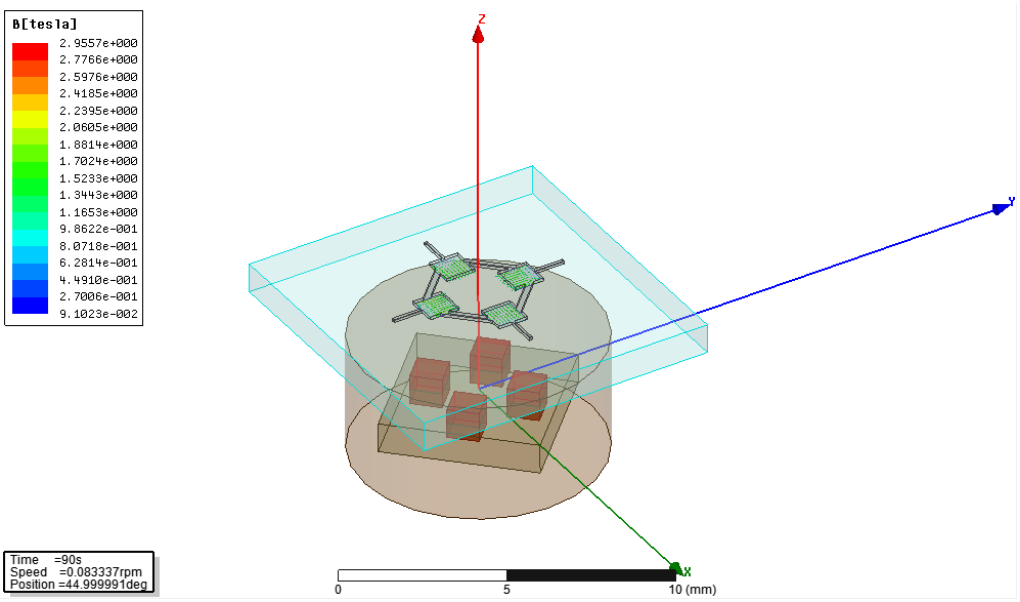


Şekil 2. 19 500 nm kaplama nikellerden z-ekseninde 3 mm uzaklıktaki mıknatısların y-ekseninde -2 mm' den 2 mm'ye hareketi sonucunda mikro robot koluna etki eden kuvvet ve tork grafikleri

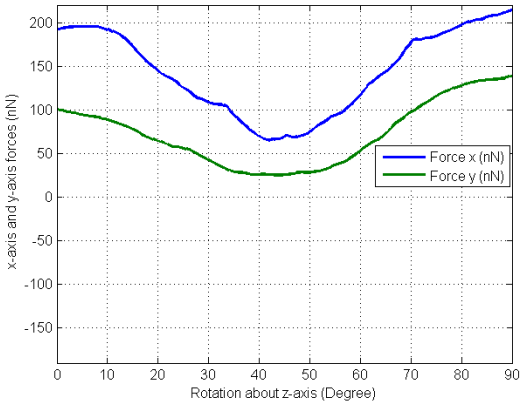
Şekil 2.19'da görüldüğü üzere mıknatısların kuzey kutuplarının merkezden dışarı yönde olduğu konumdayken; y ekseninde hareketinin sonucunda, mikro robot kolundan 1 mm uzakliga erişildiğinde, yaklasik 1 µN kuvvet değeri ve nNm mertebelerinde daha düzenli tork değerleri gözlemlenmiştir.

c. Z Ekseni Etrafında Mıknatısların 90° Dönme Hareketinin Mikro Robot Koluna Etkisi

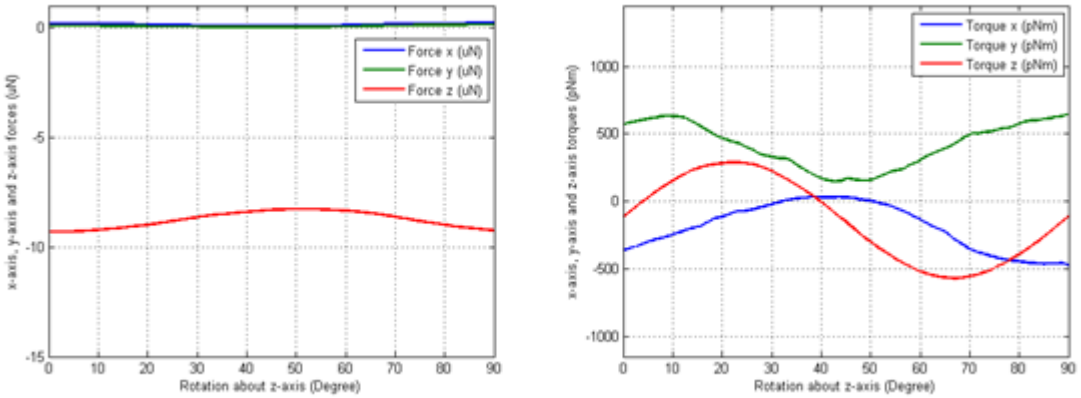
Burada ise mıknatıslar, mikro robot kolundan z-ekseninde 3 mm uzaklıktayken z-ekseni etrafında 90° döndürülmesinin nikel kaplamalara dolayısıyla mikro robot koluna etkisi gözlemlenmiştir. Şekil 2.9'da mıknatıslar nikel kaplamaya göre z-ekseninde -3 mm, y ekseninde -2 mm uzaklıktayken 500 nm nikel kaplama üzerinde oluşan manyetik alan çizgileri görülmektedir. Şekil 2.21'de ise z-ekseninden -3 mm mıknatıslar yz düzlemine 45° açı yaparken 500 nm nikel kaplama üzerinde oluşan manyetik alan çizgileri görülmektedir.



Şekil 2. 20 Mıknatısların z ekseninde mikro robot kolundan 3 mm uzağa sabitlenmiş ve z eksenine göre 45 derece dönmüş konumundaki görüntüsü



Şekil 2. 21 90 derece dönme esnasında x ve y eksenleri yönünde oluşan kuvvetler



Şekil 2. 22 500 nm kaplama nikellerden z-ekseninde 3 mm uzaklıktaki mıknatısların z-ekseninde 90° hareketi sonucunda mikro robot koluna etki eden kuvvet ve tork grafikleri

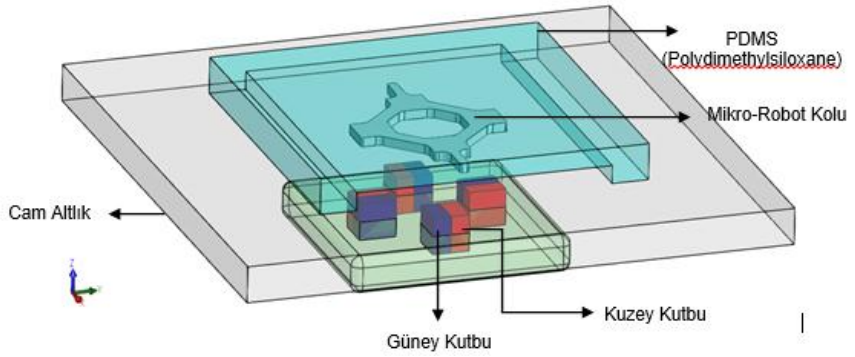
Şekil 2.22'de görüldüğü üzere mıknatısların kuzey kutuplarının merkezden dışarı yönde olduğu konumdayken; dönme hareketinin sonucu, mıknatısların kuzey kutuplarının +y yönünde olduğu konumdakine göre daha düzgün bir nN mertebesinde kuvvet eğrisi ve pNm mertebelerinde tork eğrisi gözlemlenmiştir.

2.2.2.3 Mıknatısların Kuzey Kutuplarının Yatay Konumda Birbirlerine Göre Çapraz Olma Durumu

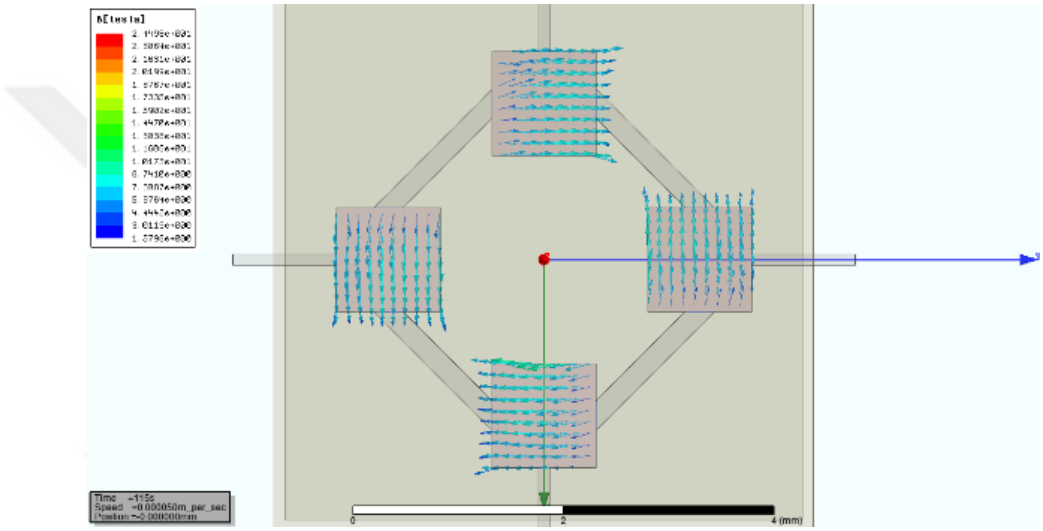
Bu bölümde; robotik sistemi hareket ettirecek bütün sabit mıknatısların kuzey kutuplarının yönü yataydadır. Buna ilave olarak mıknatısların kuzey kutupları ikili gruplar halinde birbirine bakmaktadır. Bu şekilde analizler yapılarak kuvvet ve tork grafikleri elde edilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Konumlandırmanın belirlendiği bölümün sonuç kısmında bu grafikler; diğer durumlarda elde edilen grafiklerle karşılaştırılmıştır.

a. Yatayda Çapraz Kutuplu Mıknatısların Dikey Hareketinin Mikro Robot Koluna Etkisi

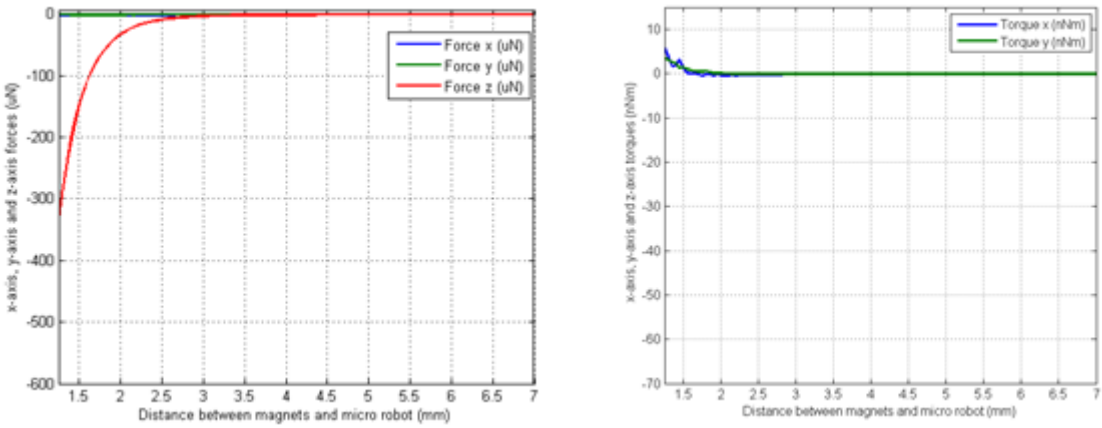
Burada mıknatıslar x ve y-eksenlerinde, nikel kaplamaya göre, -1,5 mm den -7 mm uzaklığa götürülürken kuvvette ve troktaki değişimler gözlemlenmiştir. Sekil 2.10'da mıknatısların nasıl yerleştirildiği, Sekil 2.11'de ise nikel plakalardan geçen manyetik alan çizgilerini görülmektedir.



Şekil 2. 23 Mıknatıslar yatayda çapraz yerleştirilmiştir.



Şekil 2. 24 Çapraz yerleştirilen mıknatısların 500 nm kalınlığındaki nikel kaplamalarda oluşturduğu manyetik alan çizgileri b' de görülmektedir.



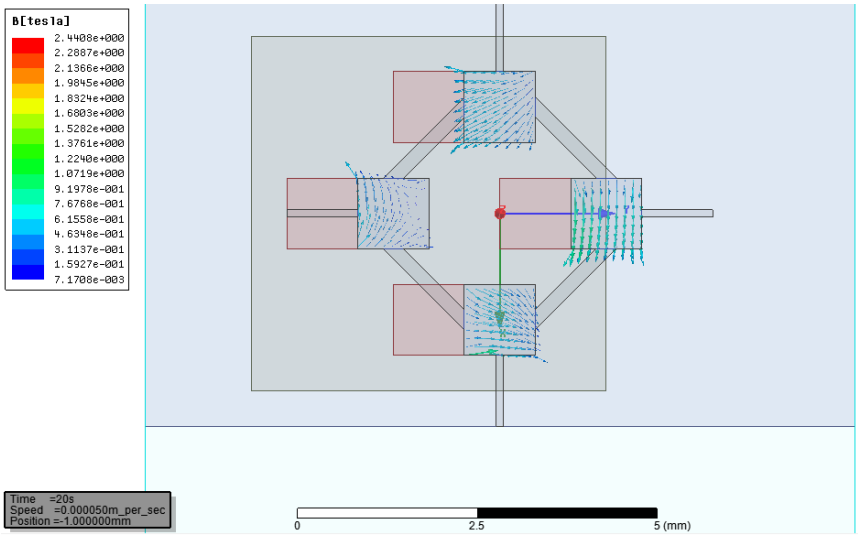
Şekil 2. 25 Nikel kaplama ile mıknatıslar arasındaki mesafenin değişimine bağlı kuvvet ve tork grafiği

Şekil 2.25'de görüldüğü üzere mıknatısların kuzey kutuplarının yatayda birbirlerine göre çapraz yönlü olduğu konumdayken z-ekseninde dikey hareketinin sonucunda maksimum -324 µN kuvvet ve en yakın (mıknatıslar mikro-robot kolundan 1,5 mm uzaklıkta) konumdayken bir kaç nNm tork etkidiği görülmektedir.

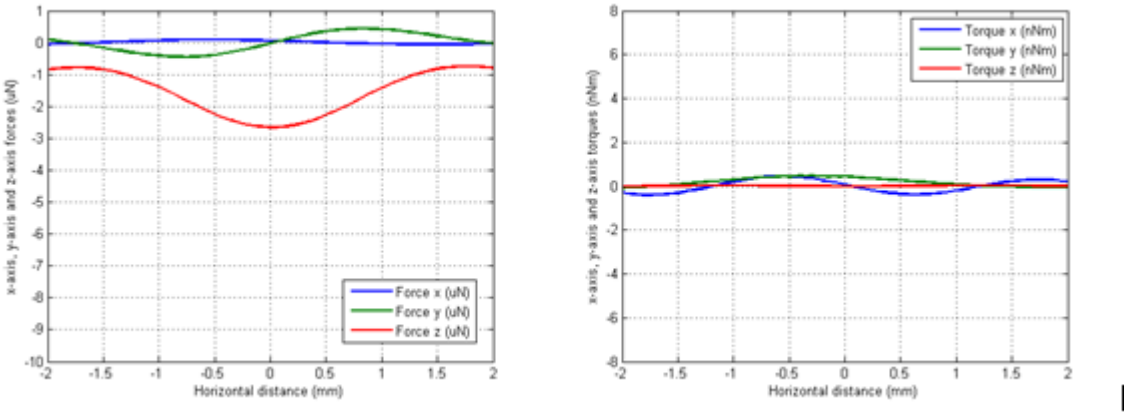
b. Yatayda Çapraz Kutuplu Mıknatısların Yatay Hareketinin Mikro Robot Koluna Etkisi

Burada mıknatısların y-eksenindeki yatay hareketinin nikel kaplamalara yani mikro robot koluna etkisi gözlemlenmiştir. Z ekseninde nikel kaplamalardan 3 mm uzaklıktaki mıknatıslar y eksenine göre, -2 mm den 2 mm uzaklığa götürülürken kuvvette ve troktaki değişimler gözlemlenmiştir. Sekil 2.13'de mıknatıslar nikel kaplamaya göre z-ekseninde -3 mm, y-ekseninde -1 mm uzaklıktayken 500 nm nikel kaplama üzerinde oluşan manyetik alan çizgileri görülmektedir.

Mıknatıslar yatayda mikro robot kolundan yaklaşık 1 mm uzaklaştığında maksimum kuvvet değerine ulaşıyor ve mikro robot koluna 0,62 µN kuvvet uygulayabiliyor. Bununla beraber mıknatıslar mikro robot kolundan yatayda uzaklaştıkça dikeydeki kuvvette olması gereken azalmada simülasyon sonuçlarında görülmüştür.



Şekil 2. 26 Mıknatıslar nikel kaplamaya göre z-ekseninde -3 mm, y-ekseninde mikro robot kolundan -1 mm uzaklıktayken 500 nm nikel kaplama üzerindeki manyetik alan çizgileri

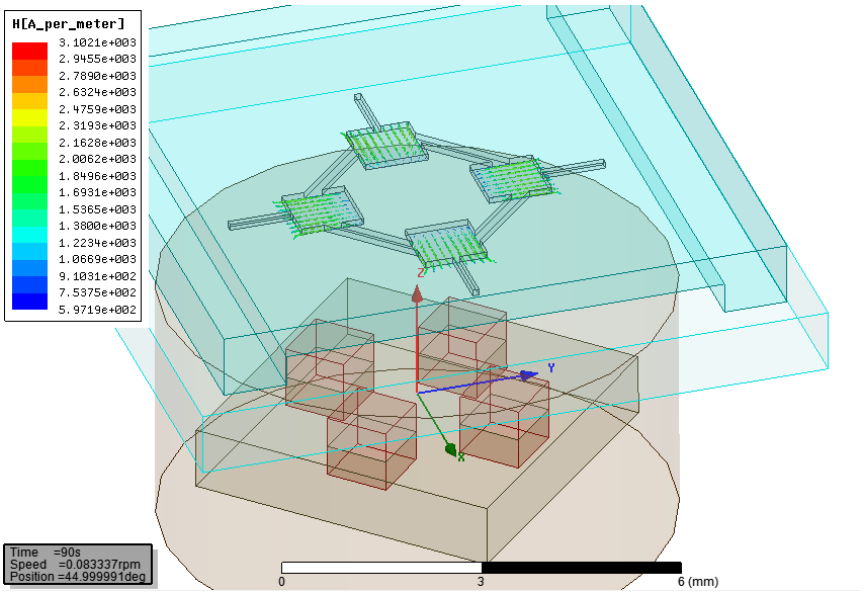


Şekil 2. 27 500 nm kaplama nikellerden z-ekseninde 3 mm uzaklıktaki mıknatısların y-ekseninde -2 mm' den 2 mm'ye hareketi sonucunda mikro robot koluna etki eden kuvvet ve tork grafikleri

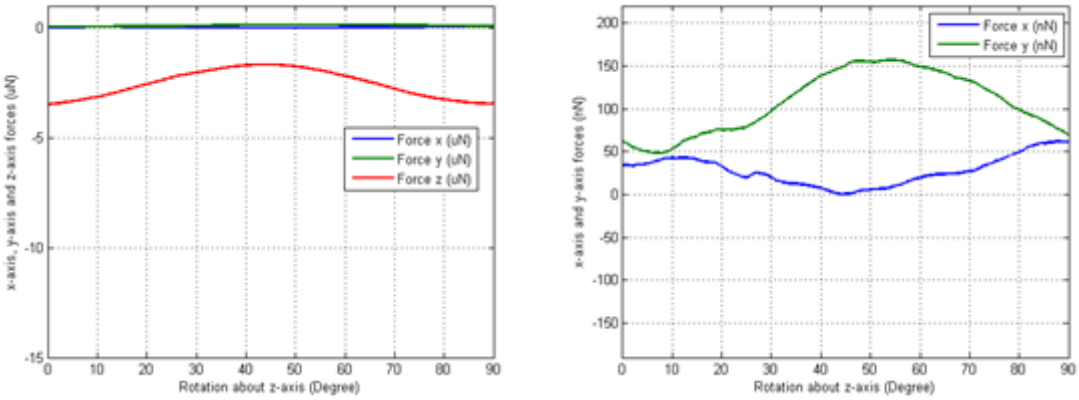
Şekil 2.27'de görüldüğü üzere mıknatısların kuzey kutuplarının merkezden dışarı yönde olduğu konumdayken; y ekseninde hareketinin sonucunda, mikro-robot kolundan 1 mm uzaklığa erişildiğinde, yaklaşık 0,5 µN kuvvet değeri gözlemlenmiştir.

c. Z Ekseni Etrafında Mıknatısların 90° Dönme Hareketinin Mikro Robot Koluna Etkisi

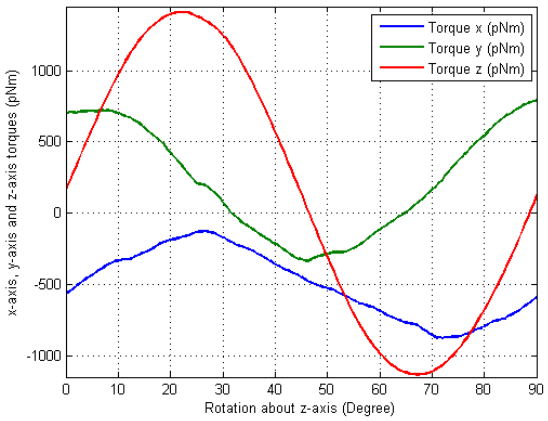
Burada ise mıknatıslar, mikro robot kolundan z ekseninde 3 mm uzaklıktayken z-ekseni etrafında 90° döndürülmesinin nikel kaplamalara dolayısıyla mikro robot koluna etkisi gözlemlenmiştir. Sekil 2.14'de mıknatıslar nikel kaplamaya göre z-ekseninde -3 mm, y-ekseninde -2 mm uzaklıktayken 500 nm nikel kaplama üzerinde oluşan manyetik alan çizgileri görülmektedir. Sekil 2.14'de z ekseninden -3 mm mıknatıslar yz düzlemine 45° açı yaparken 500 nm nikel kaplama üzerinde oluşan manyetik alan çizgileri görülmektedir.



Şekil 2. 28 Mıknatısların z-eksenine göre 45 derece konumundaki görüntüsü



Şekil 2. 29 500 nm kaplama nikellerden z-ekseninde 3 mm uzaklıktaki mıknatısların z-ekseninde 90° hareketi sonucunda mikro robot koluna etki eden kuvvet grafikleri (x,y,z kuvvet grafiği(solda), x,y kuvvet grafiği(sağda))



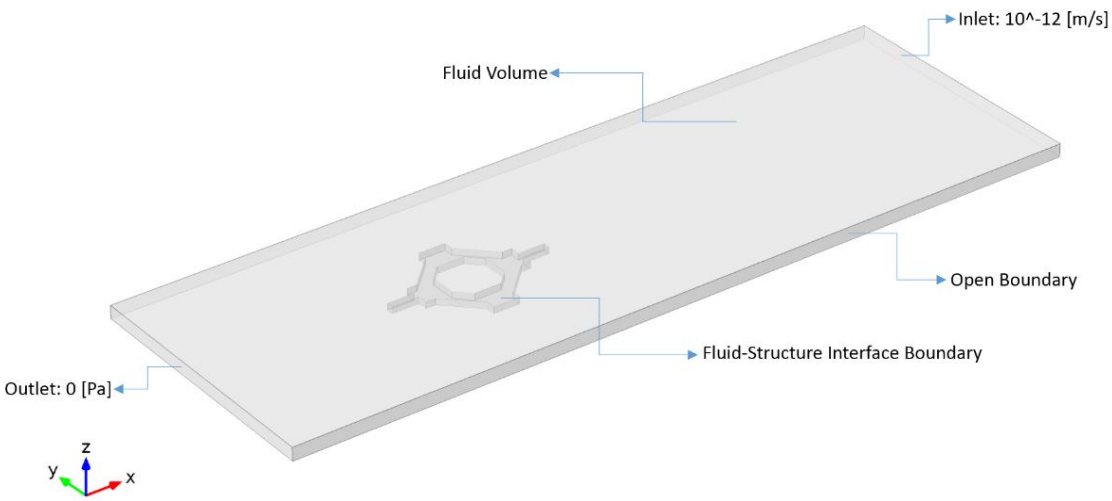
Şekil 2. 30 500 nm kaplama nikellerden z-ekseninde 3 mm uzaklıktaki mıknatısların z-ekseninde 90° hareketi sonucunda mikro robot koluna etki eden kuvvet grafiği

2.2.3 Mıknatısların Konumlandırma Analiz Sonuçları

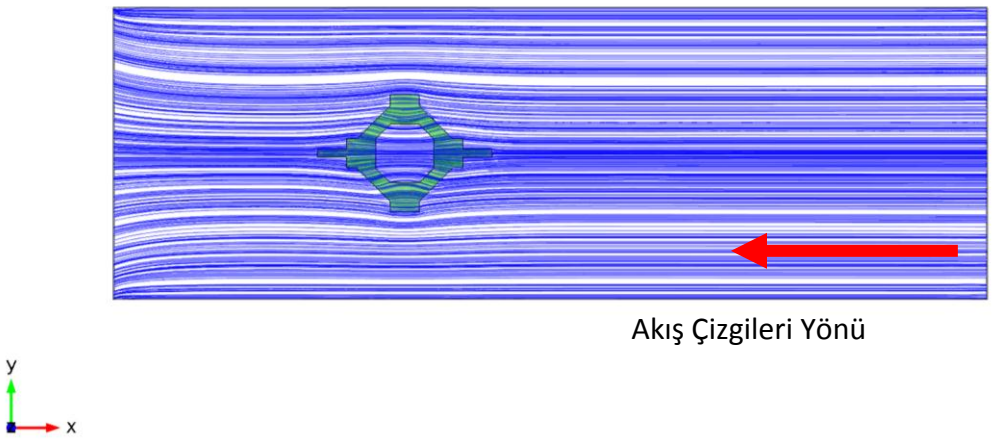
İncelenen analizler sonucunda ferromanyetik nikel kaplamalara(dolayısıyla mikro-robot koluna) etki eden en elverişli grafiklerin; mıknatısların kuzey kutbunun merkezden dışarı baktığı pozisyondayken elde edildiği görülmektedir**.**

2.2.4 Mikro Robot Kolunun Mikro Akışkan Kanal İçindeki Hareketinin Analizi

Bu çalışmada sıvı içerisindeki robot koluna etkiyen kuvvetler hesaplanarak, robot kolunu sabit bir pozisyonda tutmak için gereken manyetik kuvvet değeri hesaplanmıştır. Bu kuvvet değeri baz alınarak robot kolunun askıda kalıp kalmadığı gözlemlenmiştir. Daha sonra ise robot kolunun mikro akışkan çip içerisindeki hareketini gözlemlemek amacıyla yatay eksende varsayımsal bir manyetik kuvvet oluşturulmuş ve robot kolunun bu kuvvette verdiği tepki gözlemlenmiştir. Robot kolu içerisi tamamen sıvı dolu olan bir mikro akışkan çip içerisinde, aşağıdaki şekilde olduğu gibi tanımlanır. Laminar akış; inlet sınır koşulu olarak 10^{-12} m/s olarak tanımlanır.

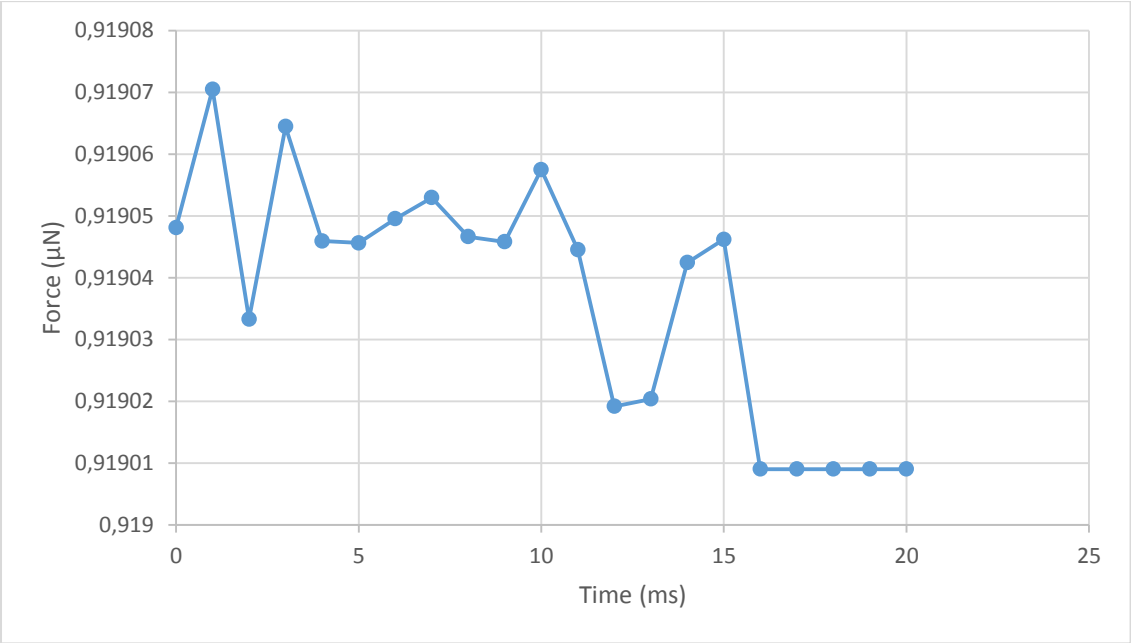


Şekil 2. 31 Robot Koluna ait sınır koşullarının tanımlanmıştır. Yapı-akışkan etkileşimi sınırları ve mikro akışkan çipe ait kabın sınır koşulları tanımlanmıştır.



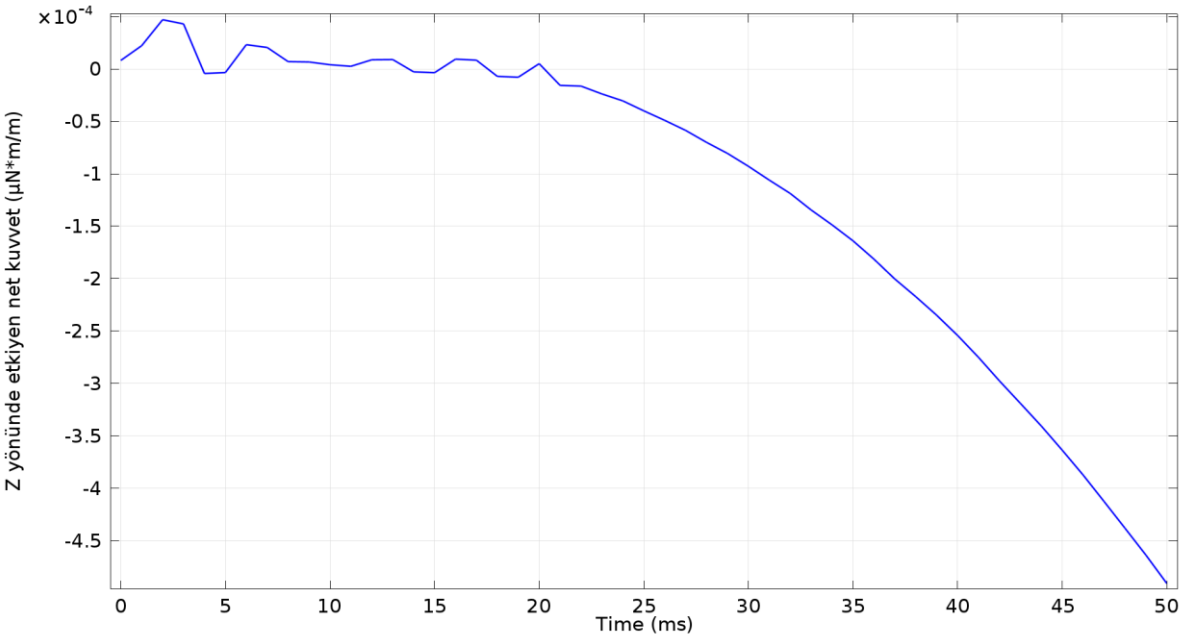
Şekil 2. 32 Robot kolunun ve 10^{-12} m/s hız ile akmakta olan sıvının akış çizgilerinin yukarıdan görünümüdür. Akışkan sıvı olarak 25 ºC sıcaklıkta saf su kullanılmıştır

Robot koluna z-ekseni yönünde etkimesi gereken manyetik kuvveti hesaplayabilmek için robot koluna etkiyen kaldırma kuvveti ve yerçekimi kuvvetlerinin etkisi bulunmuştur. Elde edilen net kuvvet grafiğinden robot koluna z-ekseninde uygulaması gereken manyetik kuvvet değeri hesaplanmıştır. Böylelikle robot kolu sıvı içerisinde askıda kaldığı ilerleyen sayfalarda görülecektir.



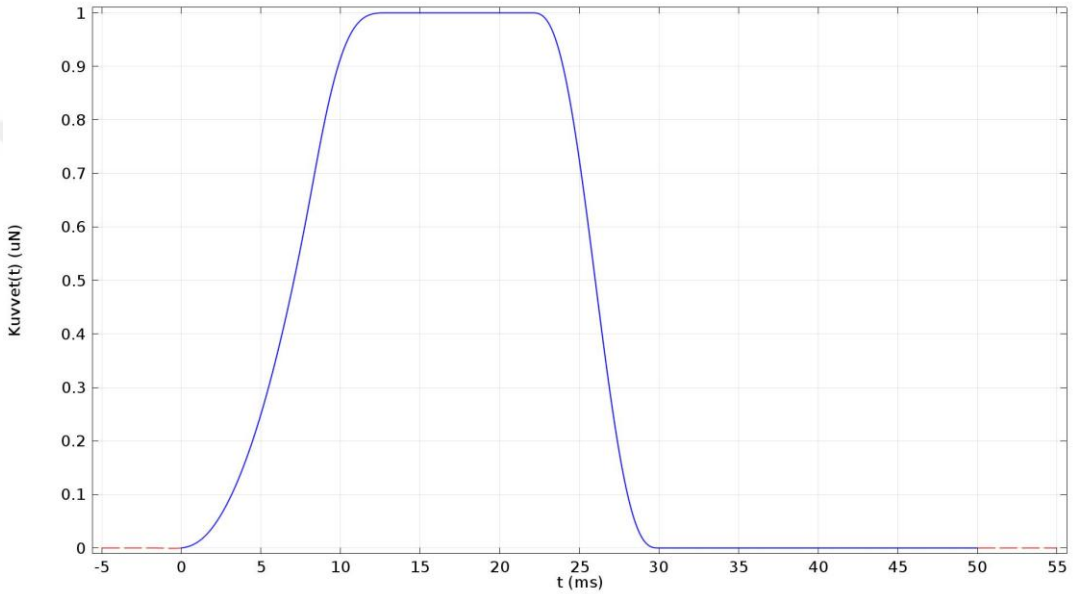
Şekil 2. 33 Robot koluna z ekseni yönünde etkiyen toplam kuvveti göstermektedir. Bu kuvvete kaldırma kuvveti ve yerçekimi kuvveti dâhildir

Robot koluna uygulanması gereken manyetik kuvvet, Şekil 2.33 baz alınarak 0.91904 µN değerinde sabit bir kuvvet olarak kabul edilir. Bunun sonucu, Şekil 2.34 elde edilir. Elde edilen değerler sonucu net kuvvet, ihmal edilebilir değişimler gösterdiğinden dolayı 0 µN olarak kabul edilir.



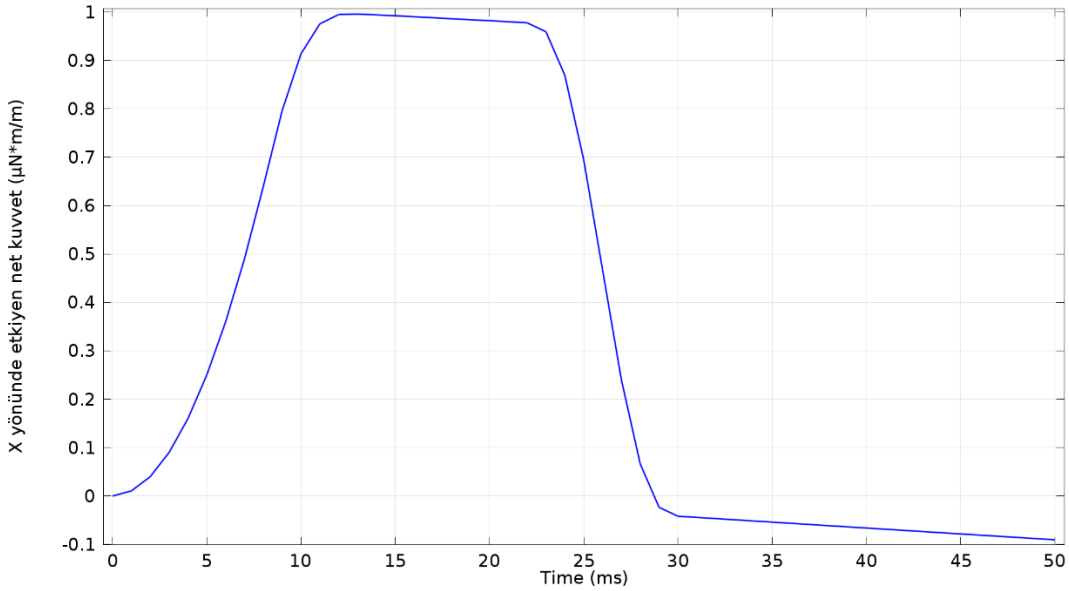
Şekil 2. 34 Robot koluna z ekseni yönünde etkiyen net kuvvet grafiğidir. Kaldırma kuvveti, yerçekimi kuvveti ve manyetik kuvvetin toplamını içerir

Robot kolunun yatay düzlemde hareketini ise x ekseni doğrultusunda uygulanan varsayımsal olarak belirlenmiş bir manyetik kuvvet sağlamaktadır. Amaç, robot kolunun x ekseninde hareketini gözlemlemektir. Bu kuvvetin zamana bağlı grafiği Şekil 2.35' deki gibi belirlenmiştir. 0-10 ms zaman aralığında 1 uN kuvvet değerine ulaşılmış, 10-25 ms zaman aralığında ulaşılan değer korunmuş ve 25-50 ms zaman aralığında kuvvet uygulanmamıştır. Mıknatıslardan elde ettiğimiz manyetik kuvvetin mikro robot kolunu x ekseninde hareket ettirmek için yeterli bir kuvvet olduğunu Şekil 2.35'den anlamaktayız.



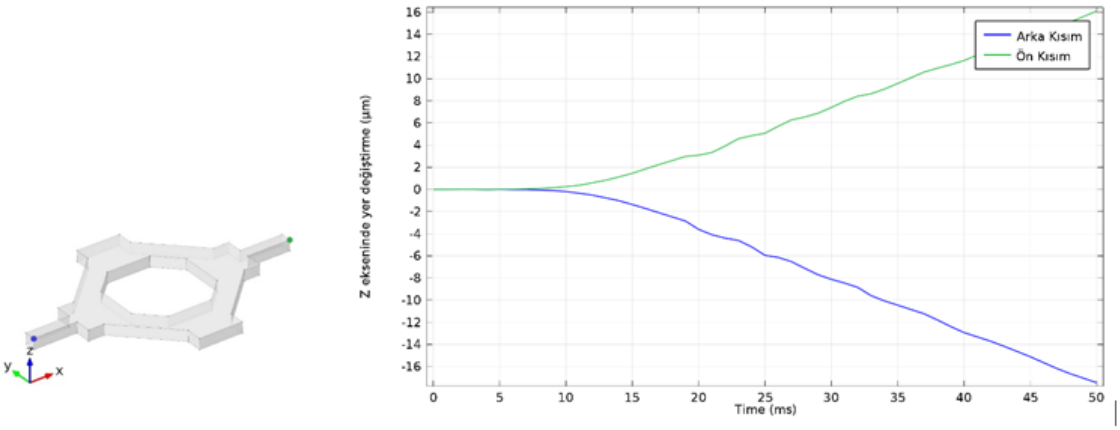
Şekil 2. 35 Robot koluna x ekseni yönünde etkiyen manyetik kuvvet grafiğidir. Varsayımsal olarak tanımlanan bu kuvvet sayesinde robot kolunun x ekseni doğrultusunda hareketi gözlemlenmiştir

Şekil 2.36'da robot koluna, sürüklenim kuvvetleri dahil, etkiyen net kuvvet gözlemlenmiştir. 25-50 ms zaman aralığında manyetik kuvvet uygulanmadığından dolayı sürüklenim kuvvetinin etkisi açıkça görülmektedir.



Şekil 2. 36 Robot koluna x ekseni yönünde etkiyen net kuvvet grafiğidir. Sürüklenim (drag) kuvveti ve manyetik kuvvetin toplamıdır

Robot kolunun z-ekseni ve x-ekseninde uygulanan kuvvetlerce z ekseninde konum değiştirme grafiği Şekil 2.37'deki gibi gözlemlenmiştir. Robot kolunun yeşil nokta ile işaretlenmiş ön kısmının 16 um yukarı doğru kalktığı ve mavi nokta ile işaretlenmiş arka kısmının ise 16 um aşağıya doğru indiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, 10-25 ms zaman aralığında uygulanan sabit manyetik kuvvetten kaynaklı oluşan ivme değeridir.



Şekil 2. 37 Mikro-robot kolunun yatayda ilerlemesi sonucunda; mikro-robot kolu üzerinde mavi ve yeşille belirtilen iki noktanın z-ekseni doğrultusunda konum değiştirmesi

Sonuç olarak simulasyon başarı ile tamamlanmıştır. Robot kolunun ve mikro akışkan kanalın bulunacağı sistem hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Analizlerden elde ettiğimiz sonuçlardan yola çıkarak mikro robot kolunun akışkan kanal içerisindeki hareketleri

incelenmiş ve mıknatıslarla elde ettiğimiz manyetik kuvvetin mikro robot kolunu hareket ettirmek ve 100 µm ye kadar partikülleri hassas bir şekilde hareket ettirmek için yeterli bir kuvvet olduğu sonucu elde edilmiştir. Bu analizler ışığında sistem üretilecek olup, benzer sonuçlarla karşılaşılacağı öngörülmektedir.

2.3 Nikel Kaplı Polimer Mikro Robot Kolu Üretimi

2.3.1 Polimer Malzeme Seçimi ve İşlenmesi

Nikel kaplı polimer mikro-robot kolu üretiminde ilk aşama nikel kaplamanın yapılacağı polimer malzemenin seçilmesi ile gerçekleşmiştir. Polimer malzemede aranan ilk özellik yoğunluğunun suyun yoğunluğundan düşük ve su absorpsiyonunun düşük olmasıdır. Bununla birlikte mikromanipülasyon işleminde kullanılacağından bir diğer önemli parametre sertliği ve young modülüsünün yüksek olmasıdır. Polimerden beklenen tüm bu özellikler göz önüne alındığında polipropilen malzeme ile çalışılmasına karar verilmiştir. Polipropilen malzemeye ait teknik özellikler aşağıda gösterilmektedir.

Çizelge 2. 1 Polipropilen Malzemesinin Teknik Değerleri

POLİPROPİLEN TEKNİK DEĞERLER		
	Birim	**Değer**
Genel Özellikler		
Yoğunluk (20 C'de)	gr/cm^3	0,84-0,91
Su Emme (23 C'de su ortamında)	%	0.02-0.04
Mekanik Özellikler		
Çekme dayanımı	MPa	26-32
Youngs Modulü	MPa	1200-2000
Izod Darbe Dayanımı, 23 C	$J\ m^{-1}$	18-69
Sertlik	Shore A	64-90
Termal Özellikler		
Maksimum Sürekli Çalışma Sıcaklığı	° C	100
Kimyasal Dayanım	Dayanım Durumu	
Seyreltik/Konsantre asit	Çok İyi	
Alkol	Çok İyi	
Alkali	Çok İyi	

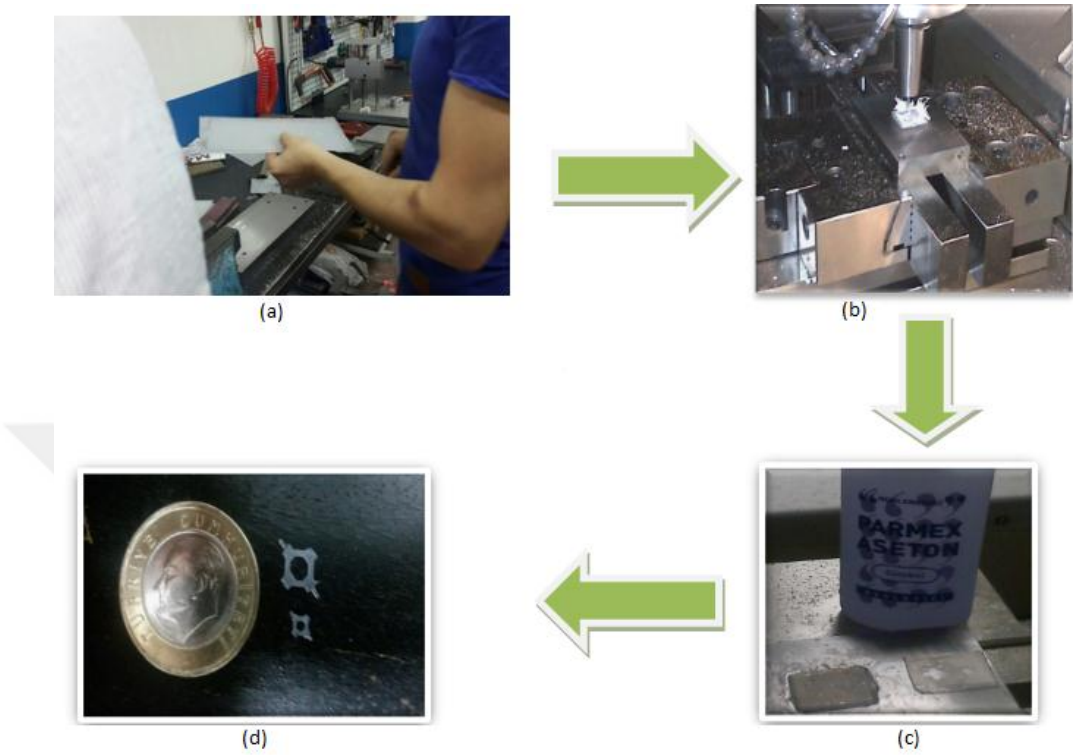
Polimer malzemenin seçiminden sonraki işlem ise polimer malzemenin yapılan tasarıma göre karbon lazer kullanılarak işlenmesi olmuştur. Kesimlerde kullanılan karbon lazer Epilog marka Helix model 50 watt gücünde bir cihazdır. Karbon lazer kesim cihazlarında lazer ışını çok dar bir alana odaklanarak kesim yapabilmektedir.

Polimerin karbon lazer ile kesimi esnasında malzeme tipi, kalınlığı ve keskin geçişlerden dolayı malzeme istenen hassasiyette işlenememiştir. Bir önceki bölümde anlatılan nikel malzemenin lazerle işlenmesi sonucu elde edilen mikro robot kolu kalitesi, polimer malzemenin lazerle işlenmesi sonucu elde edilememiştir. Bu yüzden farklı üretim tekniği arayışlarına girilmiştir.

Polimer malzemenin kesim işlemi ''Mikro-CNC'' firmasında mikro hassasiyette mekanik işleme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. İmalat teknolojisinde mekanik işleme yöntemiyle üretime olan talep günden güne artmaktadır. Piyasada mekanik işleme yöntemiyle mikro (0,1- 100µm) ve mezo (100µm-10mm) boyutlarında üretimin artması da bunda etkilidir. Kesimler esnasında ''Röders rfm 600 mark'' ismindeki CNC makinası kullanılmıştır. Mikro mekanik işleme 10 µm'den birkaç milimetreye kadar olan parçaların imalatında kullanılabilmektedir. Mikro mekanik işleme geleneksel mekanik işleme yöntemlerinden konvansiyonel işleme operasyonlarına benzemesine rağmen, mikro mekanik işleme minyatürleştirilmiş kesici takımlar kullanılarak malzeme yüzeylerini şekillendirmektedir . Kesim sırasında mikro parmak uç ile yüksek derinlik oranlı üç boyutlu işleme yapabilmektedir.

Yukarıda da belirtildiği gibi polimerin lazerle işleme yönteminde ısıl etkilerden dolayı mikro robotun istenilen hassasiyette üretilememesi üzerine CNC ile mikro mekanik işleme yöntemi ile mikro robotun üretilmesine başlanılmıştır. Kesim işlemleri esnasında 6 mm uç kalınlığında 7000 devir/dk hızında dönen alüminyum düz takım ile 2000 mm/dk ilerleme hızıyla 100 er mikronluk tabakalar halinde polimer plaka yüzeyi inceltilerek 250 mikronluk kalınlığa getirilmiştir.(Şekil 2.15 (a)) Daha sonra bu polimer tabakanın hassas bir şekilde işlenerek son ürüne dönüştürülmesi sırasında ise 26000 devir/dk hızla 400 mikronluk küre çelik kesme ucu kullanılmıştır.(Şekil 2.15 (b)) Kesimler sırasında stabil bir kesim yapabilmek adına polipropilen plakanın altına ayrı bir plaka yapıştırıcı ile yapıştırılmış, bu plaka da metal zemine yapıştırılarak sistem

sabitlenmiştir. Bu işlemlerin ardından yapışan yüzeyleri ayırmak ve işlenen parçaları sökmek amacıyla aseton kullanılmıştır.(Şekil 2.15 (c)) Son olarak Şekil 2.15(d)'deki parça elde edilmiştir.



Şekil 2. 38 (a) Polimer Plaka Yüzeyin İnceltilmesi (b) İnceltilen polimer yüzeyin mikro hassasiyette CNC' de işlenmesi (c) Mikro hassasiyette CNC ile işlenen mikro-robot kolu (d) İşlenen parçaları sökmek amacıyla kullanılan aseton

2.3.2 Akımsız Nikel Kaplama Yöntemiyle Yüzeyin Kaplanması İşlemi

Akımsız (otokatalitik) kaplama işlemi kimyasal redükleyici ajan içeren bir ortamda metal iyonlarının metal olarak redüklenmesi işlemini kapsar. Sisteme bağlı bir elektrot yoktur. Anot yerine metal metal tuzundan sağlanır. Kaplama yapılacak malzemenin yüzeyi ise katot olarak görev yapar. Elektronların indirgenmesinde ise redükleyici ajan görev yapar. Kaplama işlemi çözelti içerisindeki katalitik yüzeyler üzerinde meydana gelir. Kaplama işlemi sırasında herhangi bir güç kaynağı kullanılmaz ancak genelde kaplama çözeltisi ısıtılır. Akımsız kaplama işlemi esnasında genelde nikel ve bakır kaplanır ancak kobalt,gümüş ve paladyum gibi metallerin kaplanmasına yönelik uygulamalar da vardır.

Tez çalışması kapsamında mikro işleme yöntemiyle CNC'de üretilen mikro robot parçalarının kaplanması işleminde de akımsız nikel kaplama yönteminden faydalanılmıştır.

BÖLÜM 3

MİKRO ROBOT KOLU İÇİN TEMASSIZ MANİPÜLASYON TEKNİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ

3.1 Manyetik Alanla Manipülasyon Deney Düzeneğinin Geliştirilmesi

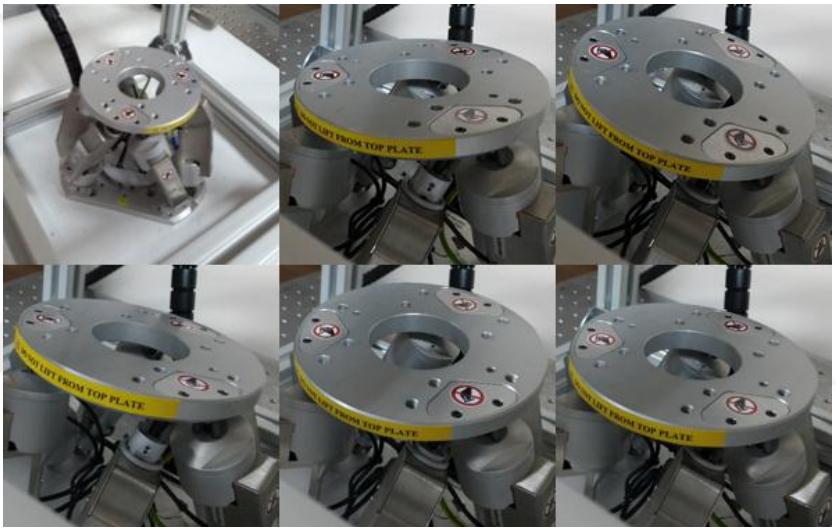
Tez çalışmasının önemli aşamalarından biri mikro robotun x, y ve z eksenlerinde hassas konum kontrolünün yapılmasıdır. Bu başlık altında, mikro robotun konumunun temassız olarak hassas bir şekilde kontrol edilebilmesi amacı doğrultusunda tasarlanan ve hayata geçirilen manyetik alanla levitasyon düzeneği hakkında bilgi verilecektir.

Mikro robotun temassız bir şekilde kontrol edilmesi ihtiyacı, daha önce de belirtildiği gibi konum kontrolünün mıknatıslar aracılığıyla yapılması gerekliliğini doğurmuştur. Bu yüzden öncelikle mikro robotun hareketini sağlayan mıknatısların konumlarını kontrol eden sistemin geliştirilmesi üzerine odaklanılmıştır. Mıknatısların kontrol edilmesi, sağladıkları manyetik alanın da kontrol edilebilmesini sağlayacak ve mikro robotun bu manyetik alanla beraber hareket etmesini sağlayacaktır.

Mıknatısların konum kontrolü için bir Hexapod sisteminin kullanılması uygun görülmüştür. Stewart platformu olarak da adlandırılan Hexapod sistemi altı adet lineer motor üzerine yerleştirilmiş bir tablanın, lineer motorların uzunlukları değiştirilerek, altı eksende kontrol edilmesini sağlayan bir platformdur. Lineer motorların uzunlukları enkoderler yardımıyla sürekli takip edilir. Bu uzunluk bilgisi daha sonra ters kinematik yöntemleri kullanılarak tablanın konumunun ve yöneliminin hesaplanmasına olanak sağlar.

Tez çalışmasında hexapod sistemi olarak HXP50-MECA model bir Hexapod kullanılması uygun görülmüştür. Newport tarafından üretilen bu Hexapod'un tercih edilmesindeki en önemli etken konum kontrolünün yüksek hassasiyet ile yapılabiliyor olmasıdır. Mikrometre altında bir hassasiyetle x, y ve z eksenlerinde konum kontrolü yapılabilen bu Hexapod bize mikro robotu kontrol etmek için istediğimiz hassasiyeti sağlayacaktır. Ayrıca Hexapod x, y ve z eksenleri etrafındaki dönüş açıları olan θ_x, θ_y ve θ_z açılarının da kontrolünü sağlamaktadır. Bu durum, mikro robotun açılarında meydana gelebilecek herhangi bir bozulmaya karşı mıknatısların açılarının kontrol edilebilmelerini sağlayacaktır.

Hexapod'a ait bir görüntü Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3. 1 Hexapod'un farklı konum ve yönelimlerde çekilmiş görüntüleri. Hexapod tablasının altı eksenli hareketi, altında bulunan altı adet lineer motorların boylarının kontrol edilmesi ile sağlanmaktadır.

Hexapod üzerindeki en önemli parçalar lineer motorlardır. Lineer motorlar enkoderlerinden okunan geri besleme kullanılarak voltajlarının kontrol edilmesi yöntemiyle konumlandırılabilirler. Bu amaçla Hexapod üzerindeki lineer motorların her biri, enkoder ve voltaj çıkışlarını sağlayan ikişer SUB-D25 konektörüne sahiptir. Lineer motorlar ayrıca daha stabil bir hareket sağlamaları için yaylarla desteklenmişlerdir. Lineer motorlar ve beraber çalıştıkları bu gibi komponentler Hexapod'un bacaklarını teşkil ederler.

Hexapod'un bir diğer önemli parçası ise bacakları üzerinde duran tabladır. Tabla $125\ mm$ çapında bir çember şeklindedir. Bu bize mıknatıs düzeneğinin yerleştirilmesi

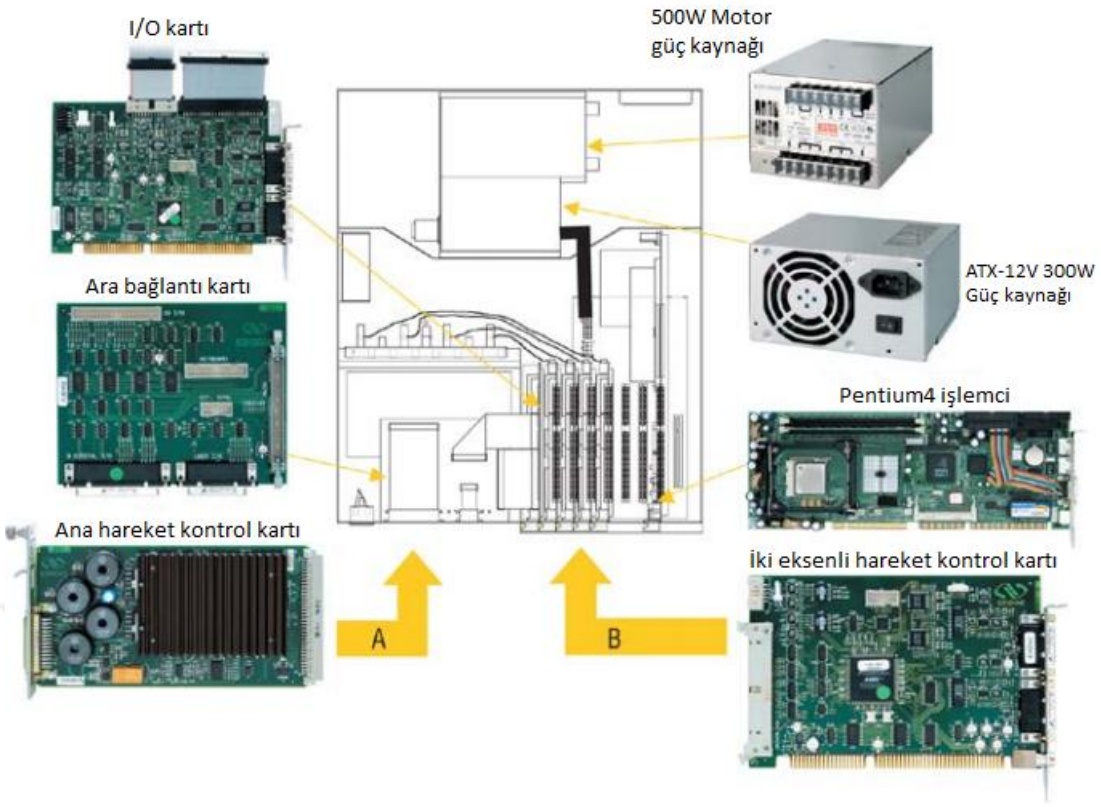
için yeterli bir alan sağlamaktadır. Ayrıca tablanın üzerinde parça bağlanmasını kolaylaştırmak için açılmış vida yuvaları vardır. Mıknatıs düzeneğinin yerleştirildiği aparat bu yuvalara uygun şekilde tasarlanmıştır.

Deney düzeneğine rijitlik katmak için Hexapod, laboratuvarda bulunan OTPOT12-08 model bir optik masa üzerine sabitlenmiştir. Hexapod, sistemin kurulumu esnasında referans olarak kabul edilmiş ve diğer komponentler buna uygun bir şekilde sisteme entegre edilmiştir.

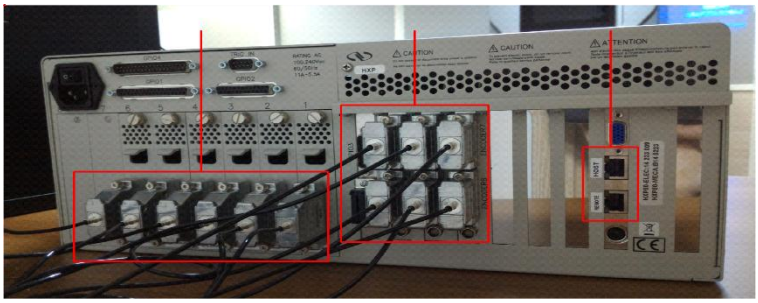
Hexapod'un kontrolü elimizde bulunan Hexapod modeli için özel olarak tasarlanmış olan HXP50-ELEC model bir Hexapod kontrolcüsü tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu kontrolcü altı adet lineer fırçalı DC motor ve iki adet step, fırçalı DC veya fırçasız DC motor sürme kabiliyetine sahiptir. Bu işlemler kontrolcü içinde bulunan Pentium 4 işlemci, I/O kartı, hareket kontrol kartı gibi donanımlar yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Kontrolcü içinde bulunan donanım mimarisini gösteren bir diyagram Şekil 3.2'de görülmektedir.

Hexapod kontrolcüsünün arkasında bulunan bağlantı panosu Şekil 3.3'de görüldüğü gibidir. Hexapod lineer motorlarından çıkan enkoder ve güç konektörleri bu panodaki enkoder ve güç girişlerine bağlanmıştır. Motorların kontrolü için PID kontrolcüsü kullanılmaktadır. Enkoderlerden çekilen veriler lineer hata, dişli boşluğu, histerisis gibi nedenlerden kaynaklanan hataları telafi edebilecek şekilde işlenmektedir.

Kontrolcü ile bilgisayar arasında bağlantı TCP/IP protokolü üzerinden kurulmaktadır. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi Hexapod kontrolcüsünün bağlantı panosunda TCP/IP bağlantısı kurmak için biri HOST diğeri REMOTE olmak üzere iki port bulunmaktadır. REMOTE portu değiştirilemez bir statik IP adresine sahipken HOST portu statik ve dinamik IP adresine sahip olabilir ve bu adres istenildiği takdirde değiştirilebilir.



Şekil 3. 2 Hexapod kontrolcüsüne ait donanım mimarisi. Bu komponentler bilgisayardan TCP/IP üzerinden gönderilen komutların hareket kontrol kartları aracılığıyla lineer motorlara gönderilmelerini sağlamaktadır.



Şekil 3. 3 Hexapod kontrolcüsü bağlantı panosu. Motor bağlantıları SUB-D25, enkoder bağlantıları SUB-D15 konnektörleri ile sağlanmıştır.

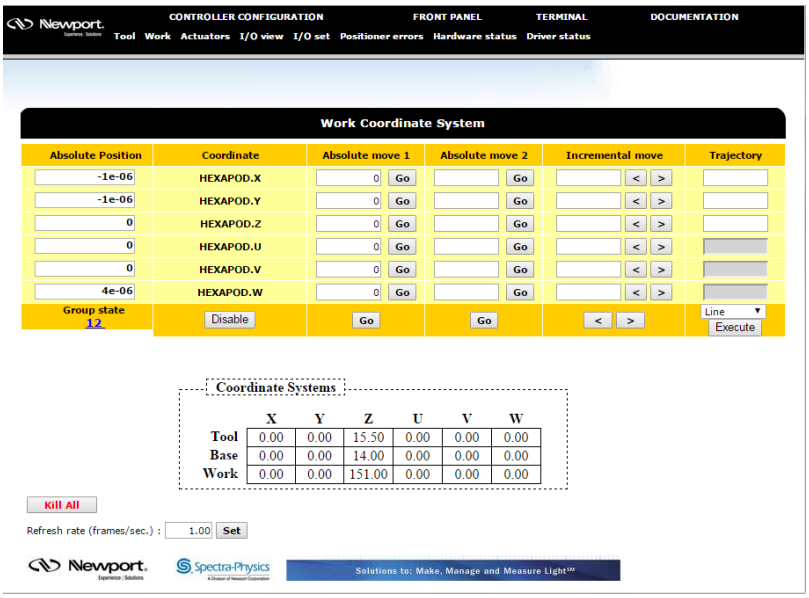
Hexapod kontrolcüsü ile bilgisayar arasında haberleşme 'string' şeklinde gönderilen komutlar ve aynı şekilde alınan cevaplar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu komutlar aracılığıyla Hexapod'un konumu ve yönelimi kontrol edilebilmekte, bacak boyları kontrol edilebilmekte, PID parametreleri değiştirilebilmekte, sensör verileri çekilebilmektedir.

Çizelge 3.1 ’de Hexapod’un kontrolü için TCP-IP üzerinden gönderilen bazı önemli komutlar ve bu komutların işlevleri hakkında bilgi verilmiştir.

Çizelge 3. 1 Hexapod kontrolü için kullanılan komutlar. Bu komutlar Hexapod hareketlerinin bir bilgisayar programı üzerinden kontrol edilebilmesi için kullanılmıştır. Bu şekilde mikro robotun hareketinin otomatik kontrolü sağlanacaktır.

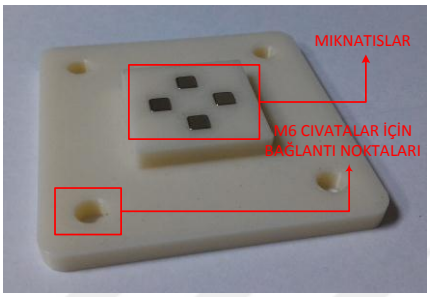
HexapodMoveAbsolute($X, Y, Z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$)	(X, Y, Z) konumuna ve ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) yönelimine git
HexapodMoveAbsolute($X, Y, Z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$)	Konumu (X, Y, Z) kadar ve yönelimi ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) kadar artır
GroupHomeSearch()	*‘Home’* pozisyonuna git
GroupPositionCurrentGet()	Şu anki konum ve yönelim bilgisini gönder
GroupPositionSetpointGet()	Hedeflenen konum ve yönelim bilgisini gönder

Hexapod kontrolcüsü ile bağlantı kurulduktan sonra Hexapod’un doğrudan tarayıcı üzerinden kontrol edilebilmesi için kullanılabilecek bir arayüzü vardır. Kullanılan portun IP adresi kullanılarak bağlanabilen bu arayüz Şekil 3.4’de görüldüğü gibidir. Bu arayüz üzerinden Hexapod’un 6 eksende hareketi kontrol edilebilmekte ve sensör verileri görüntülenebilmektedir. Ayrıca HOST ve REMOTE portlarının IP adresleri bu arayüz üzerinden kontrol edilebilmektedir. Fakat bu arayüz Hexapod’un gerçek zamanlı kontrolü veya farklı programlara entegrasyonu için elverişli değildir.



Şekil 3. 4 Hexapod kontrol paneli. Bu panel üzerinden Hexapod’un hareketleri manuel olarak kontrol edilebilmektedir.

Bir sonraki aşamada mikro robotun kontrolü için gerekli manyetik alanı oluşturacak olan mıknatıs düzeneğinin üretilmesine geçilmiştir. Bunun için daha önceki çalışmalarımızda yaptığımız tasarımlara uygun bir şekilde mıknatıs yatağının üretimi yapılmıştır. Üretim aşamasında Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı bünyesinde bulunan üç boyutlu yazıcı kullanılmıştır. Üretilen mıknatıs yuvasına ait bir görüntü Şekil 3.5' de görülmektedir.



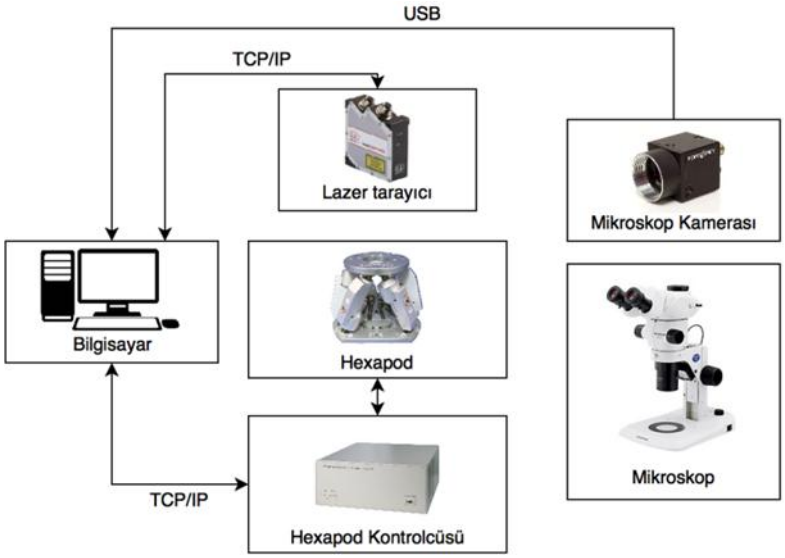
Şekil 3. 5 Mıknatısların taşınması için üretilen mıknatıs yatağı. Bu parça Hexapod tablasına M6 cıvatalar aracılığıyla bağlanmıştır ve mikro robotun hareketini sağlayacak manyetik alanı oluşturmaktadır.

Daha sonra mıknatıslar üretilen bu mıknatıs yatağına, daha önce yapılan çalışmalarda tasarlandığı şekilde yerleştirilmiştir. Buna göre bütün mıknatısların kuzey kutupları yatağın orta noktasına doğru bakmaktadır. Mıknatıs yatağının Hexapod'a sabitlenmesi için daha önce de bahsedildiği gibi M6 cıvatalar kullanılmıştır.

Yapılan bu deney sistemini kurma çalışmaları sonucunda mikro robotun sabit mıknatıslarla kontrol edilmesi için kullanılacak olan düzenek yukarıda da anlatıldığı gibi kurulmuş ve test edilmiştir. Kurulmuş olan düzenekte :

- Sabit mıknatısların 6 eksende kontrol edilmesi için kullanılan bir hexapod sistemi (bilgisayar kontrolü ile)
- Robot kolunu taşıyan bir su haznesi (mikro akışkan çip üretimi pahalı olduğundan bu aşamada deneyler su haznesinde gerçekleştirmektedir.)
- Su haznesi içinde sabit mıknatısların oluşturduğu manyetik akı aracılığıyla kontrol edilen nikel kaplı polipropilen bir mikro robot ve sadece nikelden oluşan bir robot kullanılmıştır.

Kullanılan sisteme ait bir diyagram Şekil 3.6'da görüldüğü gibidir.



Şekil 3. 6 Sabit mıknatıslar kullanılarak oluşturulan kontrol sistemi. Mikro robotun kontrolü, konumları Hexapod aracılığıyla kontrol edilen sabit mıknatısların oluşturduğu manyetik akı aracılığıyla kontrol edilmektedir. Konum geri beslemesi ise dikey eksende lazer tarayıcı aracılığıyla, yatay eksende mikroskop aracılığıyla yapılmaktadır.

Nikel kaplı polypropilen mikro robot, yoğunluğu suyun yoğunluğundan düşük olacak şekilde tasarlanmıştır. Tez çalışmasında amaçlandığı üzere, sıvının içerisinde yüzer haldedir. Sabit mıknatıslarla beraber robot üzerine etkiyen başlıca kuvvetler; manyetik kuvvet, yer çekimi kuvveti ve kaldırma kuvvetidir. Dikey eksende robota yukarı yönde etki eden kaldırma kuvvetinin diğer kuvvetlere baskın olması durumunda robot yukarı çıkmakta ve su haznesinin üst yüzeyine yapışmaktadır. Aşağı yönde etki eden manyetik kuvvet ve yer çekimi kuvvetinin baskın olması durumunda ise robot su haznesinin alt yüzeyine yapışmaktadır. Her iki durumda da robota etki eden sürtünme kuvveti robotun hareket kabiliyetini kısıtlamaktadır. Mikro robotun alt veya üst yüzeye yapışık olması durumunda üzerine etki eden sürtünme kuvvetinden dolayı robot Hexapod'un yatay yöndeki hareketlerini geriden takip etmektedir. Bu durum, oluşturulan sistem üzerinde Şekil 3.7'de mikro robotun alt veya üst yüzeye yapışık olması durumunda üzerine etki eden sürtünme kuvvetinden dolayı robot mıknatısın hareketini bir miktar geriden takip eder. Çünkü mıknatısın ileri her hareketi robot kolu üzerinde oluşan vektörel ileri kuvvetlerinin sürtmeyi yenmeyi çalışması hareket çözünürlüğünü düşürücü etki yapmaktadır. Bu durum literatürde ölü bölge (deadband) olarak adlandırılır.

Gözlemlenen bu durum robotun etkisi altında hareket ettiği manyetik alan gradyanının büyüklüğünün sürtünme kuvvetini yenmek için yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır. Robot mıknatıs merkezinden uzaklaştıkça manyetik alan gradyanının büyüklüğü artmakta ve sürtünme kuvvetini aşabilecek noktaya ulaştıktan sonra robot mıtısı takip etmeye başlamaktadır. Robotun mıknatıs takip etmesi için gerekli olan bu mesafe ölü bölge (dead zone) dir. Deneylerimizde bu mesafe Şekil 3.7'de görüldüğü gibi $6.97mm$ olarak ölçülmüştür.

Bu problemin aşılıp hareket kabiliyetinin geliştirilmesi için robotun suda asılı kalacak şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Fakat ferromanyetik bir manyetik eyleyicinin kullanılması durumunda robotun suda asılı kalması, marjinal kararlı bir durum teşkil etmektedir. Dolayısıyla, çalışmalarımız sonucunda aktif bir kontrol sisteminin kullanılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu durum, manyetik alan etkisinin lineer olmayan etkisinin yoğun olarak yaşandığı bir bölgedir. Mıknatıs robot koluna göre yukarı hareket ettiğinde, robot koluna etkiyen kuvvetler aniden aşağıya çekip yüzeye yapışmasına sebep olmamaktadır. Tam tersi durumda, robot kolu kaldırma kuvvetinin etkisi ile aniden su yüzeyine doğru yukarı yönlü bir hareket sergilemektedir.

Yukarıda belirtilen sebepler bizi ikinci bir çözüme yönlendirmiştir. Sıvı içinde mekanik temassız olarak manyetik yastıklanan mikro-robot kolunun başlangıç konumunun hassas olarak verilmesi ve ilk yastıklama esnasında ortaya çıkması muhtemel konum belirsizliklerinin ortadan kaldırılması için elektro mıknatıs temelli bir konumlandırma sisteminin kullanılabileceği görülmüştür. Elektromıknatıs ve sabit mıknatısların bileşiminden oluşan yastıklama sisteminin kapalı çevrim pozisyon kontrolünün yapılması planlamıştır. Bu bağlamda, kapalı çevrim kontrol yapısının yüksek çevrim hızında bilgisayar üzerinde gerçeklenmesini mümkün kılan, kontrol sinyallerini analog formda üreten, sensörlerden analog ve dijital ölçüm bilgisi alan, bir veri işleme kartının (DAQ kartı) kullanılmasına karar verilmiştir. Devam eden deneylerimiz bu elektromanyetik yastıklama üzerine kurgulanmıştır.

3.2 Elektromıknatısla Geliştirilen Deney Düzeneği

Robotun su haznesi içerisinde herhangi bir kontrol mekanizmasına sahip değil iken kaldırma kuvvetinden dolayı su haznesinin üst yüzeyinde temas halinde bulunmaktadır.

Bu durumda kaldırma kuvvetine ek olarak adhezyon kuvveti de robotun üst yüzeyden ayrılmasını engelleyici bir etken olmaktadır. Tasarlanacak olan elektromıknatısın bu iki kuvvetin etkisini yenebilecek güçte olması gerekmektedir. Sistemde kullanılan elektromıknatısın tasarımı bu şart göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

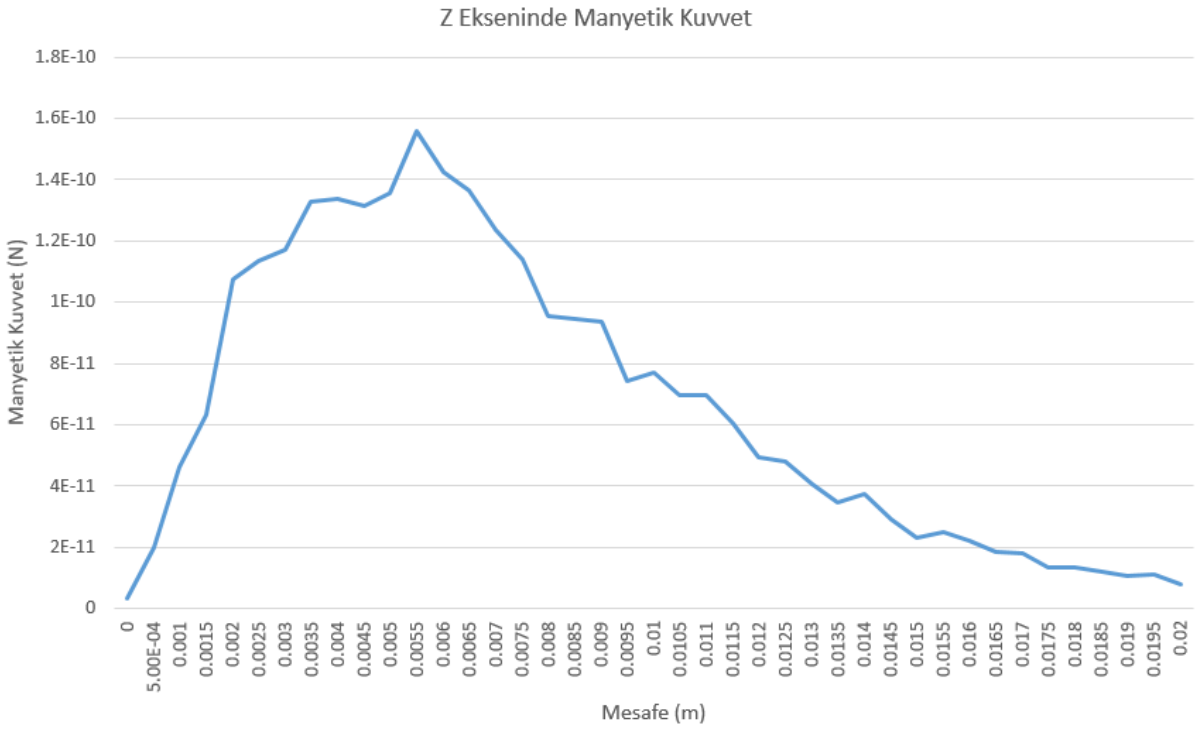
Elektromıknatıs düzeneğini önemli ölçüde etkileyen parametrelerden ikisi, elektromıknatısın sarım sayısı ve kullanılan bobin telinin çapıdır. Bobin telinin yarıçapı, tel üzerinde taşınabilecek akımı belirleyen en önemli parametredir ve robot üzerinde oluşan manyetik kuvvet bu akım değeriyle doğru orantılıdır. Tel yarıçapı ayrıca telin oluşturacağı direnci ve dolayısıyla oluşan ısıyı direk olarak etkilemektedir. Sistemimizde kullanılmak için uygun görülebilecek bazı çapta bobin telleri için azami akım şiddeti ve direnç değerleri Çizelge 3.2'de görüldüğü gibidir. Bu parametreler göz önünde bulundurulduğunda tel çapının büyük tutulmasının avantajlı olduğu anlaşılmaktadır. Fakat büyük çaplı bobin teli kullanılması, atılabilecek sarım sayısını kısıtlamaktadır. Sarım sayısı ise robot üzerinde oluşan manyetik kuvvetin doğru orantılı olduğu bir başka parametredir. Dolayısıyla elektromıknatısta kullanılan bobin teli çapı ile sarım sayısının optimize edilmesi önem arz etmektedir.

Çizelge 3. 2 Sistemde kullanılabilecek boyutlardaki bazı bobin tellerinin teknik özellikleri. Bobin telinin çapının artması beklenildiği gibi direncini azaltıp akım kapasitesini artırmaktadır. Fakat büyük boyutlu ir bobin teli ile atılabilecek sarım sayısı azalacaktır. Dolayısıyla bobin teli boyutunun optimize edilmesi gerekmektedir.

AWG	**Çap (mm)**	**Direnç ($m\Omega/m$)**	**Akım kapasitesi ($60^{0\prime}de$)**
32	0.202	538.3	0.53
30	0.255	338.6	0.86
28	0.321	212.9	1.4
26	0.405	133.9	2.2

Bunun yanı sıra elektromıknatısın boyu ve çapı da sarım sayısını doğrudan etkileyen parametreler oldukları için dikkatli bir şekilde tasarlanması gereken parametreler olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Elektromıknatısın çok büyük boyutlarda olması direncinin artırmakta ve dolayısıyla belirli bir voltaj altında üzerinden geçecek olan akımı azaltmaktadır. Bu durum da göz önünde bulundurulduğunda elektromıknatısın boyunun fazla uzun olmasının verimsiz bir sistem teşkil ettiği anlaşılmaktadır. Çünkü

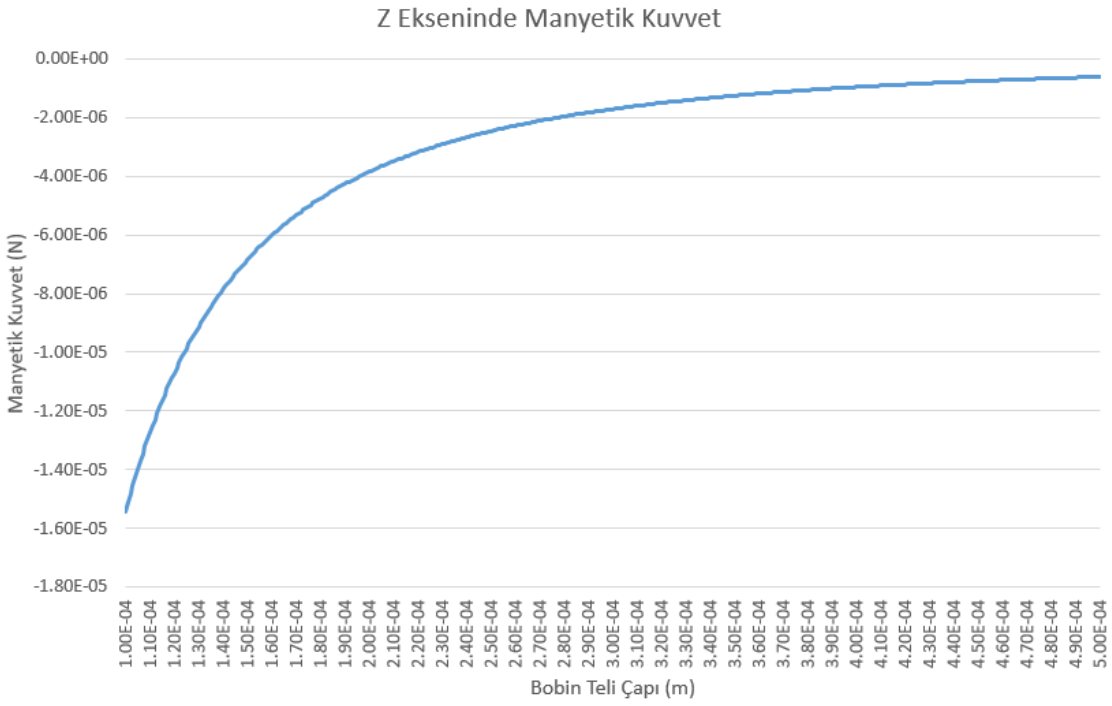
böyle bir durumda mıknatısın alt kısımlarında kalan sarımların manyetik kuvvete katkısının az olduğu görülmektedir. 1 cm çapında, ortasında demir çekirdek olan tek sarımlı bir bobin telinin merkez ekseni boyunca $1mm$ çağında bir küre üzerinde oluşturduğu manyetik kuvvetin dikey eksendeki mesafeye göre değişiminin COMSOL ortamında benzetiminden elde edilen sonuç Şekil 3.8'de görüldüğü gibidir. Bu grafikten görüldüğü gibi, sarım ile robot arasındaki mesafenin $1.5cm$ üzerinde olduğu durumlarda, oluşan manyetik akının robot üzerinde oluşacak manyetik kuvvete katkısı önemsenmeyecek seviyelere düşmektedir. Dolayısıyla elektromıknatıs boyunun $1.5cm$ olması uygun görülmüştür.



Şekil 3. 8 Tek sarımın, merkez eksenin üzerinde bulunan mikro robota uyguladığı manyetik kuvvetin dikey eksendeki mesafeye göre değişimi. Aradaki mesafenin 1.5cm üzerine çıkmasıyla manyetik kuvvetin önemsenmeyecek seviyelere düştüğü görülebilmektedir. Dolayısıyla elektromıknatıs boyunun 1.5cm üzerinde tutulması verimsiz bir durum oluşturmaktadır.

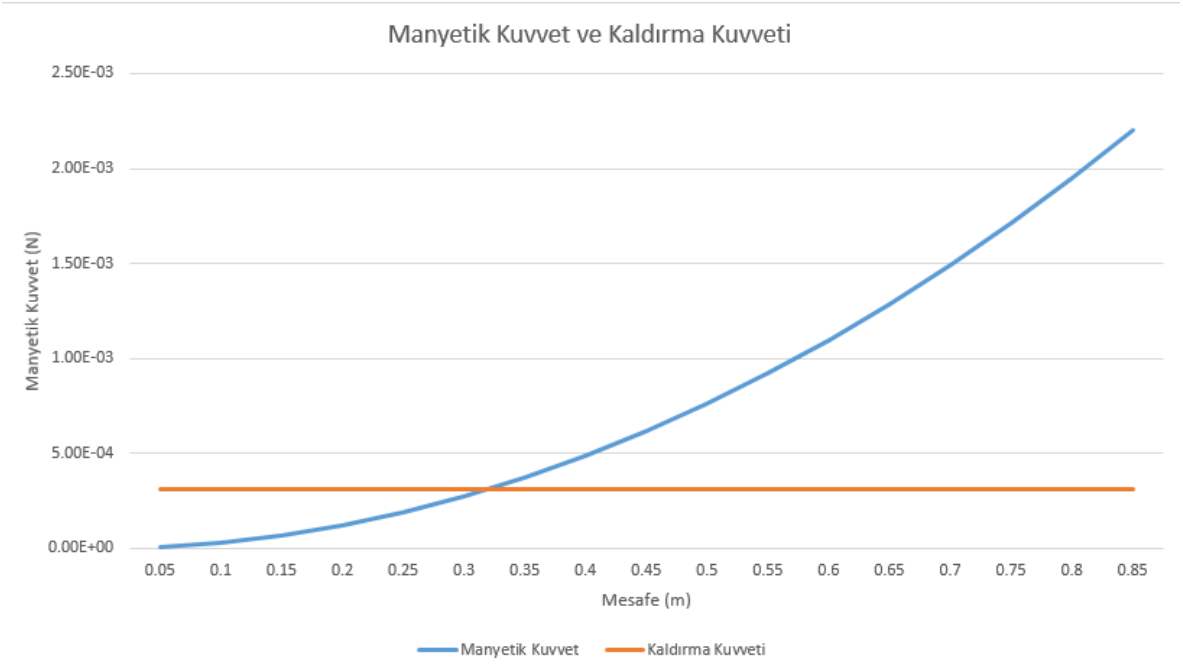
Elektromanyetik eyleyici tasarımına dair tüm bu unsurlar göz önünde bulundurularak, uygun bir elektromıknatıs tasarlanması için sistem COMSOL ortamında analiz edilmiştir. Oluşturulan COMSOL modelinde mikro robot, gerçek sisteme uygun olarak üstte polipropilen ve altta nikel olacak şekilde iki katman şeklinde modellenmiştir. Bu

katmanların kalınlıkları sırasıyla $250\mu m$ ve $0.5\mu m$'dir. Elektromıknatıs COMSOL'da 'Çok Sarımlı Bobin' fiziği kullanılarak bakır telden olacak şekilde tasarlanmıştır. Modelde elektromıknatıs çapı ve bobin teli çapı parametrize edilerek en uygun değerler tespit edilmeye çalışılmıştır. Sarım sayısı ve telin taşıdığı akım değerleri bobin teli çapı ve elektromıknatıs boyutlarından yola çıkılarak hesaplanmıştır. Bu şekilde oluşturulan model kullanılarak farklı bobin teli çapları için robot üzerinde oluşan manyetik kuvvetin elektromıknatıs çapına göre değişimleri incelenmiştir. Manyetik kuvvetin elektromıknatıs çapına göre doğrusal olarak arttığı gözlenmiştir. Fakat elektromıknatısın makul boyutlarda olması istendiği için robotun kontrolü için yeterli kuvveti sağlayabilecek çapta bir elektromıknatısın kullanılması yeterli görülmüştür. Kullanılan bobin teli çapına göre dikey eksende elde edilen manyetik kuvvetin değişimi Şekil 3.9'da görülmektedir. Yapılan analizler sonucu elde edilen verilerden yola çıkılarak $0.3mm$ çapında bir bobin teli ile $5mm$ çapında bir elektromıknatısın kullanılması uygun görülmüştür.



Şekil 3. 9 Kullanılan bobin teli çapına göre mikro robot üzerinde oluşan dikey manyetik kuvvetin değişimini gösteren grafik. Bobin telinin 0.3mm'nin üzerine çıkarılmasının manyetik kuvvetin artmasına önemli bir katkısı olmayacaktır. Dolayısıyla 0.3mm çapta bir bobin teli kullanılması uygun görülmüştür.

Cevaplandırılması gereken bir başka önemli soru tasarlanan elektromıknatısın, robotu su yüzeyinde kalmasını saplayan kaldırma kuvvetini yenip yenemeyeceğidir. Gerçek sistem üzerinde denemelere başlamadan önce yine bir sonlu elemanlar modeli üzerinden bu sorunun cevabı aranmıştır. Robotun hareketlerinin gerçekçi bir şekilde benzetiminin yapılabilmesi için bu model mekanik, manyetik ve akışkan kuvvetlerinin etkilerinin beraber incelenebileceği şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 3. 10 Manyetik kuvvet ile kaldırma kuvvetinin elektromıknatıs üzerinden geçen akım değerine göre grafiği. Elektromıknatıs akımının 0.33A değerinin üzerine çıkması durumunda mikro robotun aşağı doğru kaymaya başlayacağı görülmektedir.

Şekil 3.10' da dikey yöndeki kaldırma kuvveti ve manyetik kuvvet ve yerçekimi kuvveti, elektromıknatıs üzerinden geçen akıma karşı çizdirilmiştir. Bu şekilden elektromıknatıs akımının 0.33A değerinin üzerinde olması durumunda robotun aşağı doğru kaymaya başlayacağı görülmektedir.

3.2.1 Sistemin Dinamik Modeli

Robotun, elektromanyetik kuvvet altında hareketinin öngörülebilmesi için sistemin bir dinamik modelinin çıkarılması gerekmektedir. Bu kısımda tasarlanan sistemin önemli karakteristiklerini ortaya koyan bir dinamik model geliştirilecektir. Bu model çıkarılırken robotun, PMMA katmanlarında oluşturulmuş, içi saf su ile dolu bir mikro

akışkan kanal içinde yüzdüğü varsayılacaktır. Böyle bir durumda robot üzerine etki eden başlıca kuvvetler kaldırma kuvveti, yerçekimi kuvveti, akışkan direnci, yüzey kuvvetleri ve manyetik kuvvetler olacaktır. Robotun suda asılı durum için sürtünme ve elektrostatik kuvvet gibi yüzey kuvvetleri, manyetik kuvvetlere oranla küçük olacakları için ihmal edilebilirler. Diğer kuvvetlerin modellenmesi gerekmektedir.

Manyetik Kuvvetler

Manyetik alan ve manyetik akı arasındaki ilişki şu şekilde yazılabilir.

$$B = \mu_0(\boldsymbol{H} + \boldsymbol{M}) \tag{3.1}$$

Burada μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği, $\boldsymbol{H}$ manyetik alanı ve $\boldsymbol{M}$ manyetizasyon vektörünü ifade etmektedir. Lineer izotropik bir ortam için manyetizasyon, manyetik alan ve manyetik akı arasındaki ilişkiler

$$\boldsymbol{M} = \chi \boldsymbol{H} \tag{3.2}$$
$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{\mu_0}(\mathbf{1} + \boldsymbol{\chi})\boldsymbol{H} = \boldsymbol{\mu_0}\boldsymbol{\mu_r}\boldsymbol{H} \tag{3.3}$$

şeklindedir. Burada χ ve μ_r sırayla manyetik yatkınlık ve manyetik geçirgenlik katsayılarıdır.

Ferromanyetik mir malzeme üzerine etki eden manyetik kuvvet potansiyel enerjinin (U) gradyanı aracılığıyla bulunabilir.

$$F_m = -\nabla \mathrm{U} = \nabla(\mathbf{mB}) = (\boldsymbol{\nabla}\mathbf{m})\mathbf{B} + \mathbf{m}\boldsymbol{\nabla}\mathbf{B} \approx (\mathbf{m}\boldsymbol{\nabla})\mathbf{B} \tag{3.4}$$

Manyetik dipol momenti $\boldsymbol{m}$, $\boldsymbol{m} = V\boldsymbol{M} = V_\chi \boldsymbol{H}$ şeklinde yazılabilir. Burada V parçacığın hacmini göstermektedir. (3.3)'den görüldüğü gibi, manyetik alan ile manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki $\mu_0\mu_r$ şeklinde bir sabitle belirlenmektedir. (3.3)'ün (3.4)'de yerine yazılmasıyla manyetik kuvvet

$$\boldsymbol{F_{mag}} = \frac{V\chi}{\mu_0\mu_r}(\boldsymbol{B}.\boldsymbol{\nabla})\boldsymbol{B} \tag{3.5}$$

şeklinde bulunur. Bu denklemden, robotun üzerinde doğrusal bir kuvvet oluşabilmesi için bir manyetik alan gradyanına ihtiyaç vardır. Mikro robotun pozisyonu, içinde bulunduğu manyetik alanın gradyanının mikro robota göre konumlandırılması ile kontrol edilebilir.

Akışkan Kuvvetleri

İçinde bulunduğu akışkan tarafından mikro robotun hareketine karşı gösterilen direnç robotun doğrusal hızının karesi ile orantılıdır ve şu şekilde ifade edilebilir.

$$F_d = \frac{1}{2} c_d \rho_f A v^2 \tag{3.6}$$

Burada ρ_f sıvının yoğunluğunu, A robotun kesit alanını, v robotun göreli hızını ve c_d sürüklenme katsayısını ifade etmektedir. Sürüklenme katsayısı akışkanın Reynolds sayısına bağlı bir parametredir ve genellikle deneysel olarak tespit edilmektedir.

Sürüklenme kuvvetinin yanında robot üzerine etki eden bir kaldırma kuvveti olacaktır. Bu kuvvet şu şekilde ifade edilebilir.

$$F_b = V_r(\rho_r - \rho_f)g \quad (3.7)$$

Burada V_r robotun hacmi, ρ_r robotun yoğunluğu ve ρ_f akışkanın yoğunluğunu ifade etmektedir. Kaldırma kuvveti, yerçekimi kuvveti ile zıt yönde etki ediyor olacaktır.

Hareket Denklemleri

Tespit edilen bu kuvvet ifadeleri ışığın mikro robotun doğrusal eksenlerdeki hareket denklemleri şu şekilde yazılabilir.

$$m_r\ddot{x} = F_{mag_x} + \frac{1}{2}C_d\rho_f A_x\dot{x}^2 \quad (3.8)$$

$$m_r\ddot{y} = F_{mag_y} + \frac{1}{2}C_d\rho_f A_y\dot{y}^2 \quad (3.9)$$

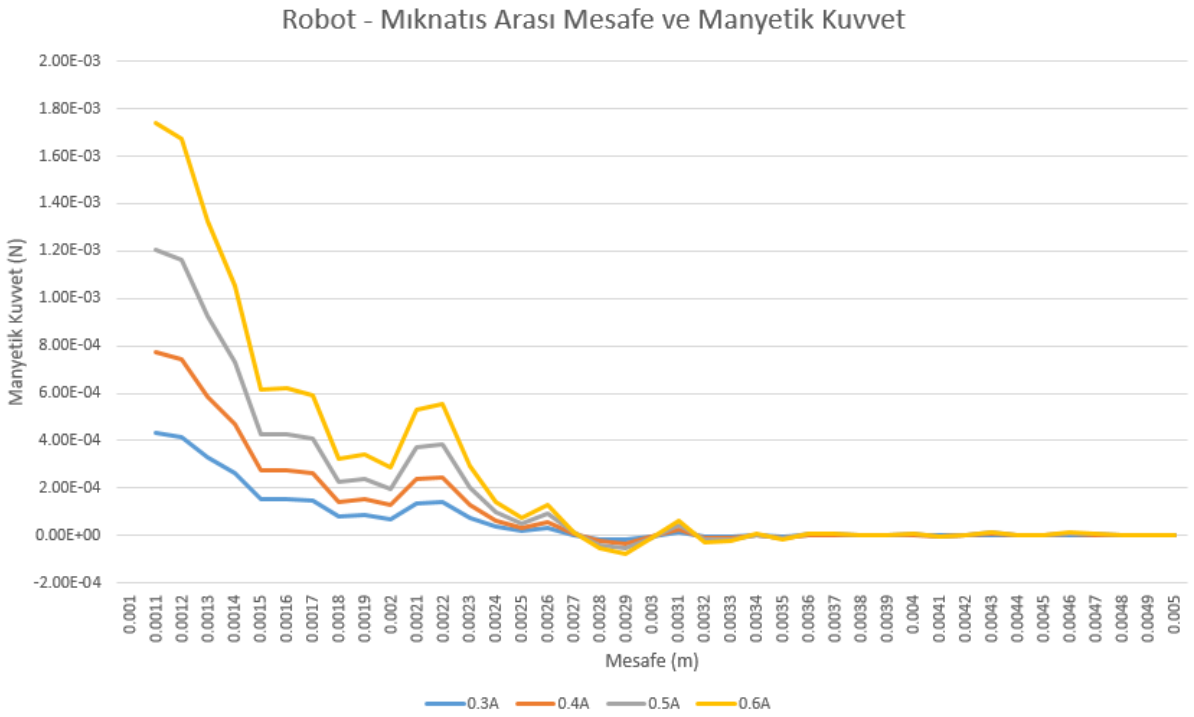
$$m_r\ddot{z} = F_{mag_z} + \frac{1}{2}C_d\rho_f A_z\dot{z}^2 - V_r\left(\rho_r - \rho_f\right)g + m_r g \quad (3.10)$$

Mikro robotun yüksek derecede kararsız bir davranış sergilediği ve aktif bir kontrol sistemine ihtiyaç duyduğu eksen dikey eksendir. Bu yüzden dikey eksendeki hareketinin iyi analiz edilmesi ve karakterize edilmesi gerekmektedir. Bu eksendeki hareketi formülize eden (3.10)'da F_{mag_z} şeklinde gösterilen dikey eksendeki manyetik kuvvet ifadesi doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir ve analitik ifadesinin çıkarımı zor olan bir parametredir. Dolayısıyla bu kuvvetin sonlu elemanlar modeli üzerinden karakterize edilmesi uygun görülmüştür. Bu doğrultuda, oluşturulan COMSOL modeli kullanılarak farklı akım değerleri için elektromıknatısın robot üzerinde oluşturduğu kuvvetin dikey eksendeki mesafeye göre grafiği aşağıdaki gibi çıkarılmıştır.

Bu grafikler üzerine logaritmik bir fonksiyon uydurularak dikey eksendeki manyetik kuvvet, $F_{mag_z} = -I \times 10^{-3}\ln(z)$ şeklinde karakterize edilebilir. Buradan, dikey robotun eksendeki dinamiğinin son hali

$$m_r\ddot{z} = I \times 10^{-3}\ln(z) + \frac{1}{2}C_d\rho_f A_z\dot{z}^2 - V_r\left(\rho_r - \rho_f\right)g + m_r g \quad (3.11)$$

şeklinde yazılabilir. Burada I, elektromıknatıs üzerinden geçen akımı ifade etmektedir.



Şekil 3. 11 COMSOL modeli ile farklı akım değerleri için robot-mıknatıs arası mesafeye karşılık elde edilen manyetik kuvvet değerleri. Mesafe arttıkça manyetik kuvvetin logaritmik bir karakteristik ile azaldığı görülmektedir.

3.2.2 Elektromıknatıs Sarımı

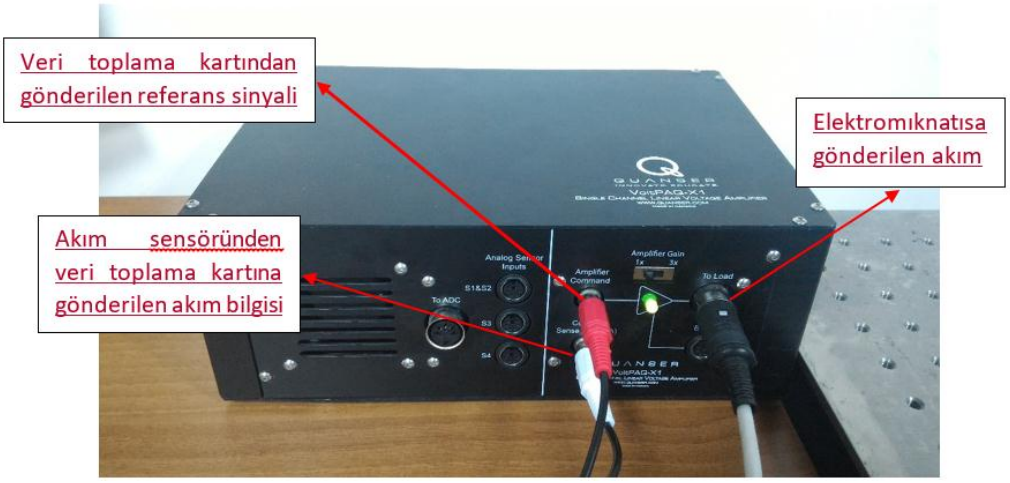
Bir önceki bölümde belirtildiği şekilde tasarlanan elektromıknatısın daha sonra üretim şamasına geçilmiştir. Elektromıknatıs çekirdeği olarak $2cm$ uzunluğun bir M6 cıvata kullanılmıştır. Daha sonra bu cıvatanın etrafına $0.3mm$ çapında bobin teli ile $1.5cm$ uzunluğunda ve $5cm$ çapında bir elektromıknatıs sarımı atılmıştır. Elektromıknatısa ait bir görüntü şekilde görüldüğü gibidir. Bu elektromıknatısın iç direnci 35.1Ω şeklinde ölçülmüştür.

Elektromıknatısın mikro robot üzerinde oluşturacağı manyetik kuvvetin kontrol edilebilmesi için elektromıknatıs üzerinden geçen akımın kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu ihtiyacın karşılanması için Quanser VoltPAQ-X1 model bir doğrusal yükselteç temin edilmiştir. Bu doğrusal yükseltece ait bazı özellikler Çizelge 3.3'de görüldüğü gibidir. Doğrusal yükseltece ait bir görüntü ise Şekil 3.9'da görüldüğü gibidir. $-10V$ ile $10V$ arası bir referans sinyaline bağlı bir akım çıkışı veren bu yükseltecin kontrol edilebilmesi için bir veri toplama kartının da beraberinde kullanılması

gerekmektedir. Bu ihtiyaca binaen Quanser Q2-USB model bir veri toplama kartı temin edilmiştir. Bu kart bilgisayardan gönderilen komutları uygun voltajda referans sinyaline dönüştürüp bir RCA kablosu doğrusal yükseltece gönderecektir. Daha sonra doğrusal yükselteç aldığı referans sinyaline uygun bir akım üretecek ve bu akımın elektromıknatıs üzerinden akmasını sağlayacaktır. Aynı zamanda doğrusal yükselteç üzerindeki akım sensörü elektromıknatıs üzerinden geçen akımı ölçecek ve yine bir RCA kablosu üzerinden veri toplama kartına gönderecektir. Daha sonra bu akım bilgisi veri toplama kartı üzerinden bilgisayar tarafından okunabilecektir. Elektromıknatıs üzerinden geçen akımın bu şekilde kontrole edilmesine olanak sağlayan bu sistem, 3.1 başlığında bahsedilen lazer tarayıcı sistemi ile birleştirilip robotun dikey eksende konum geri beslemeli bir şekilde kontrol edilmesi için kullanılabilmektedir.

Çizelge 3.3: Sistemde kullanılan doğrusal yükseltece ait bazı teknik özellikler

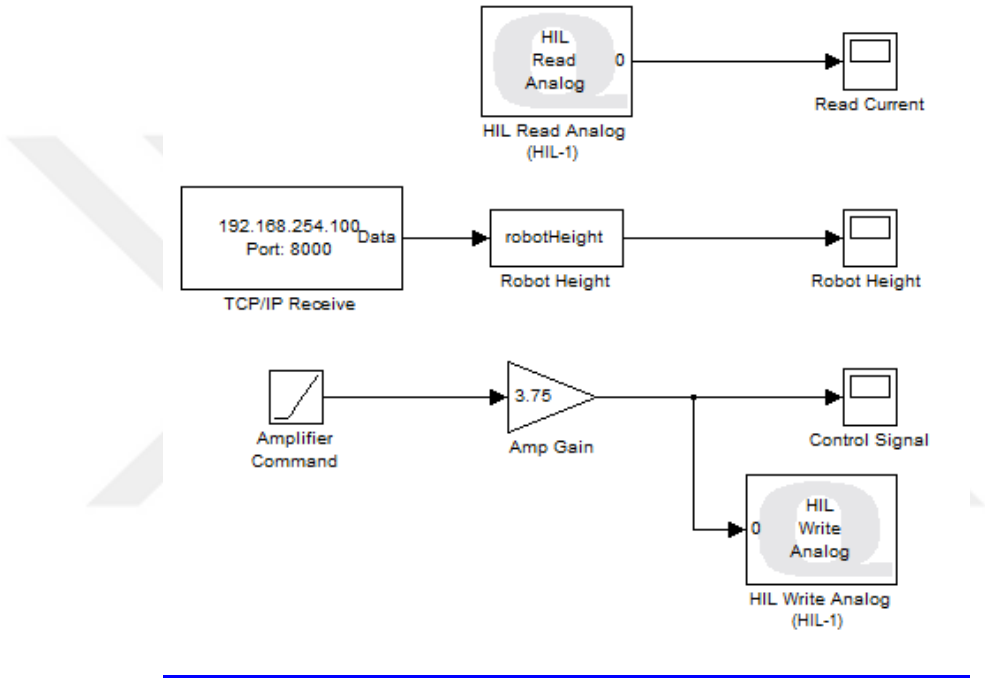
Sağlanabilen güç	24V @ 4.16A'e kadar
Referans sinyali	-10V, 10V arası
Voltaj kazancı	1 veya 3
Akım sensörü kazancı	1 A/V



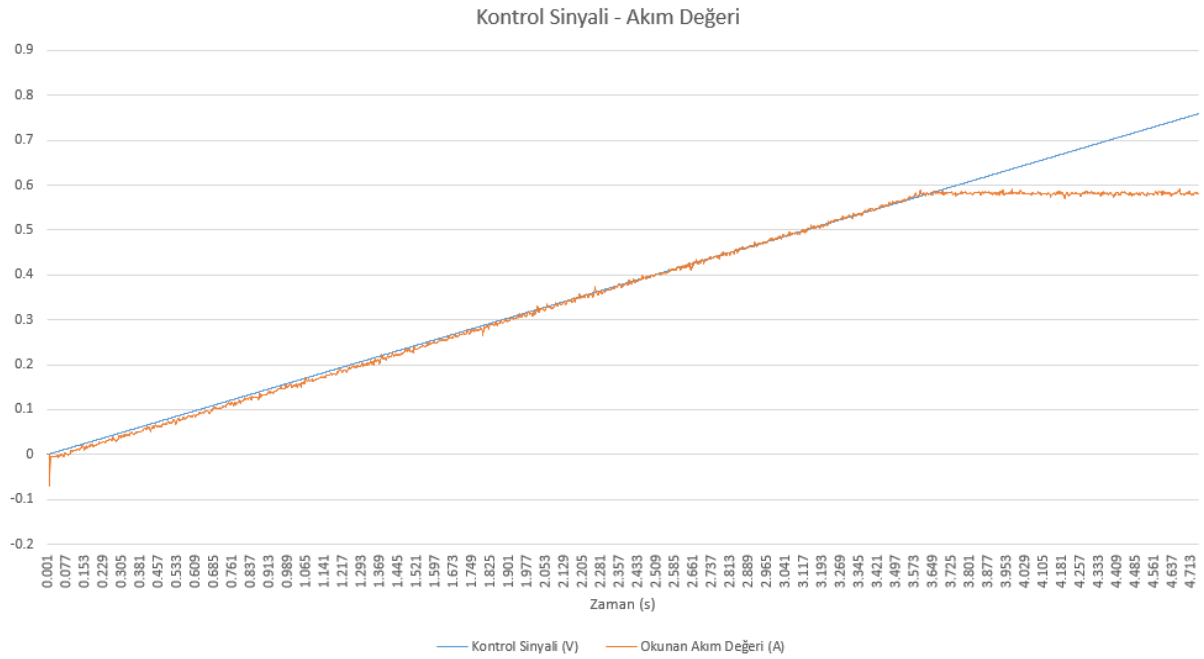
Şekil 3. 13 Sistemde kullanılan doğrusal yükseltece ait bit görüntü. Doğrusal yükselteç veri toplama kartından gönderilen referans sinyaline göre elektromıknatıs üzerinden geçen akımı kontrol etmektedir. Aynı zaman üzerindeki akım sensörü ile bu akımın gerçek değeri hakkında geri besleme yapabilmektedir.

3.3 Levitasyon Doğrulaması

Elektromıknatıs düzeneğinin bilgisayar üzerinden kontrolü QUARC adı verilen bir yazılım aracılığıyla yapılmaktadır. QUARC yazılımı, Quanser firmasının ürünlerinin bilgisayar üzerinen kontrolleri kolaylaştırmak amacıyla oluşturulmuş bir yazılım paketidir. MATLAB/Simulink ortamı için ve .NET platformu için eklentileri mevcuttur. Simulink eklentisi kullanılarak, elektromıknatısın açık kaynak kontrolü için oluşturulan model Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3. 14 Elektromıknatısın açık kaynak kontrolü için oluşturulmuş Simulink modeli. QUARC eklentisi aracılığıyla kolaylıkla Simulink üzerinden elektromıknatısa gönderilecek olan akım kontrol edilebilmekte ve akım sensöründen alınan değer okunabilmektedir.

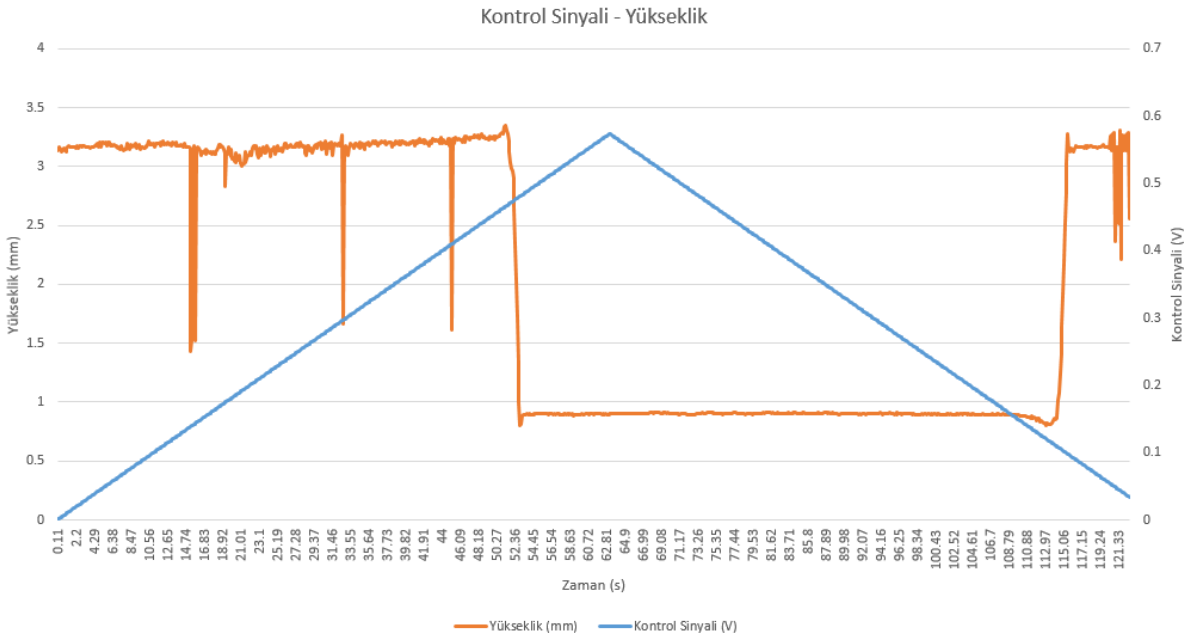


Şekil 3. 15 Veri toplama kartına gönderilen kontrol komutuna karşılık akım sensöründen okunan akım değeri (Akım, çok yüksek değerleri aşmasını engellemek amacıyla bir noktadan sonra sınırlandırılmıştır)

Oluşturulan bu Simulink modeli üzerinde, veri toplama kartına analog sinyal gönderilmesini sağlayan 'HIL Write Analog' bloğu kullanılarak akım kontrol sinyali gönderilmiş ve buna karşılık akım sensöründen gelen verinin okunmasını sağlayan 'HIL Read Analog' bloğundan veri alınmıştır. Bu iki sinyal Şekil 3.15'de görüldüğü gibi birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu grafikten de anlaşılabileceği doğrusal yükselteç gönderilen kontrol sinyalini başarılı bir şekilde takip edebilmektedir.

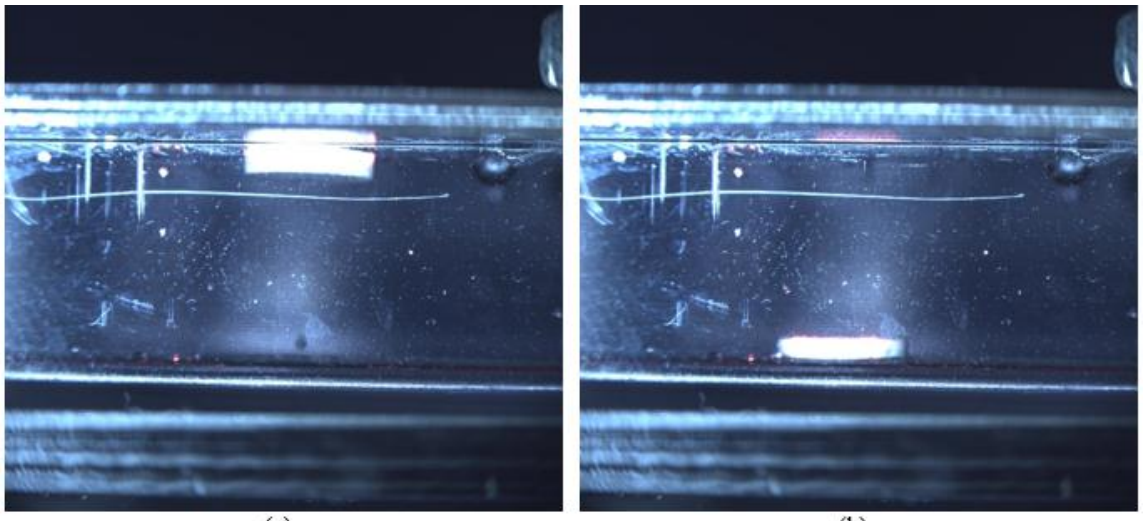
Bir sonraki adımda elektromıknatısın mikro robotu aşağı çektiği akım tespit edilmiştir. Bunun için lazer sensöründen TCP/IP üzerinden gönderilen veri ayrıştırılıp algoritmalar yardımıyla robotun yüksekliği tespit edilmiştir. Elektromıknatısa gönderilen kontrol sinyaline karşı lazer sensöründen okunan robot yüksekliği değeri Şekil 3.16'da görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır. Bu grafik incelendiğinde elektromıknatısa gönderilen akımın, 0.48A değerini aştığı zaman robotun aşağı doğru hızla kaymasına sebep olduğu görülecektir. Daha sonra kontrol sinyali tekrar 0.13A değerine döndüğü zaman robotun yine hızla üste doğru kaydığı görülecektir. Elektromıknatısa gönderilen kontrol sinyalinin, robotun aşağı inmesini ve yukarı çıkmasını sağladığı değerler arasında böyle bir farkın olması robotun aşağı doğru inerken alt yüzeye dokunmadan önce kontrol edilmesini gerektirmektedir. Fakat grafik tekrar incelendiğinde robotun çok hızlı bir

şekilde aşağı indiği görülecektir. Bu yüzden mikro robotun hareketlerine çok hızlı yanıt verebilen bir kontrolcünün geliştirilmesi gerekmektedir.

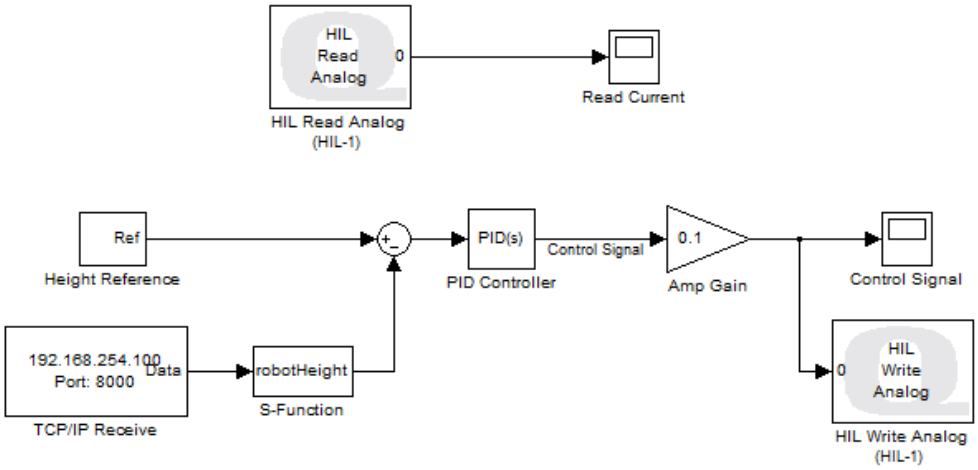


Şekil 3. 16 Elektro mıknatısa gönderilen kontrol sinyaline karşılık, robotun lazer sensöründen okunan yüksekliğinin grafiği. Robot üst yüzeydeyken, 0.48A değerlerine ulaşıldığında çok hızlı bir şekilde aşağı inmektedir. Alt yüzeye indikten sonra ise 0.13A değerlerine geri dönüldüğünde yine hızlı bir şekilde üste çıkmaktadır. Bu yüzden robotun hareketine oldukça hızlı yanıt verebilen bir kontrol mekanizmasının geliştirilmesi gerekmektedir.

Mikro robotun su haznesi içinde elektromıknatısın etkisi ile aşağı ve yukarı hareket etmesine ait görüntüler aynı zamanda mikroskop ile de yukarıda görüldüğü gibi görüntülenmiştir. İki durum arasında mıknatıs ile robot arasındaki mesafenin değişiyor olması robotun hareketi ile gönderilmesi gereken kontrol sinyali arasında ters bir ilişki yaratmaktadır. Bu durum sistemin kontrolünü zorlaştıran bir etkendir.



Şekil 3. 17 Mikro robotun su haznesi içinde (a)yukarı ve (b)aşağı hareketinin mikroskop ile çekilmiş görüntüleri. İki durum arasında mıknatıs ile robot arasındaki mesafenin değişiyor olması robotun hareketi ile gönderilmesi gereken kontrol sinyali arasında ters bir ilişki yaratmaktadır. Bu durum sistemin kontrolünü zorlaştıran bir etkendir.



Şekil 3. 18 Mikro robotun kontrolü için Simulink üzerinde oluşturulan PID kontrol modeli. Lazer tarayıcıdan okunan robot yüksekliği değeri geri besleme sinyali olarak kullanılmış ve daha önceden tespit edilen bir referans yükseklik değeri ile karşılaştırılarak sistemdeki hata hesaplanmıştır.

Mikro robotun su haznesi içinde dengelenebilmesi için gerekli olan kontrol sistemi ihtiyacını karşılamak üzere Simulink üzerinde bir PID kontrol modeli oluşturulmuştur. Simulink içinde bulunan 'PID Kontrolcü' bloğu kullanılarak oluşturulan bu model Şekil 3.12'de görüldüğü gibidir.

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüksek lisans tez çalışmasında sağlık sektöründe sıkça kullanılan mikro robot kolların üzerine alternatif bir yöntem geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Dizayn-simülasyon, üretim ve deney düzeneği olarak 3 farklı aşaması olan bu çalışmada sonuç olarak 2 farklı deney düzeneği kurulmuş ve elde edilen sonuçları karşılaştırma imkanı bulunmuştur. Çalışmamızda literatürde ilk kez sıvıda kaldırma kuvveti ile levitasyon tekniği kullanılarak bir mikro robot kolunun hareketi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Böylece sıvı dolu bir kap içerisindeki mikro robot kolunun yüzeyle etkileşimi kesilerek sürtünme en aza indirilebilmiştir. Bu çalışmada ayrıca robot kolunun çeşitli geri besleme yöntemleri ile yüksek hassasiyette hareket kontrolü araştırılmıştır. Geliştirilen ve geliştirilmekte olan geri besleme algoritmaları ile mikroakışkan-çip içeresinde tam sistem otomasyonu sağlanması hedeflenmektedir.

Yüksek lisans tezinin giriş bölümünde tıp ve biyomedikal alanlarında yoğun olarak çalışılan tek hücre operasyonları (hücre-klonlama, yapay-dölleme, yapay-deri) veya tek hücreleri analizleri (kanser, anemi) gibi çalışmalar için inovatif çözümler geliştirebilecek mikro robotlar üzerine literatürdeki çeşitli çalışmalara örnekler verilmiştir. Çalışmanın ana fikri olan mikro-robot kolunun Lab-on-a-chip sistemler için literatürde ilk defa manyetik alanda, buoyant kuvvetinin etkisini kullanılarak hareket ettirilmesi, mikro-robot kolu buoyant kuvveti ile sıvı içinde sağlayacağı levitasyon sayesinde havada tutularak sürtünmemin azaltılması ve bu sayede yüksek hassasiyette hareket elde edilmesini sağlayacak hipotez ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bu hipotezin literatürdeki diğer çalışmalardan farkı ortaya koyulmuştur.

Tez çalışmasının 2. bölümünde mikro robot kolun üretimi ve deney sisteminin tasarlanması üzerine yapılan çalışmalar ortaya konulmuştur. Mikro robotun tasarımını yaparken batan hacmi artırarak kaldırma kuvvetinden maksimum düzeyde yararlanılmak amacıyla ölçüler belirlenmiştir. Mikro robotun levitasyonunu sağlamak amacıyla deney düzeneğinde kullanacağımız mıknatıs sisteminden maximum düzeyden yararlanmak için çeşitli senaryolar oluşturarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar ;

- 100 µm polisteren küreye etki eden sürüklenim kuvvetinin analizi (Çalışma sonucunda 100 µm ve altı partikülleri mikro-robot kolu ile manipüle etmek istenmektedir.)
- Manyetik kuvvetlerin mikro robot kol sistemine etkisinin analizleri (mıknatısların kuzey kutuplarının +Z yönünde olma, mıknatısların kuzey kutuplarının merkezden dışa doğru olma ve mıknatısların kuzey kutuplarının yatay konumda birbirlerine göre çapraz olma durumuna göre 3 farklı senaryo oluşturulmuştur.)
- Mikro robotun mikro akışkan kanal içerisindeki hareketinin analizi

Olarak 3 farklı analiz çalışması yapılmış ve buna göre mıknatısların konumlandırma sonucuna mıknatısların kuzey kutbunun merkezden dışarı baktığı pozisyon olarak karar verilmiştir.

Bir yandan nikel kaplı polimer mikro robot kolunun üretim çalışmaları devam ettirilmiştir. Araştırmalarımız sonucunda çalışmamıza en uygun polimer malzemenin PDMS olduğu görülmüştür. Bu polimer malzemenin kesim işlemi mikro hassasiyette mekanik işleme yöntemiyle olmak üzere özel bir firmaya hizmet karşılığı yaptırılmıştır. Daha sonra Merkez Laboratuvarda kendi imkanlarımızla akımsız nikel kaplama yöntemiyle mikro robotun yüzeyi kaplanmış ve manyetik bir hal almıştır.

Tez çalışmasının 3. bölümünde ise mikro robot kolu için temassız manipülasyon tekniğinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikle manyetik alanla (sabit mıknatıslarla) deney düzeneği oluşturulmuştur. Bu deney düzeneğinde hexapod sistemi (6 eksenli robot), mıknatıs yatağı, lazer tarayıcı, mikroskop - mikroskop

kamerası ve bilgisayar kullanılmıştır. Ancak mikro robotun su dolu kabın alt veya üst yüzeye yapışık olması durumunda üzerine etki eden sürtünme kuvvetinden dolayı robot Hexapod'un yatay yöndeki hareketlerini geriden takip etmektedir (deadband).

Bu problemin aşılıp hareket kabiliyetinin geliştirilmesi için robotun suda asılı kalacak şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Fakat ferromanyetik bir manyetik eyleyicinin kullanılması durumunda robotun suda asılı kalması, marjinal kararlı bir durum teşkil etmektedir. Dolayısıyla, çalışmalarımız sonucunda aktif bir kontrol sisteminin kullanılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu durum, manyetik alan etkisinin lineer olmayan etkisinin yoğun olarak yaşandığı bir bölgedir. Mıknatıs robot koluna göre yukarı hareket ettiğinde, robot koluna etkiyen kuvvetler aniden aşağıya çekip yüzeye yapışmasına sebep olmamaktadır. Tam tersi durumda, robot kolu kaldırma kuvvetinin etkisi ile aniden su yüzeyine doğru yukarı yönlü bir hareket sergilemektedir.

Mikro robotun suda asılı kalması durumunda, bu denge halini bozacak herhangi bir etken, robotun denge noktasından hızlıca uzaklaşmasına sebep olacaktır. Bu durum robotun hareketine özellikle dikey eksende hızlı cevap verebilen yüksek frekanslı bir hareket sisteminin kullanılması gerektiğini ortaya koymuştur. Robot kolunun denge noktasından ani çıkışı sırasında, tekrar denge noktasına getirecek bir aktif bir kontrolcü yapısı gerekliliği doğduğu gözlenmiştir. Çalışmanın bu safhasında görülen bu sorunun çözülmesi için iki metot ön plana çıkmaktadır. Birincisi, denge noktasının hızlı kazanımı için bir eğleyiciyi, hexapod sistemine entegre etmektir. Böyle bir eğleyicinin denge noktasındaki hızlı değişimi, yüksek doğrulukta geri kazanım özelliğine sahip olması gerektiği düşünüldüğünde, yüksek frekans özelliğinden dolayı piezoelektrik eyleyiciler karşımıza çıkmaktadır. Ancak bu eyleyiciler ile ilgili yapılan araştırmalar, PI ve Newport gibi üretici firmalar ile yapılan yazışmalar sonucunda, 1mm'lik bir mesafede yüksek hızda osilasyon kabiliyetine sahip piezoelektirk eğleyici bulunamamıştır. Satılan ürünlerin sadece 200-300 mikron arasında bunu sağladığı görülmüştür. Bu da deneylerin prototip aşamasında gerçeklenmesini zorlaştırmaktadır.

Yukarıda belirtilen sebepler çalışmayı ikinci bir çözüme yönlendirmiştir. Sıvı içinde mekanik temassız olarak manyetik yastıklanan mikro-robot kolunun başlangıç konumunun hassas olarak verilmesi ve ilk yastıklama esnasında ortaya çıkması

muhtemel konum belirsizliklerinin ortadan kaldırılması için elektro mıknatıs temelli bir konumlandırma sisteminin kullanılabileceği görülmüştür. Elektromıknatıs ve sabit mıknatısların bileşiminden oluşan yastıklama sisteminin kapalı çevrim pozisyon kontrolünün yapılması planlamıştır. Bu bağlamda, kapalı çevrim kontrol yapısının yüksek çevrim hızında bilgisayar üzerinde gerçeklenmesini mümkün kılan, kontrol sinyallerini analog formda üreten, sensörlerden analog ve dijital ölçüm bilgisi alan, bir veri işleme kartının (DAQ kartı) kullanılmasına karar verilmiştir. Devam eden deneylerimiz bu elektromanyetik yastıklama üzerine kurgulanmıştır. Ve levitasyon doğrulamasının sonuçları bu deney düzeneği üzerinden alınmıştır. Mevcut kontrolcü geliştirilerek ve farklı kontrol yöntemleri kullanarak daha iyi sonuçların alınması gelecek çalışmalar arasında yer almaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Bhagat, A., Hou HW., Li, LD., Lim CT. ve Han, J., (2011).''Pinched flow coupled shear-modulated inertial microfluidics for high-throughput rare blood cell separation'', Lab on a Chip, 11 : 1870-1878.

[2] Moritani, T., Yamada, M. ve Seki, M., (2011). ''Generation of uniform-size droplets by multistep hydrodynami droplet division in microfluidic circuits'', Microfluidics Nanofluidics, 11 : 601-610.

[3] Lotien, R.H., Edward, C.C.,Robert, A. ve James,R., (2004). ''Continuous particle separation through deterministic lateral displacement'', Science, 34 : 987-990.

[4] Nieuwstadt, HA., Seda, R., Li, DS., Fowlkes, JB. ve Bull, JL., (2011). ''Microfluidic particle sorting utilizing inertial lift force'', Biomed, 13 : 97-105.

[5] Bakewell, DJ. ve Morgan, H., (2006). ''Dielectrophoresis of DNA: Time- and frequency-dependent collections on microelectrodes'', IEEE Trans. Nanobiosci., 5 : 139–146.

[6] Viefhues, M., Eichhorn, R., Fredrich, E., Regtmeier, J. ve Anselmetti, D., (2012). ''Continuous and reversible mixing or demixing of nanoparticles by di-electrophoresis'', Lab on a Chip, 12 : 485-494.

[7] Srivastava, SK., Gencoglu, A. ve Minerick, AR., (2010). ''DC insulator di-electrophoretic applications in microdevice technology'' , Anal. Bioanal. Chem., 399 : 301-321.

[8] Tsutsui, H., Yu, E., Marquina, S., Valamehr, B., Wong, I., Wu, H. ve Ho, CM., (2010). ''Efficient dielectrophoretic patterning of embryonic stem cells in energy landscapes defined by hydrogel geometries'', Ann. Biomed. Eng., 38 : 3777-3788.

[9] William, A.B., Alexandre, P., ve Cullen, R., (2010).''High sensitivity three-dimensional insulator-based dielectrophoresis'', Lab on a Chip, 12 : 1327–1331.

[10] Franke, T., Braunmüller, S., Schmid, L., Wixforth, A. ve Weitz, DA., (2012).

''Surface acoustic wave actuated cell sorting (SAWACS)'', Lab on a Chip, 10 : 789–794.

[11] Rogers, PR., Friend, JR. ve Yeo, LY. ,(2010). ''Exploitation of surface acous- tic waves to drive size-dependent microparticle concentration within a droplet'', Lab on a Chip, 10 : 2979–2985.

[12] Shi, J., Ahmed, D., Mao, X., Lin, SC., Lawit, A. ve Huang TJ., (2009).''Acoustic tweezers: Patterning cells and microparticles using standing surface acoustic waves (SSAW)'', Lab on a Chip, 9 : 2890–2895.

[13] Leslie, Y. ve James R.F., (2009). ''Ultrafast microfluidics using surface acoustic waves'', Biomicrofluidics, 3: 1-23.

[14] Onda K. ve Arai, F. (2012). ''Multi-beam bilateral teleoperation of holographic optical tweezer'', Opt. Exp, 20 : 3633-3641.

[15] David, G. G., (2003). ''A revolution in optical manipulation'', Nature, 424 : 810-816.

[16] Wang, X., Chen, S., Kong, M., Wang, Z., Costa, KD., Li, RAa ve Sun, D., (2011). ''Enhanced cell sorting and manipulation with combined optical tweezer and microfluidic chip technologies'', Lab on a Chip, 11 : 3656-3662.

[17] Orphée, C., Jérôme, D., ve Gilbert, R., (2003). ''Magnetic micro-actuators and systems (MAGMAS)'', IEEE Trans. Magn., 39 : 3607-3612.

[18] Winyard, P., Blake D.R. ve Evans, C.H., (2000).'' Free Radicals and Inflammation'', Springer, 58 : 5874-5884.

[19] Masaya, H., Tomohiro K., ve Toru I., (2012). ''Highspeedmicrorobot actuation in a microfluidic chip by levitated structure with riblet surface'', in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 11: 2517– 2522.

[20] Hagiwara, M., Kawahara, T., Yamanishi, Y., Masuda, T., Feng, L.,ve Arai F., (2011). ''On-chip magnetically actuated robot with ultrasonic vibration for single cell manipulations'', Lab on a Chip, 11: 2049–2054.

[21] SAÜ,(2011). Fen Bilimleri Dergisi, 15 : 46-59.

[22] Uludağ Üniversitesi,(2010). Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi,18 : 2.

[23] Sangeeta, N.B. ve Donald E.I.,(2015) ''Fabrication methods for microfluidic chips'', Nature, 02 : 158-169.

[24] Pattern Transfer,

https://www.tutorialspoint.com/design_pattern/transfer_object_pattern.html.

[25] Hubert, P., Irene H., and Elisabeth S., ''A (not so) short introduction to MEM''.

[26] J. Canny, (1986) ''A Computational Approach to Edge Detection'', IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8 : 679-698.

[27] Chris, H. ve Mike, S., (1988) ''A combined corner and edge detector'', Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference, 15 : 147-151.

[28] Wei, K.W., Zheng, S., Mei Z., Xian D., Zhen, Z., ve Xuan M., (2011) ''Magnetic NickelPhosphorus/Polymer Composite and Remotely Driven Three-Dimensional Micromachine Fabricated by Nanoplating and Two-Photon Polymerization'', American Chemical Society.

[29] Modechay, S.,(2010) ''Electroless Deposition of Nickel'', Modern Electroplating, 18 : 64-92.

[30] Liangcai, X., Peng, C. ve Q.uansheng, Z.,(2014) ''Adhesion promotion between PDMS and glass by oxygen plasma pre-treatment'', Journal of Adhesion Science and Technology, 28: 1046-1054.

[31] H.-5, Datasheet, (2014) ''Newport''.

[32] Liu, T., Shao, J., ve Gao J., (2016) ''Servo system design of direct-drive aerospace linear electro-mechanical actuator'', Networking, Electronic and Automation Control Conference, IEEE.

[33] Zolix, Solid Damping Vibration Isolation Optical Table, http://www.zolix.com.cn/en/prodcon_371_400_424_561.html, 11 Ekim 2016.

[34] Rafael, P.B., Ricardo, P. ve Alexandre, B.C., (2012) ''Hardware configuration of hexapod robot to force feedback control development'', System Theory (SSST).

[35] YARBİS, Haberleşme Protokolleri, http://yildiz.edu.tr/~kunal/datacomdsy/tcpip.pdf, 18 Ekim 2016.

[36] Wikipedia, Deadband, https://en.wikipedia.org/wiki/Deadband, 5 Ekim 2016.

[37] YARBİS, Kararlılık, http://www.yildiz.edu.tr/~cansever/oto/D9.pdf, 5 Ekim 2016.

[38] Barış Smancı, Daq Kartı, http://www.barissamanci.net/Makale/32/24-bit-12-kanal-veri-toplama-data-acquisition-karti/, 20 Ekim 2016.

[39] Bruce, K., Eric H. ve John, B., (2005) ''Electricity and Magnetism'', Spring, 36: 177-189.

[40] Y. Çengel,(2011) '' Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları''.

[41] MICRO-EPSILON,(2012) ''scanCONTROL Datasheet''.

[42] Quanser, Quarc, http://www.quanser.com/products/QUARC, 25 Ekim 2016.

[43] Quanser, Quanser Matlab, http://www.quanser.com/Content/files/MATLAB-Simulink-QUARC-Primer.pdf, 27 Ekim 2016.

[44] YARBİS, Otomatik Kontrol, http://www.yildiz.edu.tr/~omurlu/CF/OKI/12.pdf, 11 Kasım 2016.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ayşe İLGİNOĞLU

Doğum Tarihi ve Yeri : 06.08.1992 / Şanlıurfa

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : ayseeilginoglu @gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Yüksek Lisans	Mekatronik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2016
Lisans	Mekatronik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Fen Bilimleri	Lüleburgaz Anadolu Lisesi	2010

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2015	YTÜ Merkez Laboratuvar	Uzman
2009	Baykar İHA	Stajyer Mühendis
2008	CVS Makine	Stajyer Mühendis

YAYINLARI

Bildiri

1. Songül G., Yalman A., İlginoğlu A., Gökçe A., Koçulu Ö., Kırlı A., Koru A., Tüfekçi C.S. (2015, Haziran). Model picosatellite design for energy harvesting and telemetry data transmission through RF communication. Recent Advances in Space Technologies (RAST, 2015)
2. İlginoğlu A., Varol R., Kahraman Y., Erkan K., Üvet H. (2016, Ekim). Akışkan Ortamındaki Mikro Robotun Temassız Manipülasyonu. Türkiye Robotbilim Konferansı (TORK, 2016)

Proje

1. Ağızdaki Alkol Kokusunu Ölçen Mobil Cihaz (TÜBİTAK 2241-A Sanayi Odaklı Lisans Bitirmezi Tezi Destekleme Programı)
2. Amerikan Havacılık ve Uzay Enstitüsü tarafından her yıl düzenlenen Uluslarası CANSAT uydu yarışması
3. Mikro-robot kolu dizaynı, Üretimi ve Görsel Geri Besleme ile Temassız Manipülasyonu (TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı)

ÖDÜLLERİ

1. Onur Öğrencisi- Yıldız Teknik üniversitesi
2. Uluslararası Uydu Yarışması CANSAT 11.lik ödülü