



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 29.06.2022  
Kabul Tarihi : 21.07.2022

Received Date : 29.06.2022  
Accepted Date : 21.07.2022

### KENDİ KENDİNİ KONFIGÜRE EDEBİLEN ROBOTİK BİR SİSTEM İÇİN MİKRO ÖLÇEKTE ELEKTROMANYETİK DIŞ EYLEYİCİ TABANLI HAREKET MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

#### DEVELOPING EXTERNAL MAGNETICALLY ACTUATION MODEL IN MICRO SCALE FOR A SELF-RECONFIGURABLE ROBOTIC SYSTEM

Halil İbrahim DOKUYUCU <sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-6991-1708)

Nurhan GÜRSEL ÖZMEN<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-7016-5201)

<sup>1</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nurhan GÜRSEL ÖZMEN, gnurhan@ktu.edu.tr

#### ÖZET

Kendi kendini konfigüre eden modüler robotlar (KKMR), yeni görevleri yerine getirmek, yeni çevresel koşullara uyum sağlamak ve olabilecek hasarlardan etkilenmemek amacıyla modüllerin uzamsal organizasyonunu değiştirebilen otonom kinematik makineler olarak tanımlanabilir. KKMR sistemlerinin en önemli amaçlarından biri milyon seviyesinde modülün bir arada çalışabildiği sistemlerin geliştirilmesidir. KKMR sistemlerinin minyatürleştirilmesi aşamasında yerleştirme ve taşıma zorlukları ortaya çıkar. Son yıllarda mikro üretim alanında elde edilen kazanımların yardımıyla, dışsal eyleyicilerin hareket sağladığı mikro robotlar, KKMR sistemlerinin minyatürleştirilmesine iyi bir alternatif sunmaktadır. Bu çalışmada mikro robotlar için dışsal manyetik eyleyiciler tarafından hareket sağlanan yeni bir kendi kendini konfigüre etme mekanizması geliştirilmiştir. Çalışmada manyetik alan etkisinde mikro tüpler içerisindeki mıknatısların hareketi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Mekanizmanın dinamik modeli, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve benzetim çalışmaları ile uygulanabilirliği ortaya konulmuş, teorik sonuçlarla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Çalışmanın biyomedikal uygulamalarda, medikal robotlarda, endüstride, savunma sanayinde ve uzay araştırmalarındaki mikro robotik sistemler için katkıları olacağı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Mikrorobotik, kendi kendini konfigüre edebilen robot (KKMR), manyetik eyleyici, modüler hareket, sonlu elemanlar yöntemi

#### ABSTRACT

Self-reconfigurable modular robots (SRMRs) are considered as autonomous kinematic machines that can change their own shape by rearranging the connectivity of their parts to perform new tasks, adapt to new circumstances or recover from damage. One of the main goals in SRMRs field is to reach to a million modules integrated self-reconfigurable systems. However, miniaturization efforts in self-reconfigurable modular robots bring some challenges such as storage and packaging. Developing externally actuated micro-robots can be a good alternative for miniaturization of SRMRs with the help of rapid enhancements in micro-manufacturing technologies encountered in the last decades. In this study a novel self-reconfiguration mechanism for micro-robots that are externally actuated by magnetic actuators is developed. In the study the motion of the magnets inside the microtubes under the effect of external magnetic field is investigated by using finite elements method. Dynamic model of the mechanism is obtained by using finite elements method and its applicability is exhibited by simulations. The results are compared with the theoretical values. It is envisioned that the study will contribute to micro-robotic systems in industry, defense industry and space missions as well as biomedical applications and medical robots.

**Keywords:** Microrobotics, self-reconfigurable modular robots (SRMR), magnetic actuators, modular motion, finite elements method

ToCite: DOKUYUCU, H.İ. & GÜRSEL ÖZMEN, N., (2022). KENDİ KENDİNİ KONFIGÜRE EDEBİLEN ROBOTİK BİR SİSTEM İÇİN MİKRO ÖLÇEKTE ELEKTROMANYETİK DIŞ EYLEYİCİ TABANLI HAREKET MODELİ GELİŞTİRİLMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 434-449.

## GİRİŞ

Kendi kendini yeniden yapılandıran modüler robotlar (KKMR) incelendiğinde, yeni koşullara uyum sağlamak, yeni görevler gerçekleştirmek veya hasardan kurtulmak için parçalarının bağlantılarını yeniden düzenleyerek kasıtlı olarak kendi şekillerini değiştirebilen yapılardır. Tek bir yapıda birleşen birçok modül, bilgi ve enerji akışını sağlayan kenetlenme mekanizmalarıyla hareket etmektedir (Yim vd., 2007). Sistemde yer alan bütün modüllerin özdeş olması ve kendine yetebilmesi durumunda sistem homojen olarak tanımlanırken (Yim vd., 2007), farklı modüllerin meydana getirdiği sistemler heterojen olarak tanımlanmıştır (Lyder, Garcia ve Stoy, 2008). Buna ek olarak “kendi kendini konfigüre eden” ifadesi, KKMR sistemlerinin herhangi bir dış müdahaleye gerek duymaksızın modüllerin birbirlerine göre pozisyonlarını değiştirebilmesi anlamına gelir (Feczko vd., 2015). KKMR'lere ihtiyaç duyulmasının nedeni, erişimin ve bilinmezliğin fazla olduğu uzay araştırmaları, canlı formunda hareket edebilen yapılara duyulan ihtiyaç ve anında problem çözebilecek robotik yapılara duyulan ihtiyaç şeklinde ifade edilebilir. KKMR'lerin, sabit yapılandırma sistemlerine kıyasla, önceden bilinmeyen görevleri yerine getirme yetenekleri vardır.

Robotik teknolojilerde kaydedilen hızlı gelişmelerin ışığında birçok araştırmacı, düzensiz şekilli çevrelerde çalışabilen robotik çözümler üzerine yoğunlaşmıştır. Literatürde kabul edilen ilk KKMR olan CEBOT (Fukuda vd., 1989), küresel bir sıvı tankının içerisinde modülleri bağlı bir şekilde çalışmak üzere geliştirilmiş olup, her biri ortak bir bağlantı mekanizmasına sahip özel CEBOT modülleri, tankın küçük boyutlardaki girişine rağmen robotik bir kolun ucunda otomatik olarak değiştirilebiliyordu. Literatürde yer alan bu ilk doğrulanmış KKMR örneği, alanında diğer birçok araştırmaya öncülük etmiş ve günümüze değin gözle görülür gelişmelerin ivmelenmesini sağlamıştır. KKMR sistemlerinin en önemli avantajı, geleneksel sabit yapıları robotlara çevreye uyum sağlama ve atanan göreve göre özelleşme konusunda esneklik kazandırmasıdır.

Modüllerin tasarlanması ve imal edilmesi gibi mekanik unsurların yanında, bilgisayar programlamada elde edilen kazanımlar, çok sayıdaki modülün kontrolü açısından önemlidir (Sprowitz vd., 2010). KKMR sistemlerinde birden fazla modülün uyum içerisinde hareket ettiği gerçeğinden yola çıkılarak, karar verme süreçlerinin belirleyici olmayan polinomsal problemler içerdiği görülmektedir (Sprowitz vd., 2010). Eniyileme algoritmaları, bu tür karmaşık problemlerin çözümünde önemli roller üstlenmektedir. Meta-sezgisel algoritmalar alanında kayda geçirilecek ilerlemelerin KKMR kontrol stratejilerine kolayca uyarlanabileceği düşünülmektedir.

KKMR sistemlerinin gelecek vaat ettiği üç ana husus çok amaçlılık, güvenilirlik ve düşük maliyet olarak belirlenmiştir (Murata, Kurokawa ve Kokaji, 1994).

Çok amaçlılık özelliği, KKMR alanında birçok kez doğrulanmış olup (Yim vd., 2007), bu alanın çıkış noktasına da ilham veren tekil bir robotik sistemin geniş bir görev kapsamına sahip olması durumuyla ilintilidir. Öte yandan güvenilirlik ve düşük maliyet özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine çalışmalar sürdürülmektedir (Jahanshahi vd., 2017).

KKMR sistemleri, sahip olduğu modüler yapı sayesinde hata dayanımı ve kendi kendini tamir edebilme karakterleri geliştirmiştir. Arıza veren modülün sistemden uzaklaştırılmasıyla kalıcı hasarlardan kaçınılmakta, merkeziyetsiz kontrol yaklaşımlarıyla işlevsellik sürdürülebilir bir yapıya bürünmektedir. Modül sayısının artışı beraberinde daha karmaşık kontrol stratejilerinin geliştirilmesini getirmektedir. Ayrıca kullanılan malzeme ve alt sistemlerin maliyetlerinin de artması anlamına gelmektedir. Düşük maliyet problemlerine çözüm olarak eksik eyleycili (Knizhnik ve Yim, 2020) ve basit kenetlenme mekanizmasına sahip (Wolfe vd., 2012) sistemler önerilmiştir. Bu açıklamalar ışığında yüksek performans ile düşük maliyet arasında dengeli bir yaklaşımda bulunmak gerektiği açıktır. Bu nedenle bu çalışmada KKMR sistemlerinin kenetlenme mekanizmalarına yönelik bir elektromanyetik sistem ele alınmıştır.

Gelecek vaat ettiği yönler ve sunduğu faydalar esas alındığında KKMR alanında, havza suları gözetleme (Paulos vd., 2015), uzay görevleri (Goeller vd., 2012), boru içi keşif (Ciszewski vd., 2014), sıvı tanklarının temizliği (Fukuda ve Nakagawa, 1988) ve nükleer tesis yedeğe çıkarma ve keşif (Hirai, Hirose ve Lee, 2013; Fulton ve Schaub, 2021) gibi birçok uygulama geliştirildiği gözlenmektedir.

KKMR sistemleri yapısal olarak sınıflandırıldığında karşımıza kafes, zincir, mobil, melez, kiriş ve serbest form yapıları çıkmaktadır. Özellikle kafes yapıya sahip KKMR sistemlerinde “Million Module March” olarak adlandırılan, sahip olunan modül sayısının milyon seviyesine çıkarılması ve modül boyutlarının en aza indirilmesi çabaları

literatürde önemli yer tutmaktadır (Kirby vd., 2007). Fakat hesaplama zamanı kısıtlamaları, yüksek sayıda modül içeren KKMR sistemlerinin deneysel çalışmalarını olumsuz yönde etkilemektedir (Holobut, Bordas ve Lengiewicz, 2020). Şu ana kadar kaydedilen en yüksek sayılı simülasyonlardan biri 32 milyon adet modüle sahip KKMR sistemi için gerçekleştirilmiş olup (Thalamy vd., 2022), deneysel çalışmalarda modül sayısı düşük tutulmaya çalışılmıştır.

Boyut kısıtlamaları, KKMR alanında eyleyicilerin konumlandırılması gibi önemli sınımları tetiklemektedir. Bu noktada çeşitli çözüm önerileri gözlenmektedir. Dış eyleyiciler ile hareket sağlama yaklaşımı bu önerilerden biri olup, minyatürleşme çabalarına yenilikçi hareketlendirme ve kenetlenme mekanizmaları açılarından gözle görülür bir ivme kazandırmıştır (White ve Yim, 2010; Fiaz ve Shamma, 2019). Biyomedikal uygulamalarda kullanılmak üzere sunulan zincir yapılı KKMR sistemi, Helmholtz bobin düzeneğini dış eyleyici olarak kullanılmaktadır (Al Khatib vd., 2020). Silkeleme masasının (White ve Yim, 2010) ve mikro ölçekli elektromanyetik ızgara yüzeyinin (Diller vd., 2011) dış eyleyici olarak kullanılması diğer bazı örneklerdendir. Dış eyleyiciler ile hareketlendirilen sistemler, basit kontrolcü kullanmaları ile basit hareket ve kenetlenme mekanizmalarına sahip olmaları yönlerinden belirgin faydalar sunmaktadır.

KKMR sistemleri mikro robotik sistemler ile sıkı ilişkiler içerisindedir. Mikro robotlar incelendiğinde genellikle dört ana eyleyici sistemine sahip oldukları görülmekte olup, bu sistemlerin itki kaynağı çeşitleri manyetik alan, akustik alan, ışık enerjisi ve kimyasal reaksiyon şeklinde sıralanabilir (Ceylan vd., 2017). Kurşun kapsül şeklinde bir mikro yüzücü, içerisindeki boşluğa yerleştirilen hava damlacığının dış akustik eyleyici tarafından etkilenmesi ve dış manyetik alan ile yönlendirilmesi sonucu birleştirilmiş bir hareket profiline ulaşmıştır (Ren vd., 2019). Minyatür robotlar için manyetik eyleyici sistemlerin incelendiği derleme çalışmasında manyetik alanın kontrol edilebilirliği vurgulanmış ve manyetik alan ile mıknatıs arasındaki etkileşimde uzamsal konfigürasyonun önemine değinilmiştir (Yang ve Zhang, 2020). Başka bir çalışmada ise manyetik dış eyleyici ile hareket metotlarından üç tanesi karşılaştırmalı bir şekilde incelenmiştir (Abbott vd., 2009). Manyetik eyleyiciler kornea oksijen ölçüm aletlerinin geliştirilmesinde de kullanılabilir (Ergeneman vd., 2008). Mikro robotların kendi kendini birleştirmesi metotlarının incelendiği derleme çalışmasında (Mastrangeli vd., 2009) mikro ölçekte önemli olan manyetik etkileşimler ele alınmıştır. Buna ek olarak mikro kanallarda valf, karıştırıcı veya pompa olarak işlev görebilecek mikro robotların sezgisel birleşme yöntemlerinin değişik yönleriyle incelendiği bir çalışma da mevcuttur (Sawetzki vd., 2008). Mikro ve nano robotların manyetik eyleyiciler ile hareketinin sağlandığı sistemlerin incelendiği çalışmada (Zhou vd., 2021), uzaktan kumanda edilebilirlik, yeniden konfigüre edilebilme, geri dönüştürülebilme ve çok amaçlılık diğer yöntemlere göre sunulan faydalar olarak sıralanmıştır. Manyetik dış eyleyici kullanan diğer bazı sistemler (Lin vd., 2021; Diller vd., 2011; Nguyen vd., 2020; Pieters vd., 2016; Pawashe, Floyd ve Sitti, 2009) literatürde kapsamlı bir şekilde incelenmiş olup, sonuçlar umut vericidir.

Literatürde yer alan mikro robotik çalışmalarında genellikle tekil yapılara önem verildiği, KKMR sistemlerinin mikro robotik uygulama çalışmalarının henüz istenen düzeye gelmediği ve doğrulaması yapılmış bir sistemin mevcut olmadığı gözlenmektedir. Bu husus, literatürde tespit edilen eksikliklerdir. KKMR sistemlerinin önerdiği vaatlerin mikro robotik alanda birçok fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Mikro robotların KKMR düzleminde sistemli bir şekilde haberleşmesi, kenetlenmesi ve konfigürasyon değiştirebilmesi, ulaşılması zor mikro yapılarda gerçekleştirilecek görevler için alternatif bir çözüm yöntemi oluşturacaktır.

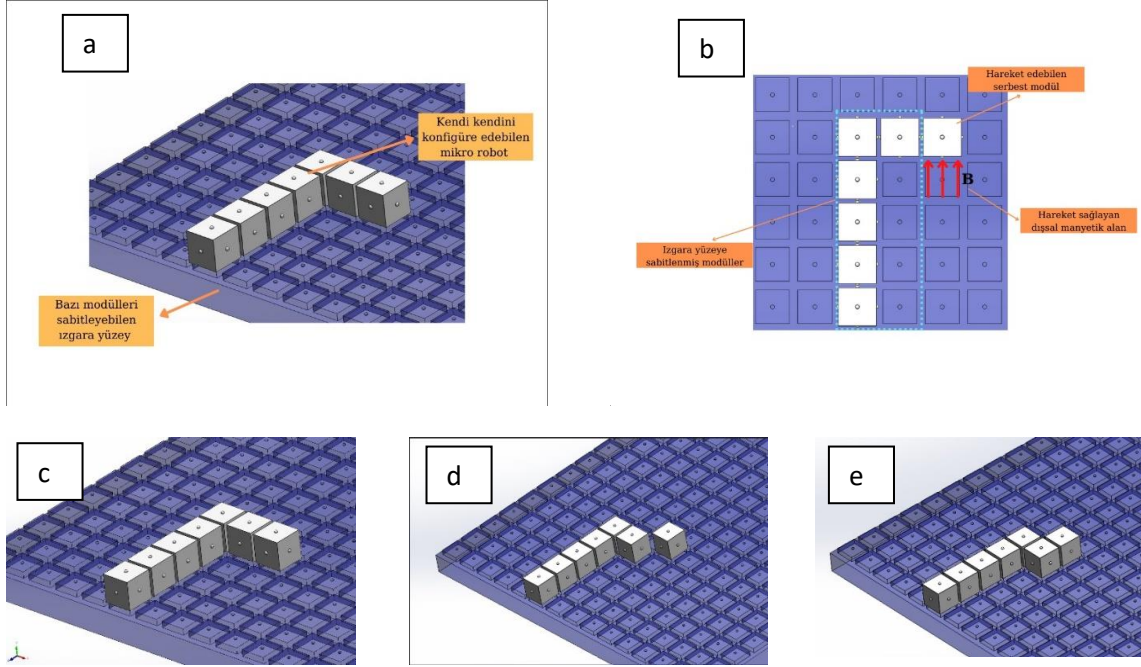
Bu çalışmada yenilikçi bir kendi kendini konfigüre edebilen mikro robot tasarlanarak, mikro robotlar için dışsal manyetik eyleyiciler tarafından hareket sağlanan yeni bir kendi kendini konfigüre etme mekanizması ortaya koyulmuştur. Geliştirilen KKMR sisteminde yer alan modüllerin içerisine mikro tüpler yerleştirilecek olup, her tüpün içerisinde Neodyum (NdFeB) mıknatıs çekirdeği bulunacaktır. Dışarıdan manyetik alan etki ettiğinde farklı eksenlerde şekil değiştiren mikro tüpler yardımıyla modüller hareketlendirilecektir. Çalışmada manyetik alan etkisinde mikro tüpler içerisinde yer alan mıknatısların hareketi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenecektir. Bu yönüyle, önerilen hareket mekanizması literatürde ilk kez uygulanacaktır. Buna göre, en uygun ve verimli bir şekilde çok amaçlılık, güvenilirlik ve düşük maliyet gözetilerek nasıl uyarlanabileceği üzerinde özgün katkılar sunulmuştur.

Çalışmanın ikinci bölümünde Materyal ve Metot başlığı altında problemin tasarımı, seçilen malzemeler ve uygulanacak yöntem tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde mikro tüpler içerisinde yer alan mıknatısların hareketine ait bulgular ve irdelemesi sunulmuştur. Son bölümde çalışmanın sonuçları değerlendirilmiştir.

## MATERYAL VE METOT

### Problemin Tanımı

Çalışmada geliştirilecek olan KKMR sisteminin ve uygulanacak olan dışsal manyetik alanın temsili görünümü ile konfigürasyon değişim adımları Şekil 1’de gösterilmektedir.



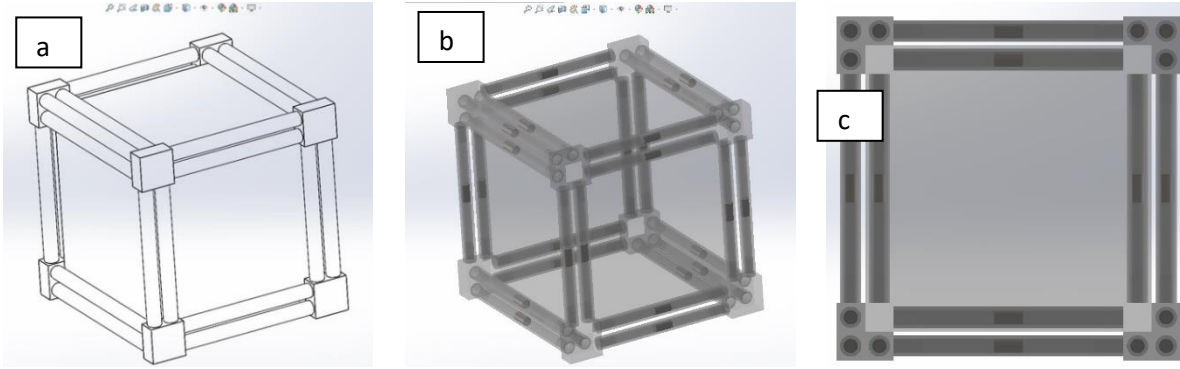
**Şekil 1.** a. Geliştirilen KKMR Sisteminin Genel Görünümü. Konfigürasyon Sırasında Bazı Modülleri Elektrostatik Kuvvetler Yardımıyla Sabitleyebilen ızgara Yüzey Kolaylık Sağlayacaktır. b. ızgara Yüzeye Sabitlenen Modüller Dış Manyetik Alan Etkisinde Hareket Etmezken, Serbest Modül Hareket Ederek Konfigürasyonu Değiştirmektedir. c. Hareket Öncesi Mikro Robotun Görünümü. d. İlk Devrilme Hareketinden Sonra Serbest Modülün Pozisyonu. e. İkinci Devrilme Hareketinden Sonra Oluşan Yeni Konfigürasyon.

Çalışmada kullanılan mikro tüplerin malzemesi yüksek molar hacmi, düşük kohezif enerji yoğunluğu ve yüksek esneklik yetenekleri göz önünde bulundurularak Polidimetilsiloksan (PDMS) olarak seçilmiştir. Mikro tüplerin içerisine yerleştirilen mıknatıs çekirdekleri yüksek kalıcı mıknatıslanma, yüksek korozif dayanımı ve kolay üretilebilirlik yetenekleri göz önünde bulundurularak Neodyum-demir-bor (NdFeB) olarak seçilmiştir. Modüllerin kabuk malzemesi ise benzetim çalışmalarından çıkacak sonuçlara göre belirlenecektir. Seçilen malzemelerin temel özellikleri Tablo 1’de gösterilmektedir. Seçilen malzemeye göre mikro robotun maliyeti değişeceği gibi, mikro ölçekte çalışıldığından dolayı mikro robotun maliyetine etki eden en önemli faktörlerden birisi mikro parçaların üretim yöntemidir. Bu çalışmadan çıkan sonuçlar ışığında malzeme seçimi ve mikro üretim yöntemi belirlenecektir. Maliyete etki eden diğer bazı faktörler ise dış manyetik eyleyicinin çeşidi ve hareket kabiliyeti, mikro robotun kullanım yeri ve gerçekleştireceği görev ile mikro robotların kendi arasında ve dış kaynaklarla sağlayacağı iletişimin türü olarak sayılabilir.

**Tablo 1.** Malzemelerin Temel Özellikleri

	PDMS (Mikro Tüp)	NdFeB (Mıknatıs Çekirdek)
Young Modülü (GPa)	$0,75 \times 10^{-3}$	160
Poisson Oranı	0,49	0,24
Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	970	7500
Göreceli Geçirgenlik	1	1,05
Kalıcı Mıknatıs Yoğunluğu (T)		1,43





**Şekil 2. a.** Modülün Kapalı Görünümü. **b.** Mıknatıs Çekirdekleri ve Mikro Tüplerin Yerleşiminin 3 Boyutta Görünümü **c.** Modülün x-z Düzleminde İki Boyutlu Görünümü (Not: Tüm görünümlemler kullanılan çizim programının görünüm stili ve düzlemi seçenekleri değiştirilerek aynı montajdan elde edilmiştir.)

KKMR sisteminde yer alan modüller birbiriyle eş yapıdadır. Bu yönüyle sistem homojen KKMR olarak tanımlanmaktadır. Modüller birbiriyle manyetik kuvvetler aracılığıyla kenetlenmektedir. Böylece karmaşık kenetlenme mekanizmalarının getireceği zorluklar elimine edilmiştir. Bir modülün konsept görünümü Şekil 2’de gösterilmektedir.

### **Metot**

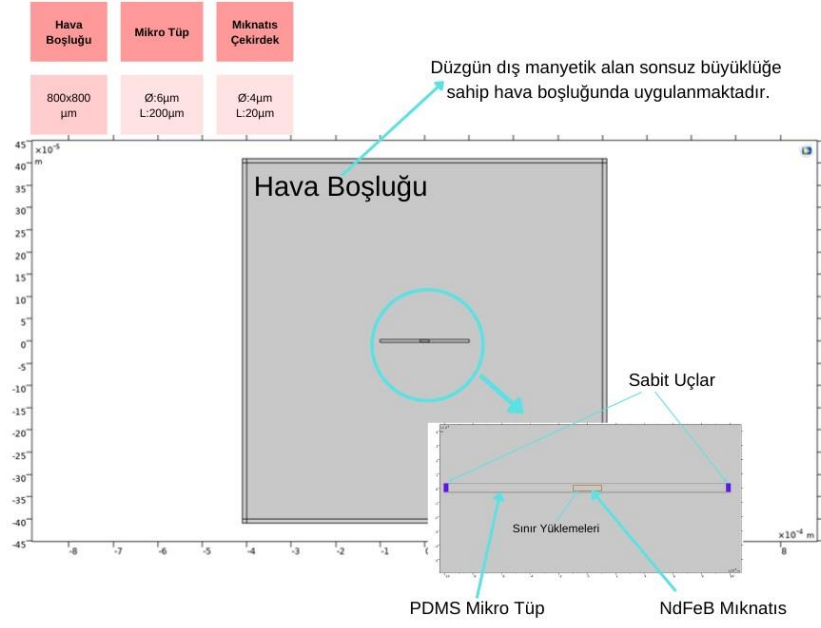
Çalışmada manyetik alan etkisinde mikro tüpler içerisinde yer alan mıknatısların hareketi incelenmiştir. Bu hareket doğrultusunda oluşan tork etkisi modüllerin devrilmesini sağlayacak olup, KKMR sisteminin konfigürasyonu bu şekilde değişecektir. Modelleme ve benzetim çalışmalarında COMSOL Multiphysics® yazılımı kullanılmıştır (Multiphysics, 2021). İşlem kolaylığı açısından mikro tüp ve içerisinde yer alan mıknatıs çekirdeği iki boyutta incelenmiş olup, yapının etrafında sonsuz büyüklükte hava boşluğu tanımlanmıştır. Böylece uygulanan dış manyetik alan sağlıklı bir şekilde modellenmiştir. Oluşturulan simülasyon ortamı Şekil 3’te gösterilmektedir.

Simülasyon ortamı oluşturulduktan sonra malzemelerin seçimi yapılmış, mikro tüpün uçları sabitlenmiş ve dış manyetik alan ortama uygulanmıştır. Sonlu eleman yönteminde kullanılmak üzere parça boyutları ile uyumlu olacak örgü boyutları tanımlanmıştır. Hava boşluğu için örgü boyutu 20  $\mu\text{m}$  iken, mikro tüp ve mıknatıs çekirdek için örgü boyutu 0,4  $\mu\text{m}$  olarak seçilmiştir. Dış manyetik alan 5 mT, 10 mT, 15 mT ve 20 mT olarak değişen değerlerde uygulanmıştır. Bu değişen dış manyetik alan değerlerine göre sistem hareketinin davranışı gözlenmiştir.

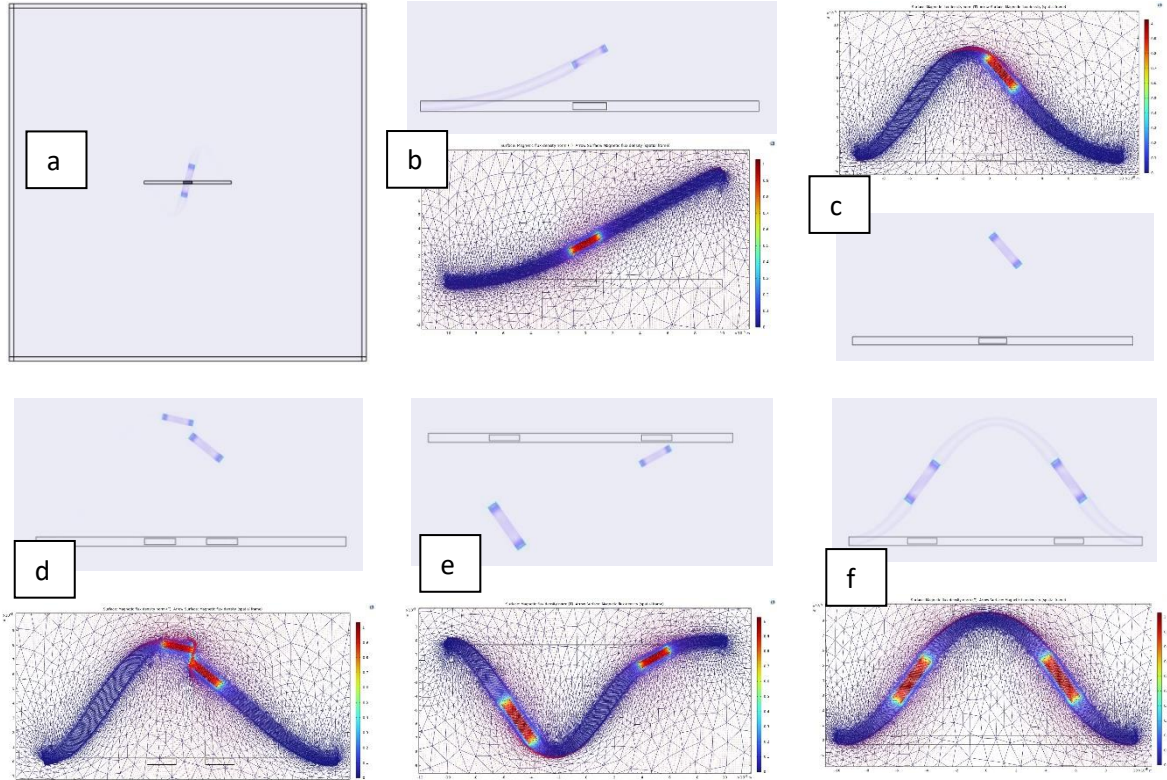
## **BULGULAR VE TARTIŞMA**

### ***Uygun Mikro Tüp Mıknatıs Çekirdeği Konfigürasyonunun Tespiti***

Mikro tüp ile içerisine yerleştirilecek mıknatıs çekirdeğinin konfigürasyonunun tasarlanan mikro KKMR sistemine en iyi şekilde katkı vermesini sağlamak üzere bir dizi simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak Şekil 3’te görüldüğü üzere mikro tüpün merkezinde bir adet mıknatıs çekirdeği olacak şekilde simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Dış manyetik alanın yönünün de değiştirilerek gerçekleştirilen bu simülasyonlar sonucunda istenen hareket elde edilememiş olup, farklı konfigürasyonlar denenmiştir. Mikro tüp içerisine iki adet mıknatıs çekirdeği birbirinden belli bir uzaklıkta, kutupları birbirine ters olacak şekilde yerleştirildiğinde istenen hareket sağlanmıştır ve simülasyon sonuçları kaydedilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre mikro tüp mıknatıs çekirdeği konfigürasyonları Şekil 4’te gösterilmektedir

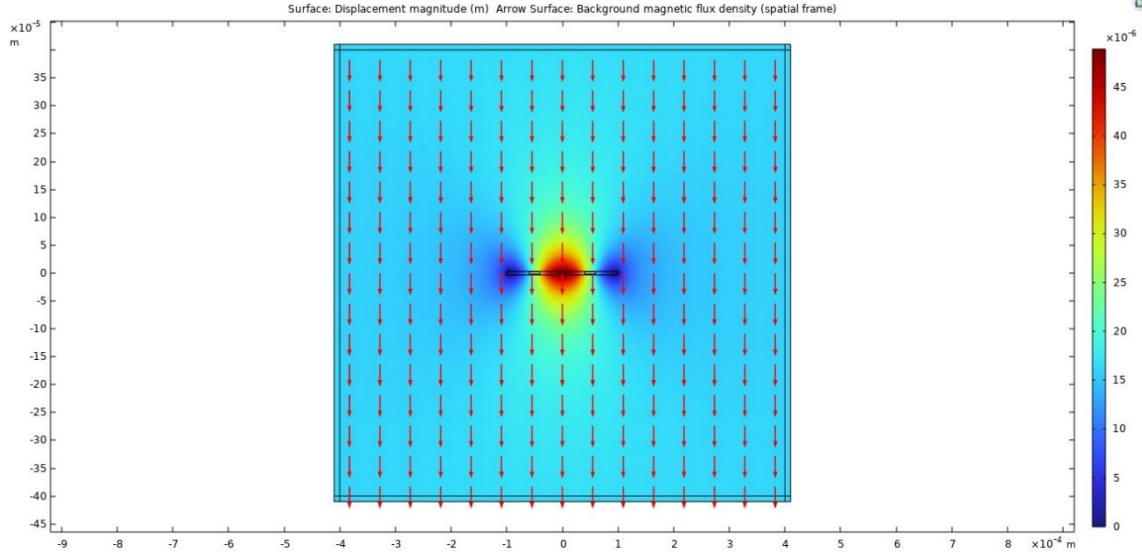


Şekil 3. İki Boyutlu Simülasyon Ortamı



Şekil 4. Uygun konfigürasyon seçimi. **a.** Tek miknatis merkezde, manyetik alan: +y **b.** Tek miknatis merkezde mikro tüpün sağ ucu serbest bir durumda, manyetik alan: +y **(c)** Miknatis merkezde, manyetik alan: -x **d.** İki miknatis merkeze yakın, manyetik alan: -x **e.** İki miknatis merkezden uzak, manyetik alan: -x **f.** İki miknatis merkezden uzak, miknatis kutuplar birbirine zıt, manyetik alan: -y.

Şekil 4'te görülen sonuçlar incelendiğinde mikro KKMR sistemi için istenen mikro tüp hareketinin, iki adet mıknatıs çekirdeğin birbirine 100  $\mu\text{m}$  uzaklıkta, mikro tüp merkezine göre simetrik bir şekilde konumlandığı pozisyonda, dış manyetik alanın yönünün -y olduğunda gerçekleştiği görülmektedir. Bu konfigürasyonda mıknatıs çekirdeklerinin kutupları birbirine zıt konumlandırılmıştır (N-S --- S-N). Çalışmanın geri kalan kısmında seçilen bu konfigürasyon kullanılmış olup, bu konfigürasyonda oluşan yer değiştirmeler ile dış manyetik alan Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Seçilen Konfigürasyonda Oluşan Yer Değiştirmelerin Dış Manyetik Alan Altında Gösterimi

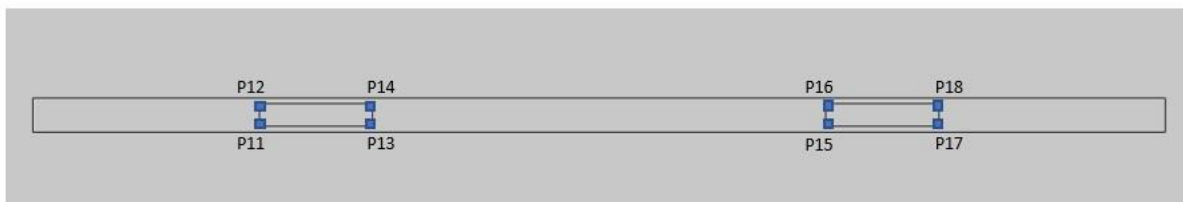
### Deformasyon Açısının Hesaplanması

Uygun konfigürasyonun seçiminin ardından mikro tüpte oluşan deformasyon açıları hesaplanmıştır. Deformasyon açılarının hesabında mıknatıs çekirdeklerinin yer değiştirme değerleri kullanılmıştır. Değişken dış manyetik alan altında oluşan yer değiştirmeler Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Değişken Manyetik Alan Etkisinde Oluşan Yer Değiştirmeler

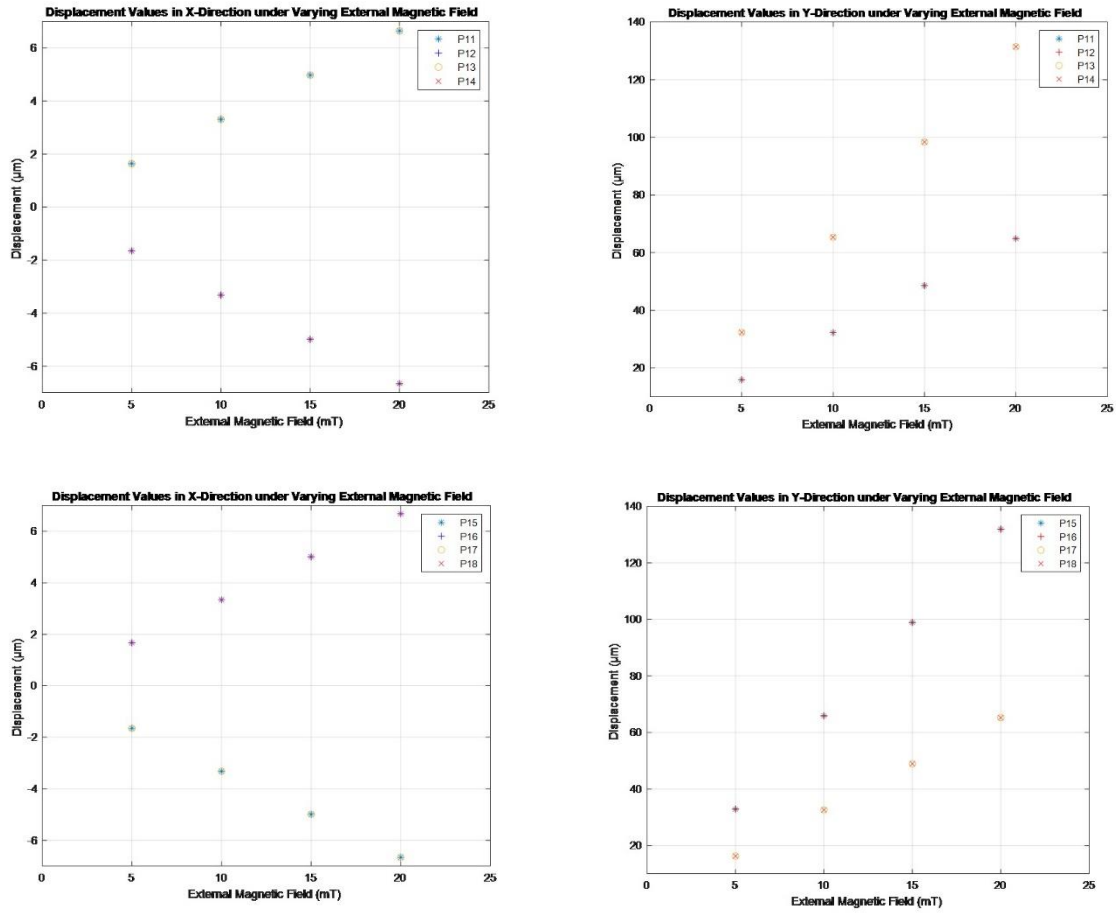
	Manyetik Alan (mT)	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18
X-doğrultusunda yer değiştirme ( $\mu\text{m}$ )	5	1,64	-1,65	1,64	-1,65	-1,65	1,67	-1,65	1,67
	10	3,31	-3,32	3,31	-3,32	-3,32	3,34	-3,32	3,34
	15	4,98	-4,99	4,98	-4,99	-4,99	5,01	-4,99	5,01
	20	6,65	-6,66	6,65	-6,66	-6,66	6,68	-6,66	6,68
Y-doğrultusunda yer değiştirme ( $\mu\text{m}$ )	5	15,90	15,90	32,33	32,33	32,86	32,86	16,26	16,26
	10	32,23	32,23	65,36	65,36	65,89	65,89	32,59	32,59
	15	48,56	48,56	98,39	98,39	98,92	98,92	48,92	48,92
	20	64,89	64,89	131,42	131,42	131,95	131,95	65,25	65,25

Tabloda yer alan değerlerin hesaplandığı mıknatıs köşe noktaları Şekil 6'da gösterilmektedir.



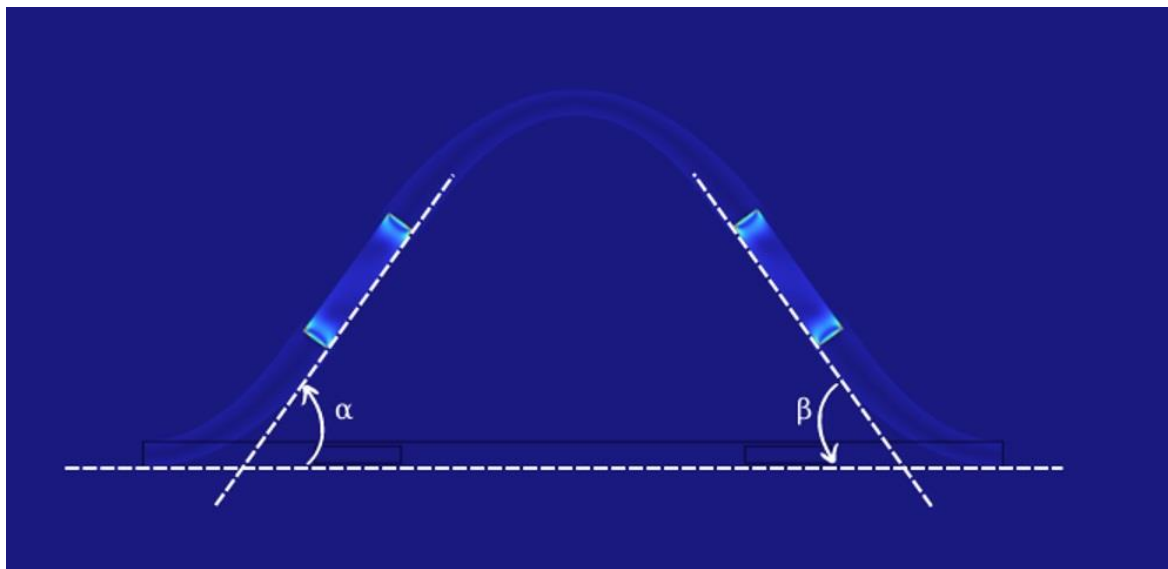
Şekil 6. Mıknatısların Köşe Noktaları

Tablo 2’de yer alan değerler Şekil 7’de grafiksel olarak gösterilmektedir.



Şekil 7. Yer değiştirme değerlerinin manyetik alana göre değişimi

Elde edilen yer değiştirme değerleri kullanılarak ve temel trigonometrik ilişkiler göz önünde bulundurularak mikro tüpte oluşan deformasyon açıları hesaplanmıştır. Şekil 8’de mikro tüpte oluşan deformasyon açıları gösterilmektedir.



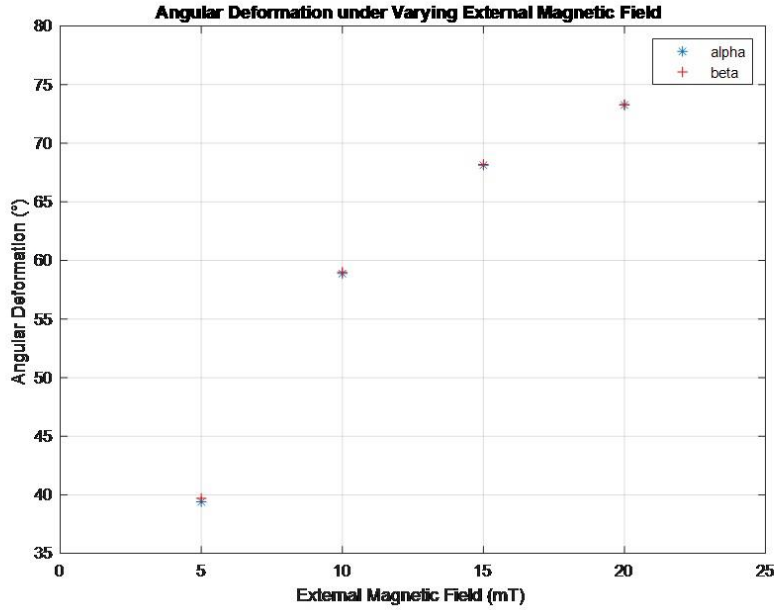
Şekil 8. Mikro tüpte oluşan deformasyon açıları

Tablo 3’te değişken manyetik alan altında oluşan deformasyon açıları gösterilmektedir. Şekil 9’da ise bu açılar grafik üzerinde gösterilmektedir.



**Tablo 3.** Değişken Manyetik Alan Altında Oluşan Deformasyon Açıları

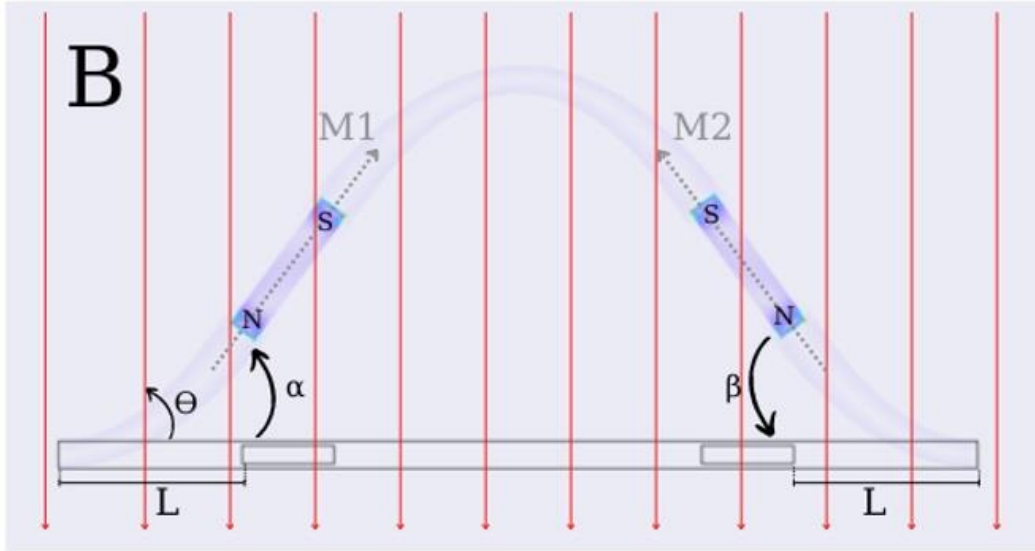
Dış Manyetik Alan (mT)	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)
5	39,40	39,69
10	58,88	59,01
15	68,13	68,20
20	73,27	73,31

**Şekil 9.** Değişken Manyetik Alan Altında Oluşan Deformasyon Açıları

Oluşan deformasyon açıları incelendiğinde, mikro tüpün iki tarafında oluşan açılardan birbirine oldukça yakın değerler olduğu gözlenmektedir. Mıknatıslanmanın doğası gereği seçilen konfigürasyonda tam simetrik bir hareket elde edilemese de aradaki hatanın çok küçük olması hareketin simetrik kabul edilebileceğini göstermektedir. Buna ek olarak uygulanan manyetik alan arttıkça deformasyon açısının da arttığı, ancak düşük aralıklarda, örneğin 5 mT ile 10 mT arasında, artışın büyük aralıklara, örneğin 15 mT ile 20 mT arasında, kıyasla daha fazla olduğu gözlenmektedir. Bu durumun sebebi mikro tüpün elastik yapısından dolayı deformasyon açısı arttıkça harekete karşı tüpün gösterdiği dirençtir. Teorik değerler ile doğrulama yapılırken bu hususun üzerinde durulmuştur.

### **Deformasyon Açılarının Teorik Değerler Kullanılarak Doğrulanması**

Simülasyonlar sonucu elde edilen deformasyon açılarının doğrulanmasını sağlamak üzere Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi kullanılmıştır (Jeon vd., 2018). Bu yaklaşıma göre mıknatısların mikro tüpe uyguladığı yer değiştirme ile mikro tüp malzemesinin rijitliği birbirlerine karşı koymakta ve manyetik tork ile mekanik tork birbirlerini dengelemektedir. Manyetik ve mekanik torkların hesaplanmasında baz alınacak şema Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. Doğrulama İşlemi İçin Baz Alınan Şema

Şekil 10'da B dış manyetik alanı, L kenarlardan mıknatlara olan uzaklığı, M1 ve M2 mıknatısların manyetizasyon değerlerini,  $\alpha$  ve  $\beta$  deformasyon açılarını,  $\theta$  dış manyetik alan ile mikro tüp arasındaki açıyı ifade etmektedir.

Manyetik tork, mıknatısların manyetizasyonu (M) ile dış manyetik alanın (B) vektörel çarpımına eşittir ve aşağıda gösterilmektedir.

$$\vec{T}_{mag} = \vec{M} \times \vec{B} \quad (1)$$

$$T_{mag1} = MB \sin(\theta - \alpha) \quad (2)$$

$$T_{mag2} = MB \sin(\theta - \beta) \quad (3)$$

Mekanik tork ile deformasyon açısı arasında aşağıdaki gibi bir ilişki mevcuttur.

$$\alpha = \frac{T_{mech}L}{EI} \quad (4)$$

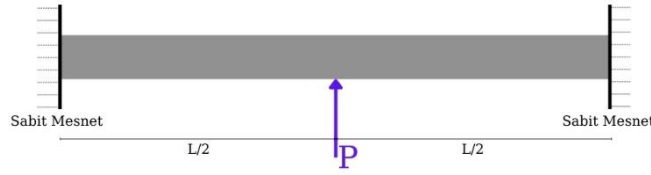
Eşitlik-4'te E Young modülünü, I atalet moment alanını, L kiriş uzunluğunu,  $T_{mech}$  mekanik torku,  $\alpha$  ise deformasyon açısını ifade etmektedir.

Mekanik ve manyetik torkların birbirine eşitlenmesiyle deformasyon açısının teorik ifadesi bulunmuştur. Bu eşitlik aşağıda gösterilmektedir. Çalışmada ele alınan mikro tüpün yapısı ve mıknatıs çekirdekler ile konfigürasyonu Eşitlik-6'daki sonucu vermiştir. Deformasyon açısı için sabitlenmiş nokta iterasyonu yöntemi kullanılmıştır (Jeon vd., 2018).

$$T_{mag} = T_{mech} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{MBL \sin(\theta - \alpha)}{12EI} \quad (6)$$

## Kiriş Üzerine Uygulanan Tekil Nokta Yükü



Şekil 11. Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi Şeması

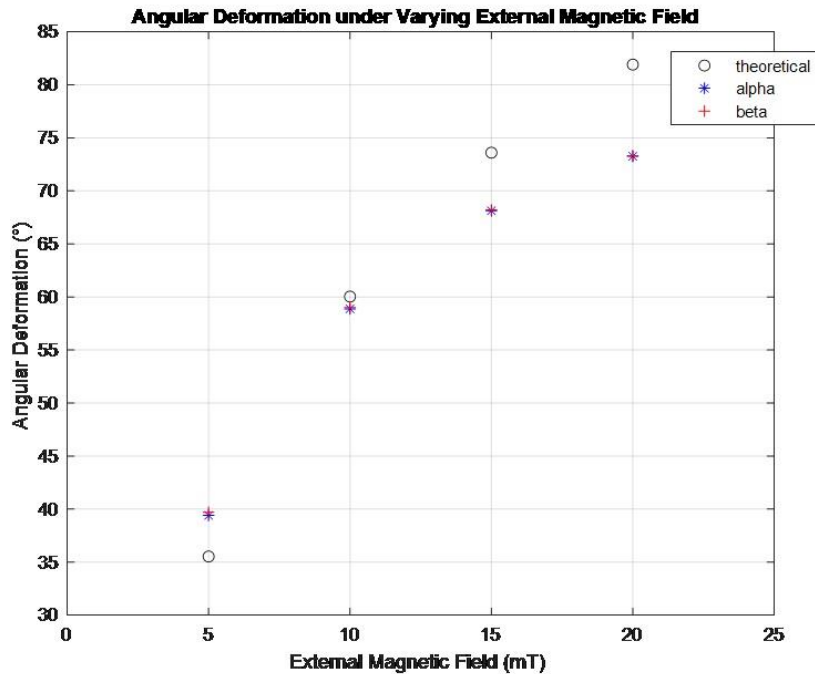
Şekil 11’de doğrulamada kullanılan Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi için oluşturulan şema gösterilmektedir. Sabitlenmiş nokta iterasyonu MATLAB© programında çözülmüştür. Ulaşılan teorik değerler ile simülasyon sonucu ulaşılan değerler Tablo 4’te gösterilmektedir. Teorik hesaplamalar yapılırken kullanılan teori gereği iki tarafta oluşan deformasyon açılarının birbirine eşit olduğu varsayılmıştır.

Tablo 4. Simülasyon ve Teorik Deformasyon Açısı Değerlerinin Karşılaştırılması

Dış Manyetik Alan (mT)	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	Teorik Açıl (°)	Hata Yüzdesi (%)
5	39,40	39,69	35,53	10,15
10	58,88	59,01	60,04	1,86
15	68,13	68,20	73,61	7,99
20	73,27	73,31	81,91	11,76

Tablo 4 incelendiğinde simülasyon sonucu ile teorik değerlerin birbirine kabul edilebilir yakınlıkta olduğu görülmektedir. Özellikle 10 mT ile 15 mT dış manyetik alan etkisinde hata oranı oldukça küçülmektedir. Mikro tüpün elastik yapısından dolayı deformasyon açısı arttıkça harekete karşı dirençten dolayı deformasyon açısının artış hızı dış manyetik alan arttıkça azalmaktadır.

Deformasyon açısı değerlerinin karşılaştırması grafiğe aktarılmış olup, Şekil 12’de gösterilmektedir.



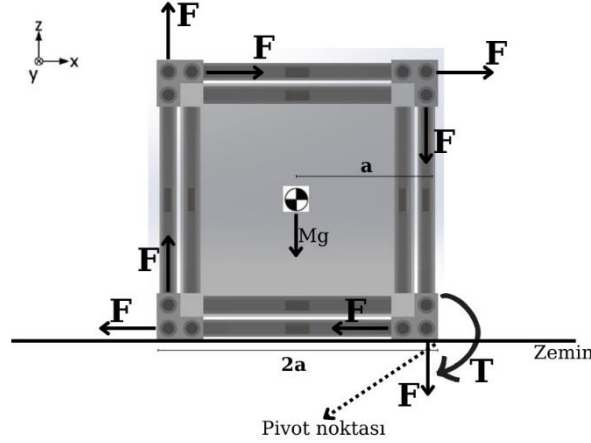
Şekil 12. Deformasyon açıl değerlerinin karşılaştırılması

**Bir Modülün Devrilme Mekanizmasının İncelenmesi**

Mikro tüp içerisine önceki bölümlerde aktarıldığı şekilde seçilen bir konfigürasyonla yerleştirilmiş mıknatıs çekirdeklerin dışarıdan uygulanan manyetik alan etkisiyle mikro tüpte oluşturduğu hareket neticesinde mikro KKMR

sistemde yer alan modüllerin hareketlendirilmesi, konfigürasyon değiştirmesi, kenetlenmesi ve ayrılması gibi operasyonların gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Bu operasyonların temelinde modüllerin devrilmesi hareketi bulunmaktadır. Bir modülün devrilmesi sonucunda pozisyonu değişecek ve sistemin konfigürasyonu yenilenecektir.

Dışarıdan uygulanan manyetik alan kontrol altındadır ve istediğimiz yönde ve şiddette uygulanabilmektedir. Bir modül tekil olarak ele alındığında tasarlanan yapı Şekil 13'te gösterilmektedir.



Şekil 13. Devrilme Mekanizmasının Şematik Gösterimi

Modülün kenarlarına Şekil 13'teki gibi yerleştirilen mikro tüpler yardımıyla kuvvetlerin oluşması ve bu kuvvetler yardımıyla modülün devrilmesi öngörülmektedir. Bu noktada devirmeyi sağlayan momentler ile dengeyi sağlayan momentler hesaplanarak birbiriyle karşılaştırılmakta, aynı zamanda modülün kaymasını önleyecek sürtünme kuvveti de göz önünde bulundurulmaktadır. Mikro ölçekte çalışıldığı için sürtünme kuvveti yapışma kuvvetiyle etkileşim içerisindedir ve bu kuvvetlerin detaylı bir şekilde modellenmesinin gelecek çalışmalarda yapılması planlanmaktadır. Şu an için devrilme hareketini sağlayacak genel bir sürtünme kuvveti modellenmiştir ve statik sürtünme katsayısı ile hesaplandığı varsayılmıştır ve matematiksel olarak ilerleyen eşitliklerde sunulmuştur.

$$f = \frac{\sum M_{dengeleyici}}{\sum M_{devirici}} \quad (7)$$

$$\sum M_{dengeleyici} = Mga \quad (8)$$

$$\sum M_{devirici} = 8Fa \quad (9)$$

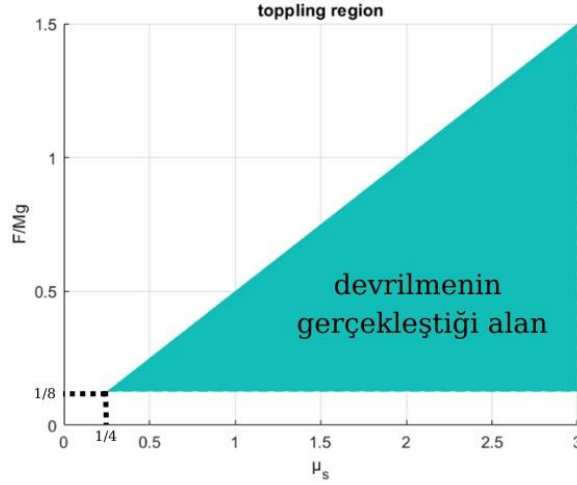
$$\frac{F}{Mg} \geq \frac{1}{8} \quad (10)$$

$$2F \leq \mu_s Mg \quad (11)$$

$$\frac{\mu_s}{2} \geq \frac{F}{Mg} \geq \frac{1}{8} \quad (12)$$

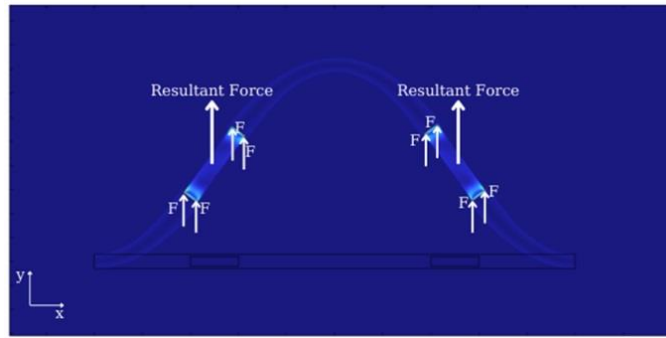
Devrilme mekanizmasının incelenmesi sonucunda devrilme olayının gerçekleştiği durumsal alan grafiksel olarak Şekil 14'te gösterilmektedir. Buna göre mikro tüpte oluşan kuvvetin modülün toplam kütlelerine oranının ve oluşan statik sürtünme katsayısının önemi ön plana çıkmaktadır.





Şekil 14. Devrilme Mekanizmasının Durumsal Gösterimi

Mikro tüpte oluşan kuvvetler x doğrultusunda birbirini elimine ederken y doğrultusunda eklemeli olarak etki etmektedir. Çalışmada y doğrultusunda oluşan kuvvetler ele alınmıştır. Oluşan kuvvetlerin şematik gösterimi Şekil 15’te sunulmaktadır.



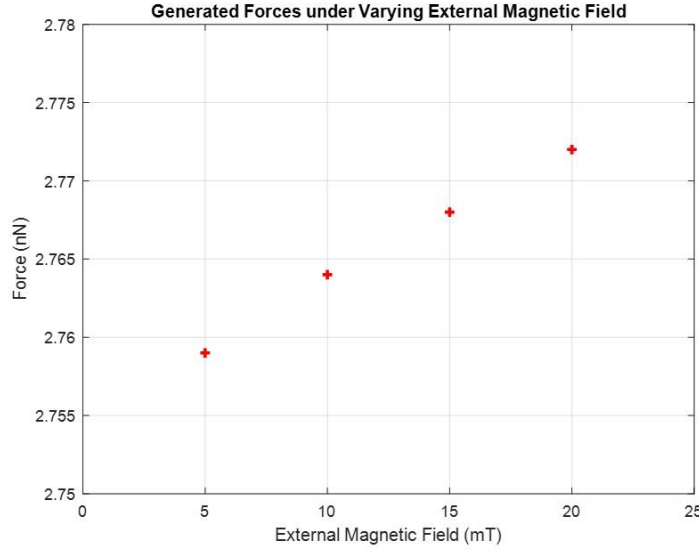
Şekil 15. Mikro Tüpte Oluşan y Doğrultulu Kuvvetler

Oluşan kuvvetlerin büyüklükleri ve izin verilen azami modül ağırlık değerleri Tablo 5’te gösterilmektedir.

**Tablo 5.** Oluşan Kuvvetler ve Azami Modül Ağırlık Değerleri

Dış Manyetik Alan (mT)	F (nN)	F_R (nN)	Mg (nN)-azami
5	0,3449	2,759	22,07
10	0,3454	2,764	22,11
15	0,3460	2,768	22,14
20	0,3466	2,772	22,18

Oluşan bileşke kuvvetlerin manyetik alana bağlı olarak değişimini gösteren grafik Şekil 16’da verilmektedir.



Şekil 16. Oluşan Bileşke Kuvvetler

Çalışmada elde edilen bulgular ışığında tasarım faaliyetleri sürdürülecek olup, modül ağırlığı gibi önemli bir parametre bulgular yardımıyla belirlenecektir.

## SONUÇLAR

Bu çalışmada dışsal manyetik eyleyiciler tarafından hareket sağlanan yeni bir kendi kendini konfigüre edebilen mikro robot için hareket mekanizması geliştirilmiştir. Mikro tüp ile içerisine yerleştirilecek mıknatıs çekirdeğinin optimum konfigürasyonunun iki adet mıknatıs çekirdeğin birbirine 100 µm uzaklıkta, mikro tüp merkezine göre simetrik bir şekilde konumlandığı pozisyonda, dış manyetik alanın yönünün -y olduğunda gerçekleştiği görülmüştür. Mekanizmanın dinamik modeli, sonlu elemanlar yöntemiyle COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında ulaşılan sonuçlar teorik değerler ile karşılaştırılarak sistemin doğrulanması sağlanmıştır. Sistemi oluşturan modüller tekil olarak incelenerek devrilme mekaniği matematiksel olarak modellenmiş olup, geleceğe yönelik önemli tasarım parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışmada sunulan bulgular ışığında mikro KKMR sisteminin tasarımının gerçekleştirilerek uygun hareket kontrolcülerinin geliştirilmesi planlanmaktadır.

## KAYNAKLAR

Abbott, J.J., Peyer, K.E., Lagomarsino, M.C., Zhang, L., Dong, L., Kaliakatsos, I.K., & Nelson, B.J. (2009). How should microrobots swim? *International Journal of Robotics Research*, 28, 157-167. <https://doi.org/10.1177/0278364909341658>

Al Khatib, E., Bhattacharjee, A., Razzaghi, P., Rogowski, L.W., Kim, M.J., & Hurmuzlu, Y. (2020). Magnetically Actuated Simple Millirobots for Complex Navigation and Modular Assembly. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 2958-2965. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2974389>

Ceylan, H., Giltinan, J., Kozielski, K., & Sitti, M. (2017). Mobile microrobots for bioengineering applications. *Lab Chip*, 17(10), 1705-1724. <https://doi.org/10.1039/C7LC00064B>

Ciszewski, M., Buratowski, T., Giergiel, M., Małka, P., & Kurc, K. (2014). Virtual prototyping, design and analysis of an in-pipe inspection mobile robot. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 52(2), 417-429.

COMSOL Multiphysics® v. 6.0. [www.comsol.com](http://www.comsol.com). COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

Diller, E., Pawashe, C., Floyd, S. & Sitti, M. (2011). Assembly and disassembly of magnetic mobile micro-robots towards deterministic 2-D reconfigurable micro-systems. *International Journal of Robotics Research*, 30(14), 1667-1680. <https://doi.org/10.1177/0278364911416140>

- Ergeneman, O., Dogangil, G., Kummer, M.P., Abbott, J.J., Nazeeruddin, M.K., & Nelson, B.J. (2008). A magnetically controlled wireless optical oxygen sensor for intraocular measurements. *IEEE Sensors Journal*, 8(1), 29-37. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2007.912552>
- Feczko, J., Manka, M., Krol, P., Giergiel, M., Uhl, T., & Pietrzyk, A. (2015, July). Review of the modular self reconfigurable robotic systems. In 2015 10th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo) (pp. 182-187). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RoMoCo.2015.7219733>
- Fiaz, U.A., & Shamma, J.S. (2019). usBot: A modular robotic testbed for programmable self-assembly. *IFAC - PapersOnLine*, 52(15), 121-126. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.661>
- Fukuda, T., Nakagawa, S., Kawauchi, Y., & Buss, M. (1989, May). Structure decision method for self organising robots based on cell structures – CEBOT. In 1989 Proceedings of International Conference on Robotics and Automation (pp. 695-700). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1989.100066>
- Fukuda, T., & Nakagawa, S. (1988). Approach to the dynamically reconfigurable robotic system. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1(1), 55-72. <https://doi.org/10.1007/BF00437320>
- Fulton, J.A., & Schaub, H. (2021). Forward dynamics analysis of origami-folded deployable spacecraft structures. *Acta Astronautica*, 186, 549-561. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.03.022>
- Goeller, M., Oberlaender, J., Uhl, K., Roennau, A., & Dillmann, R. (2012, December). Modular robots for on-orbit satellite servicing. In 2012 International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (pp. 2018-2023). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2012.6491265>
- Hirai, M., Hirose, S., & Lee, W. (2013). Gunryu III: Reconfigurable magnetic wall-climbing robot for decommissioning of nuclear reactor. *Advanced Robotics*, 27(14), 1099-1111. <https://doi.org/10.1080/01691864.2013.812174>
- Holobut, P., Bordas, S.P., & Lengiewicz, J. (2020, October). Autonomous model-based assessment of mechanical failures of reconfigurable modular robots with a Conjugate Gradient solver. In 2020 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 11696-11702). IEEE/RSJ. <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341232>
- Jahanshahi, M.R., Shen, W.M., Mondal, T.G., Abdelbarr, M., Masri, S.F., & Qidwai, U.A. (2017). Reconfigurable swarm robots for structural health monitoring: a brief review. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 1(3), 287-305. <https://doi.org/10.1007/s41315-017-0024-8>
- Jeon, S., Hoshiar, A.K., Kim, S., Lee, S., Kim, E., Lee, S., Kim, K., Lee, J., Kim, J., & Choi, H. (2018). Improving guidewire-mediated steerability of a magnetically actuated flexible microrobot. *Micro and Nano Systems Letters*, 6:15. <https://doi.org/10.1186/s40486-018-0077-y>
- Kirby, B.T., Aksak, B., Campbell, J.D., Hoburg, J.F., Mowry, T.C., Pillai, P., & Goldstein, S.C. (2007, October). A modular robotic system using magnetic force effectors. In 2007 International Conference on Intelligent Robots and Systems (pp. 2787-2793). IEEE/RSJ. <https://doi.org/10.1109/IROS.2007.4399444>
- Knizhnik, G., & Yim, M. (2020, June). Design and Experiments with a Low-Cost Single-Motor Modular Aquatic Robot. In 2020 17th International Conference on Ubiquitous Robots (UR) (pp. 233-240). <https://doi.org/10.1109/UR49135.2020.9144872>
- Lin, D., Jiao, N., Wang, Z., & Liu, L. (2021). A Magnetic Continuum Robot with Multi-Mode Control Using Opposite-Magnetized Magnets. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2), 2485-2492. <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3061376>
- Lyder, A., Garcia, R.F.M., & Stoy, K. (2008, September). Mechanical design of Odin, an extendable heterogeneous deformable modular robot. In 2008 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 883-889). IEEE/RSJ. <https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4650888>

- Mastrangeli, M., Abbasi, S., Varel, C., Van Hoof, C., Celis, J.P., & Bohringer, K.F. (2009). Self-assembly from milli- to nanoscales: Methods and applications. *Journal of micromechanics and microengineering: structures, devices and systems*, 19(8), 83001. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/19/8/083001>
- Murata, S., Kurokawa, H., & Kokaji, S. (1994, May). Self-assembling machine. In 1994 Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (pp. 441-448). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1994.351257>
- Nguyen B.H., Son P.T., Kim, J.S., & Lee, J.W. (2020). Field-focused reconfigurable magnetic metamaterial for wireless power transfer and propulsion of an untethered microrobot. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 494, 165778. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165778>
- Paulos, J., Eckenstein, N., Tosun, T., Seo, J., Davey, J., Greco, J., Kumar, V., & Yim, M. (2015). Automated Self-Assembly of Large Maritime Structures by a Team of Robotic Boats. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 12(3), 958-968. <https://doi.org/10.1109/TASE.2015.2416678>
- Pawashe, C., Floyd, S., & Sitti, M. (2009). Modeling and experimental characterization of an untethered magnetic micro-robot. *International Journal of Robotics Research*, 28(8), 1077-1094. <https://doi.org/10.1177/0278364909341413>
- Pieters, R., Lombriser, S., Alvarez-Aguirre, A., & Nelson, B.J. (2016). Model Predictive Control of a Magnetically Guided Rolling Microrobot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1(1), 455-460. <https://doi.org/10.1109/LRA.2016.2521407>
- Ren, L., Nama, N., McNeill, J.M., Soto, F., Yan, Z., Liu, W., Wang, W., Wang, J., & Mallouk, T.E. (2019). 3D steerable, acoustically powered microswimmers for single-particle manipulation. *Science Advances*, 5(10), eaax3084. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax3084>
- Sawetzki, T., Rahmouni, S., Bechinger, C., & Marr, D.W. (2008). In situ assembly of linked geometrically coupled microdevices. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(51), 20141-5. <https://doi.org/10.1073/pnas.0808808105>
- Sprowitz, A., Pouya, S., Bonardi, S., Van Den Kieboom, J., Mockel, R., Billard, A., Dillenbourg, P., & Ijspeert A. (2010). Roombots: Reconfigurable robots for adaptive furniture. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 5(3), 20-32. <https://doi.org/10.1109/MCI.2010.937320>
- Thalamy, P., Piranda, B., Naz, A., & Bourgeois, J. (2022). VisibleSim: A behavioral simulation framework for lattice modular robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 147, 103913. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103913>
- White, P.J., & Yim, M. (2010). Reliable external actuation for full reachability in robotic modular self-reconfiguration. *International Journal of Robotics Research*, 29(5), 598-612. <https://doi.org/10.1177/0278364909351942>
- Wolfe, K.C., Moses, M.S., Kutzer, M.D., & Chirikjian, G.S. (2012, May). M3Express: A low-cost independently-mobile reconfigurable modular robot. In 2012 International Conference on Robotics and Automation (pp. 2704-2710). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6224971>
- Yang, Z., & Zhang, L. (2020). Magnetic Actuation Systems for Miniature Robots: A Review. *Advanced Intelligent Systems*, 2, 2000082. <https://doi.org/10.1002/aisy.202000082>
- Yim, M., Shen, W.M., Salemi, B., Rus, D., Moll, M., Lipson, H., Klavins, E., & Chirikjian, G.S. (2007). Modular selfreconfigurable robot systems [Grand challenges of robotics]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(1), 43-52. <https://doi.org/10.1109/MRA.2007.339623>
- Zhou, H., Mayorga-Martinez, C.C., Pane, S., Zhang, L., & Pumera, M. (2021). Magnetically Driven Micro and Nanorobots. *Chemical Reviews*, 121(8), 4999-5041. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c01234>