



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Piezo aktüatör ile tahrik edilen yüzer mini robot tasarımı

Floating mini robot design driven by piezo actuator

Yazar(lar) (Author(s)): Nida Nur KARAGÖZ¹, Sinan ATICI², Berk Faruk YAMAN³, Bünyamin TOPACIK⁴, Selçuk KİZİR⁵

ORCID¹: 0000-0002-6264-1319

ORCID²: 0000-0002-5997-2969

ORCID³: 0000-0003-0767-7009

ORCID⁴: 0000-0002-0220-6016

ORCID⁵: 0000-0002-0582-5904

To cite to this article: Karagöz N. N., Atıcı S., Yaman B. F., Topacık B., Kizir S., “Piezo aktüatör ile tahrik edilen yüzer mini robot tasarımı”, *Journal of Polytechnic*, 26(2): 519-527, (2023).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Karagöz N. N., Atıcı S., Yaman B. F., Topacık B., Kizir S., “Piezo aktüatör ile tahrik edilen yüzer mini robot tasarımı”, *Politeknik Dergisi*, 26(2): 519-527, (2023).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.993182

Piezo Aktüatör ile Tahrik Edilen Yüzer Mini Robot Tasarımı

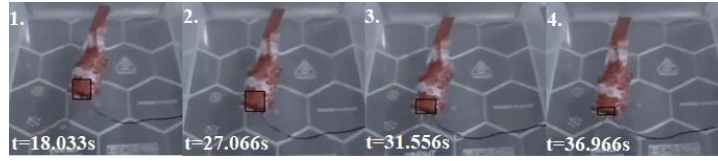
Floating Mini Robot Design Driven by Piezo Actuator

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Yüzer mini robot için uygun aktüatör seçimi / Selection of suitable actuator for the floating mini robot
- ❖ Piezo bimorfu tahrik etmek için optimum gerilim, doluluk oranı, pwm frekansı ve lojik sürelerin belirlenmesi / Determination of optimum voltage, duty cycle, PWM frequency, and logic times to drive the piezo bimorph.
- ❖ Robotun sudaki davranışını etkileyen malzemelerin seçilmesi ve robot tasarımının yapılması / Choosing the materials that affect the behavior of the robot in water and designing the robot
- ❖ Robotun sudaki koordinatlarının bilgisayar görmesi ile izlenmesi / Monitoring the robot's coordinates in the water via computer vision

Grafik Özet (Graphical Abstract)

PZT-5H ile yüzer mini robotun su içerisinde yüzdürülmesi./ Swimming the swimming mini robot in water with the PZT-5H.



Şekil. Yüzdürülen Prototip / Swimming of Prototype

Amaç (Aim)

Çalışmada Piezo bimorfu aktüatör ile tahrik edilen robotun sudaki en iyi hareketinin gözlemlenmesi ve bilgisayar görmesi ile takibi amaçlanmıştır. / In this study, it is aimed to observe the best movement of the robot driven by the Piezo bimorph actuator in the water and to follow it with computer vision.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Piezo bimorfu aktüatör olarak kullanılmak üzere, önce sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş; ardından değişen gerilim, doluluk oranı, pwm frekansı ve lojik süreler ile deneysel olarak test edilmiştir. / Piezo bimorph actuator was firstly analyzed by the finite element method; then it is experimentally tested with varying voltage, duty cycle, PWM frequency, and logic times

Özgünlük (Originality)

Bu çalışma piezo bimorfun aktüatör olarak kullanıldığı çeşitli malzemelerle tasarlanan robotların suda yüzmeye performansını karşılaştıran bir çalışmadır. / This study is the study comparing the swimming performance of robots designed with various materials, in which they are used as piezo bimorph actuators.

Bulgular (Findings)

Tasarımda kullanılan malzemelerin, piezo bimorfu aktüatör ile tahrik edilen robotun suda yüzmeye hızı performansına doğrudan etkisi olduğu gözlemlenmiştir. / It has been observed that the materials used in the design have a great effect on the swimming velocity performance of the robot-driven by the piezo bimorph actuator.

Sonuç (Conclusion)

Piezo bimorfu; 25V gerilim, 20ms-20ms lojik süre değerleri ile sürüldüğünde ve gövdede camsi silikon malzeme kullanıldığında robotun optimum hızı gözlemlenmiştir. / The robot's optimum velocity was observed when piezo bimorph was driven with 25V and 20ms-20ms logic time values and when glassy silicon material was used in robot's body.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission. +-

Piezo Aktüatör ile Tahrik Edilen Yüzer Mini Robot Tasarımı

Araştırma Makalesi / Research Article

Nida Nur KARAGÖZ, Sinan ATICI, Berk Faruk YAMAN, Bünyamin TOPACIK, Selçuk KIZIR*

Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 09.09.2021 ; Kabul/Accepted : 26.11.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 15.12.2021)

ÖZ

Geçmişten günümüze insanoğlu, yaşam kalitesini geliştirmek ve karşılaştığı sorunların üstesinden gelebilmek için doğadaki pek çok şeyi gözlemlemiş ve taklit etmiştir. Günümüzde, biyomimetik biliminin gelişimi robotik alanını da oldukça etkilemektedir. Bu çalışmada; piezo bimorf ile tahrik edilen kurbağa larvası hareketini taklit eden bir mini robotun en uygun tasarımına ulaşmak ve bu robotun optimum çalışma değerlerini tespit etmek amaçlanmıştır. Matematiksel analiz ve bilgisayar simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışma, bilgisayar görmesi yöntemi ve joystick sistem ile desteklenmiştir. Bunlarla beraber bu çalışmada, karşılaşılan problemlerden ve uygulanan alternatif yollardan da bahsedilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Biyomimetik, piezo bimorf, mini robot, kurbağa larvası.

Floating Mini Robot Design Driven by Piezo Actuator

ABSTRACT

From past to present, human beings have observed and imitated many things in nature to improve their quality of life and overcome the problems they face. Today, the development of biomimetic science also greatly influences robotics. In this study, it is aimed to reach the most suitable design of a mini-robot that imitates the movement of tadpoles driven by piezo bimorph and to determine the optimum operating values of this robot. Mathematical analysis and computer simulations were carried out. The study was supported by the computer vision method and haptic system. In addition to these, the problems encountered and the alternative ways applied are also mentioned in this article.

Keywords: Biomimetic, piezo bimorph, mini robot, swimming tadpole.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde mini robotların kullanımı oldukça yaygınlaşmaktadır. Küçük boyuta ve bir su içerisinde hareket yeteneğine sahip olabilmesi için çeşitli gereksinimlere ihtiyaç duymaktadır. Bir mini robotun sahip olması gereken en önemli özellik, çok küçük bir alanda çalışma yapabilme yeteneğidir. Su içerisindeki bir mini-robotu tahrik ederek hareketini gerçekleştirecek birim aktüatördür. Aktüatör seçimi, yapılan çalışmanın ihtiyacına göre belirlenir. Gerilim ihtiyacına göre güvenlik problemi, robotun boyutu, tedarik kolaylığı, maliyet, performans gibi özellikler göz önüne alınarak aktüatör seçimi yapılır. Su içerisinde hareket edebilen mini robotların tahriklerinin sağlanması ve tasarımları üzerine literatürde birçok çalışma bulunmaktadır.

Tan vd. [1], alabalık benzetimli çok işlevli piezo aktüatörlü robotik balık tasarımında NASA Langley.

Araştırma Merkezi tarafından geliştirilen makro-fiber kompozit teknolojisi (MFC) kullanılmışlardır. Fukuda vd. [2] tasarladıkları robotta PZT (kurşun zirkonat titanat) aktüatör ve iki adet yüzgeç kullanarak robotun hareketini gözlemlemişlerdir. Fukuda, başka bir çalışmada 4 adet SMA (şekil hafızalı alaşım) aktüatör ile tahrik edilen bir robot geliştirmiştir. Dört adet aktüatör kullanıldığı için karmaşık bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duymaktadır

[3]. Honda vd. [4] farklı bir yüzer mekanizması önermiştir. Robot, spiral tele tutturulmuş mıknatıstan oluşan, harici bir manyetik alan nedeniyle mıknatısın dönmesiyle hareket eden yeni bir yapıya sahiptir. Bu çalışmaya kadar yapılan çalışmalarda güç kablolarından bağımsız bir hareket söz konusu değildir. Bu çalışmada ise harici bir manyetik alanla robot kontrolü sağlanabilir [4]. Buna benzer olarak Song vd. [5] Helmholtz bobin çifti ve Maxwell bobin çifti ile robotu iki boyutlu düzlemde 2 serbestlik dereceli hareket ettirmiştir. Choi ve arkadaşları da aynı bobin çiftlerini kullanarak MNS (manyetik navigasyon sistemi) ile mikro robotu kontrol etmiştir [6-7]. Zhong vd. [8] kurbağa larvası benzeri robot kuyruğunun ucuna mıknatıs yerleştirmiş ve bobin tarafından oluşturulan manyetik alan sayesinde mıknatısla beraber kuyruk hareketi ile bir itme kuvveti meydana getirmişlerdir. Diğer bir çalışmada robot, üç eksenli Helmholtz bobin kullanılarak üç eksenli hareket ettirilebilir. Robot, manyetik kafa ve spiral bir kuyruktan oluşmaktadır. Bu manyetik kafa, harici bir manyetik alan kontrolü ile döner ve spiral kuyruk, dönme kuvvetini itme kuvvetine dönüştürür [9- 10].

Mei vd. [11] iki FMP (ferromanyetik polimer) kanatçık aktüatörle çalıştırılan, harici manyetik alanla kablosuz olarak sürülen, su altında hız ve yön kontrolünü mümkün kılan bir robot geliştirmiştir. Zhang vd. [12] manyetik alan altında FMP aktüatörleri tarafından tahrik edilen robotun, manyetik yoğunluk 8mT'den yüksek ve frekans

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : selcuk.kizir@kocaeli.edu.tr

10 Hz civarında olduğunda 0.3-1mm/s hızla yüzebildiğini göstermiştir. Manyetik alanın yoğunluğunu değiştirerek yüzme hızının kontrol edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Robotun yüzme hızı, manyetik yoğunluk ile doğru orantılı olduğu sonucuna ulaşılmış ve aktüatörlerin rezonans frekansını azaltarak hız artırılabilmiştir. Sawamoto vd. [13], servo aktüatör olarak elektromanyetik aktüatör kullanan robot için yeni bir kanat tipi önermiştir. Kalıcı bir mıknatıs tarafından tahrik edilen hareketli kanat, alternatif manyetik alanın frekans ayarlamasıyla kontrol edilebilmektedir ve frekansla hız kontrolü yapılabilmektedir. Kim vd. [14] diğer çalışmalardan farklı olarak, robotun hareketini manyetik alan gücü ve sürüş frekansı ile kontrol etmek yerine; saha kontrolleri olmadan çalışma alanında robotun kendisi üzerindeki itme kuvvetini artırma üzerine çalışmıştır. Geliştirilen itme kuvveti mekanizması, iki spiral tip makine arasında iki mıknatısa dayanan manyetik bir süspansiyon yapısı kullanır. Böylelikle iki itme kuvveti oluşur, iki itme kuvveti ve manyetik itme kuvvetinin kombinasyonu, toplam bir itme kuvveti haline gelir [15-16].

Guo vd. [17] düşük gerilimlerde çalışan ICPF (iyonik iletken polimer film) aktüatörü kullanan bir su altı robotu geliştirilmiştir. Robotunun yüzme hızının giriş geriliminin frekansını değiştirerek kontrol edilebileceği; hareket yönü giriş geriliminin genliği ve frekansı değiştirilerek kontrol edilebileceği sonuçlarına ulaşılmıştır. IPMC (iyonik polimer metal kompozit) aktüatör düşük basınçta büyük bükülme hareketleri yapabilir, düşük gerilimle ve düşük frekansla çalışabilir, sessizdir, ıslak durumda çalışabilir, hafiftir, esnektir, kimyasal olarak her iki tarafı platin kaplıdır [18-19]. Guo vd. [20] esneklik özelliğine sahip, kablosuz kumanda ile çalıştırılan ve aktüatör olarak servo motorları kullanan top tipi su altı robot geliştirmiştir. Güç kablosu kullanılmamaktadır. Bu robotun dönme mekanizması olarak açısını PWM (darbe genişlik modülasyonu) ile kontrol eden reaksiyon çarkı geliştirilmiştir. Balanagajyothi vd. [21] robotun yön kontrolü için bir servo motor kullanmıştır. Aracı hareket ettirmek için gereken minimum kuvvet, gövdeye etki eden basınç direncine ve onun ataletine bağlıdır. Helisel bobin tarafından üretilen itme, motorun hızına bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Korkmaz vd. [22] tarafından merkezi model oluşturucu yaklaşımına dayalı otonom yüzme özelliğine sahip i-ROF adlı biyomimetik robotik balık tasarlanmıştır. Robotun itme kuvveti, seri iki bağlantılı kuyruk mekanizması tarafından üretilmektedir. Her bir bağlantı 7.4V'luk RC servo motor ile tahrik edilmektedir.

Daha önce yapılmış olan araştırmalar incelendiğinde servo motor, hidrolik aktüatör (pompa), DC motor gibi aktüatörler gelenekselleşmiş hale gelmiştir. İyonik

polimer metal kompozit (IPMCs), şekil hafızalı alaşımlar (SMAs) [23], manyetostriktif ince film, piezo bimorf gibi aktüatörler ise son zamanlarda oldukça ilgi görmektedir. IPMC aktüatörün son zamanlarda bu kadar ilgi görmesinin sebebi, düşük gerilim ile yüksek genlik elde edilmesine imkân sağlıyor olmasıdır. Fakat tedarik etmek oldukça zor ve masraflıdır. Geleneksel motor tabanlılar karmaşık yapısal tasarımı içerir ancak yüksek yüzme hızları sağlamaktadır. Son zamanlarda kullanılan IPMC'lerin ise basit tasarımları bulunmaktadır, gürültüsüzdürler ama düşük yüzme hızlarına sahiptirler. Piezo aktüatörler bükme olayı için büyük dinamik gerilim sunarlar ve düşük/yüksek frekanslı uygulamalar için yüksek performans sağlarlar. Piezo malzemenin dezavantajı ise giriş gerilimi yüksek ve çıkış gerilimi düşüktür.

Bu çalışmada, kurbağa larvasından esinlenilerek bir yüzer mini robot tasarlanmış ve yüzme performansı, bilgisayar görmesi tekniği ile takip edilmiştir. Performans, maliyet, tedarik kolaylığı, gerilim gereksinimi gibi unsurlar dikkate alınarak aktüatör olarak piezo seçilmiştir. Kuyruk üzerinde kullanılan piezo aktüatöre verilen gerilim, hareket enerjisine dönüştürülerek kuyruğun itme gücü ile robotun konum değişimi amaçlanmıştır. 2. Bölümde teorik analiz; 3. Bölümde robotun hareketi için kullanılan farklı metotlar, materyaller ve kontrol çeşitlerinden bahsedilmiştir; 4. Bölümde robot ve kullanılan malzemeler hakkında elde edilen bulgular ve bunlara bağlı olarak robotun kütlesi ve yüzme hızı gibi kriterler hakkında tartışılmıştır; 5. Bölümde yapılan deneyler ve bunlar sonucunda elde edilen yeni fikirlerden bahsedilmiştir.

2. TEORİK ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

2.1. Piezo Seramiğin Karakteristiği (Characteristic of Piezo Ceramic)

Piezo elektrik seramiğin yapısal matrislerini yazmak için, elektriksel yer değiştirme formülü ve Hooke yasası Denklem 1 ve 2'de verilmiştir. Burada D elektriksel yer değiştirme, E elektrik alanı, S gerginlik, T stres, d piezo elektrik bağıntı, s uygunluk, d* elektrostriktif kuplaj, ε dielektrik sabitidir.

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (1)$$

$$S = sT + dE + d^* E \quad (2)$$

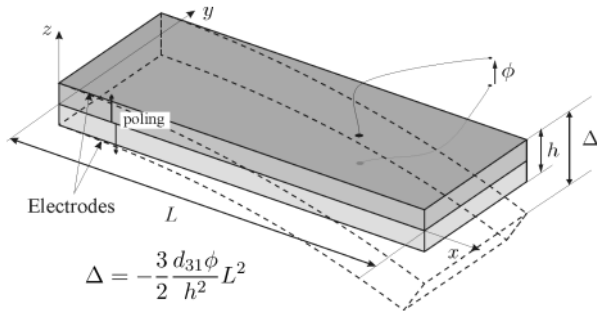
Piezo elektrik malzemelerin kristal simetrisinden dolayı kuplaj matrisleri piezo türleri arasında farklılık gösterir [24]. Tahrik için Denklem 3 ve 4 [25], ve PZT'nin birleştirme matrisi Denklem 5'te verilmiştir [25]. PZT'ye ait üç ana çalıştırma/algılama modu vardır. Düzlem içi mod (d_{31} , d_{32}), kalınlık modu (d_{33}) ve kesme modu (d_{15} , d_{24})

$$\begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ 2S_{23} \\ 2S_{13} \\ 2S_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$[d]_{PZT} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, (d_{32} = d_{31}, d_{24} = d_{15}) \quad (5)$$

Şekil 1’de bimorf çalıştırma modeli görülmektedir. Bu model bir bükme aktüatörü elde etmek için birlikte istiflenmiş zıt polarizasyona sahip iki piezoelektrik plakadan oluşur [25]. Burada ϕ uygulanan gerilim ve sapmadır.



Şekil 1. Bimorf Çalıştırma Modeli. (Bimorph Actuation Model.) [25]

2.2. Robotun su ortamındaki dinamiği (The dynamics of the robot in the aquatic environment):

Sader ve çalışma arkadaşlarının atomik kuvvet mikroskobu konsolları üzerine yaptıkları önceki çalışmalara dayanarak konsolun su altı titreşimlerini tahmin etmek için hidrodinamik etkiler dahil edilmiştir [26-27-28].

Ayrıca Sader'in teorisi [27-28], uzunluk-genişlik oranının ($L = b$) büyük olduğunu ve doğrusal olmayan 3-D hidrodinamik etkiler nedeniyle L ve b karşılaştırılabilir hale geldikçe tahminlerin doğruluğunun azaldığını varsayar [26-27-28-29]. Uzunluk m_a başına eklenen kütle ve hidrodinamik sönümlenme oranı ξ_h , hidrodinamik fonksiyon Γ cinsinden şu şekilde ifade edilebilir [26-27]:

$$m_a = \frac{\pi p_w b^2}{4} \Gamma_r \quad (6)$$

Burada p_w suyun kütle yoğunluğu, Γ_r hidrodinamik fonksiyon Γ 'nin gerçek kısmıdır ve b bimorf iticinin genişliğidir. Hidrodinamik fonksiyon, analitik veya sayısal olarak hesaplanabilir. Su altı titreşimlerinin toplam sönümlenme oranı (ξ_w) için hem yapısal hem de hidrodinamik sönümlenme etkileri dikkate alınır.

$\xi_w =$ yapısal sönümlenme + hidrodinamik sönümlenme.

$$\xi_w = \xi_s + \xi_h \quad (7)$$

Su altı titreşimleri için uzunluk ve sönümlenme katsayısı terimlerinden, uzunluk başına kütle aşağıdaki gibi hesaplanır. Burada w_{nsu} , sualtı doğal frekansıdır. Su ortamındaki uç hızı tepki genliği şu şekilde hesaplanır:

$$m = m_w = m_s + m_a \quad (8)$$

$$c = 2m\xi_w w_{nsu} = 2m_w(\xi_s + \xi_h)w_{nsu} \quad (9)$$

$$w_{n,su} = w_{n,hava} \sqrt{\left(1 + \frac{\pi p_w b^2}{4m_s} \Gamma_r\right)^{-1}} \quad (10)$$

$$\left| \frac{\partial w(L,t)}{\partial t} \right| = \left| \Phi(L) \frac{dn(t)}{dt} \right| = \left| \frac{V_0 w \theta \Phi(L)}{w_{n,su}^2 - w^2 + j2\xi_s w_{n,su} w} \right| \quad (11)$$

2.3. İtme katsayısının belirlenmesi (Determination of the thrust coefficient)

Bu bölümde, iticinin hidrodinamik itme katsayısı, piezo iticinin ortalama itme ve enine uç hızına dayalı olarak çıkarılır.

$$Re_L = \frac{w\delta L}{\nu} \quad (12)$$

Burada v suyun kinematik viskozitesi, w frekans, $V = \eta/p_w$ ve $\delta = |w(L,t)|$ uç yer değiştirme genliğidir. İtme katsayısı:

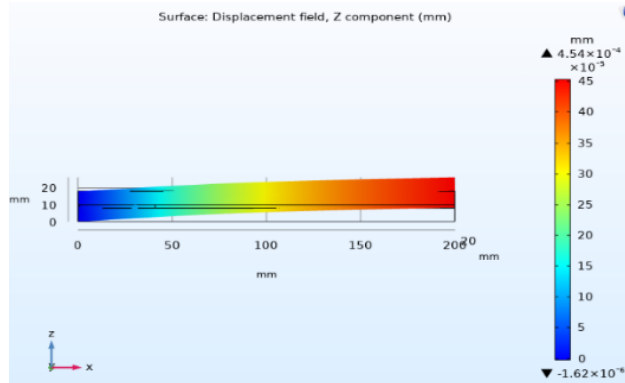
$$C_\tau = \frac{\tau}{\frac{1}{2}p_w w^2 \delta^2 L} \quad (13)$$

$$C_\tau = \frac{\frac{\pi p_w b}{8} \left(\frac{\partial w(L,t)}{\partial t} \right)^2}{\frac{1}{2} p_w w^2 \delta^2 L} = \frac{\frac{\pi p_w b}{8} \times \frac{w^2 \delta^2}{2}}{\frac{1}{2} p_w w^2 \delta^2 L} = \frac{\pi b}{8L} = 0.1524 \quad (14)$$

$$T = \frac{\pi p_w b^2 v^2}{16L^2} \times Re_L^2 = 3.322 \times 10^{-11} Re_L^2 \quad (15)$$

2.4. Piezo Seramiğin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi (Analysis of Piezo Ceramics with Finite Element Method)

Sistem fiziksel olarak piezoelektrik ve yapısal gerilimlerinin özelliklerini içerir. 5V - 220V aralığındaki AC değerler piezoya uygulandığında analiz sonuçları olarak piezodan (PZT-5H) Z doğrultusunda $7.56 \cdot 10^{-5}$ mm ile $3.33 \cdot 10^{-3}$ mm arasında maksimum yer değiştirme değerleri elde ettiği gözlemlenmektedir. Hedeflenen çalışma gerilimi altında elde edilen analiz sonucu Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. AC $\pm 30V$ için Z doğrultusundaki maksimum yer değiştirme $4.54 \cdot 10^{-4}$ mm. (For AC $\pm 30V$ and displacement of Z-direction and max displacement is $4.54 \cdot 10^{-4}$ mm.)

3. METOD, MATERYAL, KONTROL (METHOD, MATERIAL, CONTROL)

3.1. Metot (Method)

Bu çalışmada aktüatör olarak kullanılan piezo bimorfün karakteristik özellikleri test edilmiştir. Piezo bimorfu aktüatör olarak kuyruğa monte ederek robota itme gücünün verilmesi amaçlanmıştır. Robot hareketi için en uygun gerilim, PWM (darbe genişlik modülasyonu) oranı, PWM frekansı ve lojik süreler tespit edilmiştir. Bu amaçla piezo bimorf üzerinde farklı parametreler değiştirilerek testler gerçekleştirilmelidir. En uygun parametrelerin belirlenmesi ve bir sonraki aşamaya geçilmesi hedeflenmektedir. Burada kuyruğun en uygun hareketini gözlemlemek önemlidir. Piezo

bimorf, bir aktüatör görevi göreceği için tüm robotun hareketi ve tasarımı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.

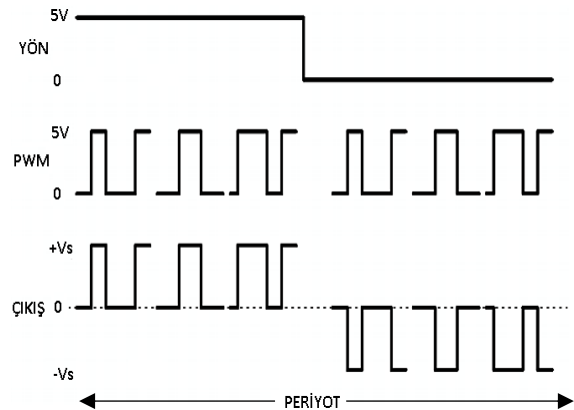
Yapılan deneylerde piezo bimorfün bir H köprü sürücü vasıtasıyla sürülmesi amaçlanmaktadır. Bu testler sırasında sürücü DC gerilim ile beslenmiş ve çıkışından bipolar gerilim alınmıştır. Şekil 3'te sürme tekniği gösterilmiştir. Deneyler farklı parametreler değiştirilerek birçok kez tekrarlanmıştır. Aşağıdaki deneyler üç farklı şekilde kontrol edilmiştir:

- Bilgisayar ile kontrol
- Joystick ile kontrol
- Bluetooth ile kontrol

Lojik değerler ile zaman bazında değişiklik yapılarak testler gerçekleştirilmiştir. Piezo bimorfün optimum titreşim genliği ve frekansı, 20-20ms ve 10-40ms lojik değerlerinde gözlenmiştir. Periyot-gerilim-hareket ilişkisine ait örnek eğriler Tablo 1'de verilmiştir. Lojik değerler koordinat sisteminde sırasıyla 20-20ms iken +y ve -y arasında hareket eder. Lojik değerler 10-40ms olarak ayarlandığında koordinat sisteminde sadece +y yönündeki hareket gözlemlenir. Mantıksal değerler 40-10ms'ye ayarlandığında, koordinat sisteminde sadece -y yönünde hareket gözlemlenir. Bu sayede robotun yön kontrolünün sağlanabileceği değerler belirlenmiştir.

Sürücüye güç kaynağı üzerinden verilen gerilim 0-40V arasında değiştirilmiştir. 25V DC gerilimle sürücü, piezoyu en iyi şekilde sürmüştür. %0-%100 arasındaki PWM oran değerleri joystick ile değiştirilmiş ve anlık kontrol sağlanmıştır. Aynı şekilde periyot oranları da joystick ile anlık olarak kontrol edilmiştir.

Frekans etkisini gözlemleyebilmek için farklı frekanslar kullanılarak PWM üretimi amaçlanmıştır. Bu üretimi gerçekleştirmek için iki seçenek vardır. 5Hz-200kHz arasındaki frekans değerleri uygulanmıştır. Bu deneyler sonucunda PWM frekansının piezodan çıkan sesi oldukça etkilediği gözlemlenmiştir. Ancak hareketlilik üzerinde fazla bir etkisi olduğu gözlemlenmemiştir.



Şekil 3. Piezo bimorf eyleyicisinin sürülmesi. (Driving the piezo bimorph actuator.)

Çizelge 1. Periyot-gerilim-hareket ilişkisi. (Relation of periot-voltage-motion.)

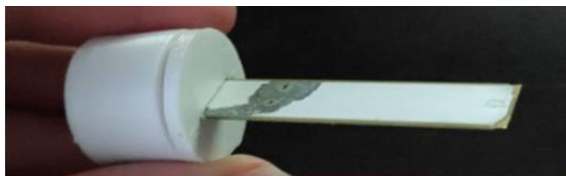
Periyot (ms)	Besleme Gerilimi (Vs)	Hareket
10-10-10-10	0-14V DC	yok
10-10-10-10	15V DC	az
10-10-10-10	30V DC	yüksek
40-40-40-40	0-9V DC	yok
40-40-40-40	10V DC	az
40-40-40-40	30V DC	yüksek

3.2. Materyal (Material)

Tasarım oluşturulurken güvenlik, tedarik kolaylığı, fiyat, performans gibi özelliklere göre oluşturulmalıdır. Robot tasarımında az sayıda ve hafif malzeme kullanılmalıdır çünkü piezo seramik sınırlı itme gücüne sahiptir, ağır bir kuyruğu hareket ettiremez ve gövdeyi ittiremez. Boyut, ağırlık ve güvenlik için pil gerilimi minimum seviyede tutmak önemlidir. Piezo seramik malzemelerin ihtiyaç duyduğu gerilim seviyeleri, piezonun boyutu ve maliyeti ile doğru orantılıdır. Bundan dolayı minimum boyutlarda piezo seramik aktüatör tercih edilmiştir. Kullanılan sürücü modeli L298N'dir. Robot tasarımında kullanılacak olan malzeme seçimi yapılırken piezonun iyi sabitlenmesi, piezonun itebileceği ağırlıkta bir kafa, piezonun iyi salınım yaptırabileceği bir kuyruk ve robotun su geçirmemesi gibi gereksinimleri göz önüne alınmıştır. Berlinger vd. [30] ve Ay vd. [31] çalışmalarındaki kuyruk modelleri karşılaştırmaları incelenmiş, farklı kuyruk modellerinin robot hızına ve yer değiştirmesine olan etkileri gözlemlenmiştir.

Piezo aktüatörün hareket ettirebileceği en ideal kafa modelini seçerken kullanılan farklı robot kafası tasarımları Şekil 4 üzerinde gösterilmiştir. Sırasıyla kafa tasarımları: Esnek filament malzemeli yuvarlak kafa, esnek filament malzemeli cıvatalı dikdörtgen kafa, fiber malzemeli cıvatalı dikdörtgen kafa ve camsı silikon malzemeli cıvatalı dikdörtgen kafa.

Piezo aktüatörün iyi salınım yaptırabileceği en ideal kuyruk modelini seçerken kullanılan farklı robot kuyruk tasarımları Şekil 5 üzerinde gösterilmiştir. Sırasıyla kuyruk tasarımları: Esnek filament malzemeli yamuk şekilli kuyruk, Alüminyum levha malzemeli dikdörtgen kuyruk, plastik film malzemeli dikdörtgen kuyruk.



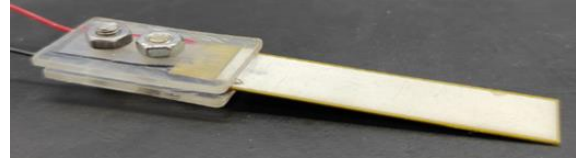
(a)



(b)



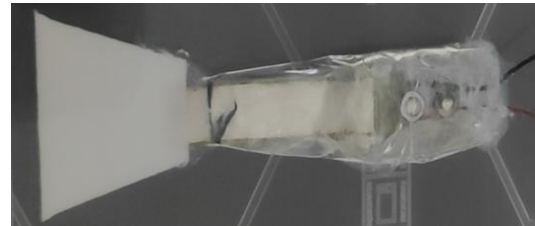
(c)



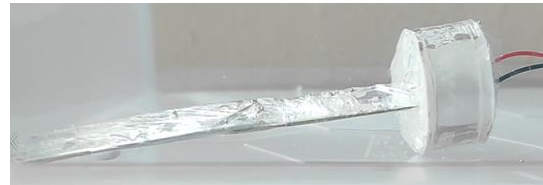
(d)

Şekil 4. Farklı malzemelerle test edilen bazı kafa modelleri, a) Esnek filament malzemeli yuvarlak kafa, b) Esnek filament malzemeli cıvatalı dikdörtgen kafa, c) Fiber malzemeli cıvatalı dikdörtgen kafa, d) Camsı silikon malzemeli cıvatalı dikdörtgen kafa. (Some head models tested with different materials a) Round head with flexible filament material, b) Screw head with flexible filament material, c) Screw rectangular head with fiber material, d) Screw rectangular head with glassy silicone material.)

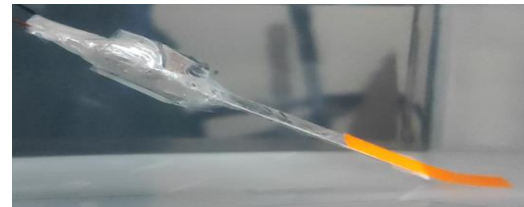
Robot tasarımları karşılaştırıldığında; robotun ideal itme kuvveti, camsı silikon malzemeli cıvatalı dikdörtgen kafa ve plastik film dikdörtgen kuyruk ile gözlemlenmiştir.



(a)



(b)



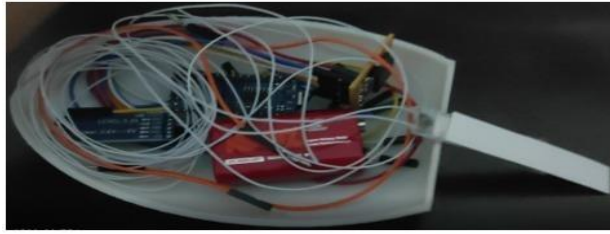
(c)

Şekil 5. Farklı malzemelerle test edilen bazı kuyruk modelleri, a) Esnek filament malzemeli yamuk şekilli kuyruk, b) Alüminyum levha malzemeli dikdörtgen kuyruk, c) Plastik film dikdörtgen kuyruk. (Some tail models tested with different materials, a) Trapezoidal tail with flexible filament material, b) Rectangular tail with aluminum plate material, c) Rectangular tail with plastic film.)

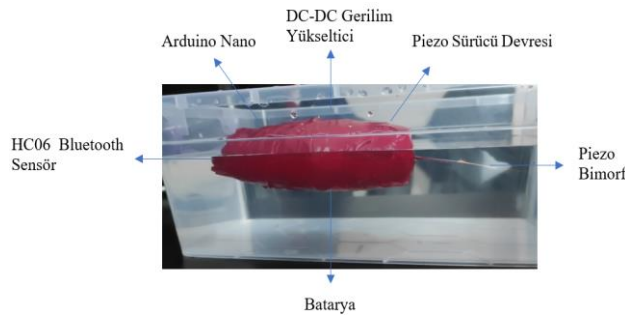
3.3. Kontrol (Control)

Robotun kontrolü, uzaktan veya kablolu olarak iki şekilde tasarlanmıştır. Robotu uzaktan kontrol edebilmek için tüm komponentler büyük bir kafa tasarımı içerisinde yerleştirilmiştir (Şekil.6-7). Bu malzemeler Arduino Nano, HC06 Bluetooth sensör, piezo sürücü devresi, batarya, DC-DC gerilim yükseltici ve piezo bimorfur. Robotun uzaktan kontrolü için aktüatörün ittirebileceği bir kütlede kafa modeli olabilmesi için küçük boyutlu ve hafif bir sürücüye ihtiyaç duyulmaktadır. Bundan dolayı L298P kullanılarak Eagle Programında yeni sürücü devresi tasarlanmıştır. Robotun toplam ağırlığı 239.4 gr, kafa uzunluğu 137.5mm ve kafa genişliği 61.3mm'dir.

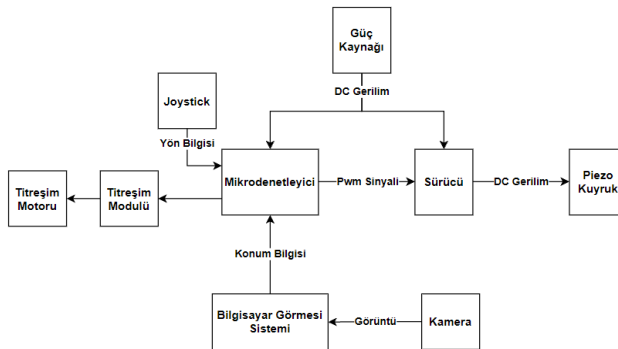
Robotun kablolu kontrolünde, tüm komponentler robotun içerisinde olmamakla beraber güç kaynağı harici olarak besleme yapmaktadır. Kontrol diyagramı Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 6. Uzaktan kontrollü modelin içi. (The interior of the remote-controlled model.)



Şekil 7. Uzaktan kontrollü modelin komponentlerinin yerleşim yerleri. (Locations of the components of the remote controlled model.)



Şekil 8. Kablolu modelin kontrol diyagramı. (Control diagram of the wired model.)

Çizelge 2. Kablolu modelin teknik özellikleri. (Technical characteristics of the wired model.)

Tanım	Değer
Toplam uzunluk	116mm
Toplam genişlik	16mm
Toplam kalınlık	4mm
Kuyruk modeli	Plastik film dikdörtgen
Kafa modeli	Camsı silikon
Toplam kütle	12.3g
Kuyruk aktüatörü	PZT-5H
Güç kaynağı	25V DC
Kontrol şekli	Kullanıcı kontrollü-kablolu
Hareket yeteneği	2 boyutlu

3.3.1. Bilgisayar görmesi ve haptik sistem (Computer vision and the haptic system)

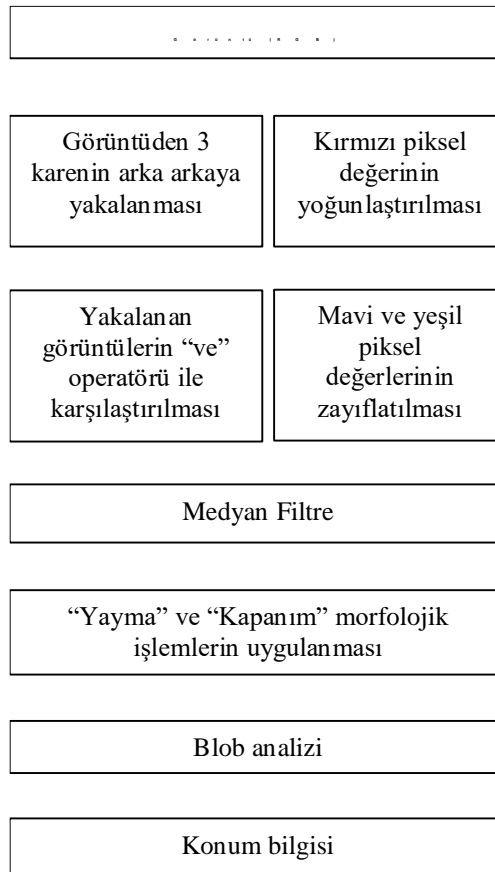
Tasarlanan robotun anlık konumunun bilgisayar görmesi ile elde edilmesi istenmektedir. Işık yoğunluğu, arka plandaki nesnelerin robot ile benzer renkte olması ve arka plandaki nesnelerin istenmeyen hareketlerinin yol açtığı problemleri gidermek için; robot görüntüsünün yakalanması, renk temelli ve çerçeve çıkarma yöntemi olmak üzere hibrit bir şekilde sağlanmaktadır. Konum, görüntünün yakalanması ile oluşan ikili görüntü; görüntünün giderilmesi için "yayma" ve "kapanım" morfolojik görüntü işlemleri kullanılmış ve blob analizi aracılığıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan koordinat değerleri, alınan görüntüdeki piksel değerlerinin konumunu ifade etmektedir. Robot, akvaryumun kenarlarına gittiği takdirde joystick üzerine bağlı olan titreşim motoru çalışarak kullanıcıda bir hissiyat oluşturmaktadır.

Kırmızıyı tespit etmek için aşağıdaki yoğunluk dönüştürme formülü [32] kullanılmıştır:

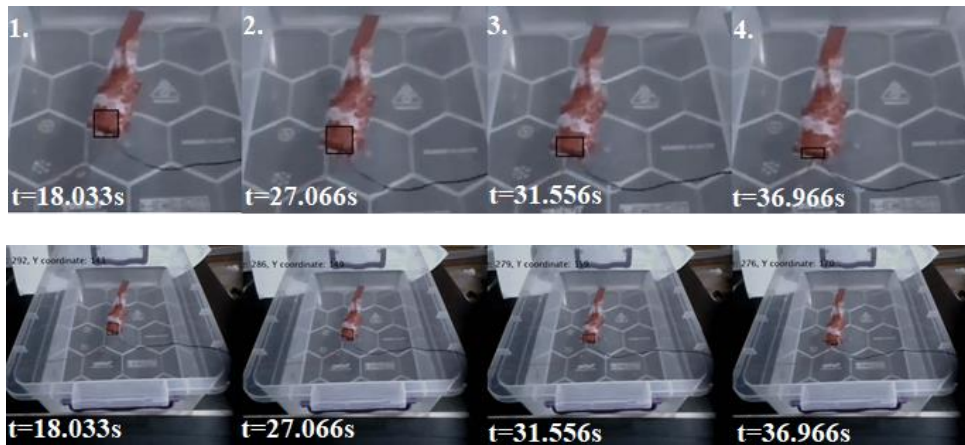
$$I = \frac{R^2}{G \times B} \quad (16)$$

Burada, sırasıyla R, G ve B: Pikselin kırmızı, yeşil ve mavi değerleridir. I, pikselin yoğunluğunu temsil etmektedir.

Hareketin algılanması öncelikle görüntüden alınan üç kare; birinci kare ile ikinci kare arasındaki fark ve ikinci kare ile üçüncü kare arasındaki fark alınır. Daha sonra, elde edilen iki görüntü "ve" operatörü ile karşılaştırılır [33]. Şekil 9'da robotun koordinat bilgisinin elde edilmesi için hazırlanan hibrit takip blok diyagramı yer almaktadır. Şekil 10'da bilgisayar görmesi ile konum hesaplama yönteminin prototip üzerinde deneyi yer almaktadır.



Şekil 9. Hibrit takip blok diyagramı. (Block diagram of hybrid tracking.)



Şekil 10. Yüzen robotun görüntü ve konum takibi. (Vision and location tracking of the floating robot)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Robot hareketi için aktüatör olarak kullanılan piezo bimorf malzemenin yoğunluğu 16g/cm^3 'tür. Bu özelliğinden dolayı su içerisinde batmaktadır. Böylelikle öncelik, robotun öz kütlesi ayarıdır. Aktüatör olarak kullanılan piezo bimorf dışında robotun öz kütlesine büyük ölçüde etki eden bir başka bölüm ise kafa kısmıdır. Robotun yoğunluğu ile sudaki konumunu belirlemekle beraber robotun hareket hızına da doğrudan etkisi bulunmaktadır. Bu robot kafası ile piezo bimorfun

elektrik akımı aldığı bölgeden sıkıştırarak titreşimin kuyruk kısmına yoğunlaştırılmasını sağlar. Farklı malzemeler ile yapılan deneyler sonucunda bu yoğunlaştırmayı en uygun oranda arttıran ve robotun kütlesini optimum seviyede tutan en uygun tasarım civatalı camsı silikon olarak karar verildi. Deney kablolu olarak gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında piezo kuyruğa uygulanan PWM oranı 255'tir. Robot saniyede 1.51 mm yer değiştirme yapmaktadır. Ortalama hızı 0.013 BLs^{-1} (saniyedeki vücut uzunluğu). Robot toplamda 18.9 saniyede yaklaşık 28.687 mm yer

değiştirme yapmaktadır. (1mm yaklaşık 1.046 piksel mesafesi etmektedir.) 25V gerilim altında 10g itme kabiliyetine sahip aktüatör, 8.7g kütleyle sahip olan bu kafa tasarımının su içerisinde itişini sağlamaktadır.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada piezo aktüatör ile tahrik edilen yüzer mini robotun tasarımı sunulmuştur. Daha önceki çalışmalar ve araştırmalar incelenmiştir. Piezonun yapısal özellikler denklemleri ve dinamik denklemleri çıkarılmış, ayrıca piezo aktüatörün gerilim ve sapma arasındaki bağlantı sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. 3D parçalar ve teknik çizimler yapılmıştır. Robotun kontrolü uzaktan ve kablolu şekilde yapılmıştır. Kablolu kontrol yapılırken yazılım ile birlikte sürücü kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar incelenmiştir. DC ve AC gerilimler altında piezo bimorfun hareketi gözlemlenmiştir. Farklı lojik değerler, doluluk oranı, gerilimler ve PWM frekansları altında piezo aktüatörün en iyi davranışı tespit etmek amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre piezo bimorfun en iyi davranışı baz alınarak robotun genel tasarımına geçilmiştir. Geliştirilen farklı pasif kuyruk modelleri ve gövde tasarımına göre prototipin davranışı gözlemlenmiştir. Robot konumunun iki boyutlu değişimi bilgisayarlı görüntü sistemi ile takip edilmiştir. İleride yapılacak çalışmalarda prototipin üç boyutlu hareketi sağlanıp geliştirilebilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Nida Nur KARAGÖZ: Makalenin yazımı, literatür taraması, sayısal verilerin yorumlanması ve elektronik sürücü devre tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Sinan ATICI: Makalenin yazımı, literatür taraması, sonlu elemanlar yöntemi analizi ve bilgisayar görmesi algoritmalarının oluşturulmasını gerçekleştirmiştir.

Berk Faruk YAMAN: Makalenin yazımı, literatür taraması, pasif kuyruk-kafa tasarımı ve deneylerini gerçekleştirmiştir.

Bünyamin TOPACIK: Makalenin yazım kısmında görev almıştır.

Selçuk KIZIR: Proje Danışmanlığını yürütmüştür ve sorumlu yazardır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] D. Tan, Y.-C. Wang, E. Kohtanen, and A. Erturk, "Trout-like multifunctional piezoelectric robotic fish and energy harvester", *Bioinspir. Biomim.*, 16(4): 046024, (2021).
- [2] T. Fukuda, A. Kawamoto and H. Matsuura, "Mechanism and Swimming Experiment of Micro Mobile Robot in Water", 6, (1994).
- [3] T. Fukuda, H. Hosokai and I. Kikuchi, "Distributed type of actuators by shape memory alloy and its application to underwater mobile robotic mechanism", içinde Proceedings., *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Cincinnati*, OH, USA, 1316-1321, (1990).
- [4] T. Honda, K. I. Arai and K. Ishiyama, "Micro swimming mechanisms propelled by external magnetic fields", *IEEE Trans. Magn.*, 32(5): 5085-5087, (1996).
- [5] Q. Zhang, S. Song and S. Song, "Study on magnetic field model of independent circular coils for wireless manipulation of microrobots", *IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, Macau SAR, China, 1137-1142, (2017).
- [6] S. Jeon, G. Jang, H. Choi and S. Park, "Magnetic Navigation System With Gradient and Uniform Saddle Coils for the Wireless Manipulation of Micro-Robots in Human Blood Vessels", *IEEE Trans. Magn.*, 46(6): 1943-1946, (2010).
- [7] J. Choi, H. Choi, K. Cha, J. Park and S. Park, "Two-dimensional locomotive permanent magnet using electromagnetic actuation system with two pairs stationary coils", *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Guilin, China, 1166-1171, (2009).
- [8] Y. Zhong, R. Du and P. W. Y. Chiu, "Tadpole endoscope: a wireless micro robot fish for examining the entire gastrointestinal (GI) tract," *HKIE Transactions*, 22(2): 117-122, (2015).
- [9] H. Choi, "Three-dimensional swimming tadpole mini-robot using three-axis Helmholtz coils," *Int. J. Control Autom. Syst.*, 12(3): 662-669, (2014).
- [10] D.-H. Byun, J.-Y. Kim, S.-M. Baek, H.-C. Choi, J.-O. Park and S.-H. Park, "Swimming Microrobot Actuated by External Magnetic Field," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 33(11): 1300-1305, (2009).
- [11] Tao Mei, Yong Chen, Guoqiang Fu and Deyi Kong, "Wireless drive and control of a swimming microrobot", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, USA, 2: 1131-1136, (2002).
- [12] Yi Zhang, Qimin Wang, Peiqiang Zhang, Xiaohua Wang and Tao Mei, "Dynamic analysis and experiment of a 3mm swimming microrobot", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Sendai, Japan, 2: 1746-1750, (2004).
- [13] Shuxiang Guo, J. Sawamoto and Qingxue Pan, "A novel type of microrobot for biomedical application", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Edmonton, Alta., Canada, 1047-1052, (2005).
- [14] S. H. Kim, K. S. Shin, S. Hashi and K. Ishiyama, "A Pushing Force Mechanism of Magnetic Spiral-type

- Machine for Wireless Medical-Robots in Therapy and Diagnosis”, *IEEE Trans. Magn.*, 49(7): 4, (2013).
- [15] S. Jeong, H. Choi, K. Cha, J. Li, J. Park and S. Park, “Enhanced locomotive and drilling microrobot using precessional and gradient magnetic field”, *Sens. Actuators Phys.*, 171(2): 429-435, (2011).
- [16] A. Chiba, “Magnetic Actuator for a Capsule Endoscope Navigation System”, *J. Magn.*, 12(2): 89-92, (2007).
- [17] Shuxiang Guo, T. Fukuda and K. Asaka, “Fish-like underwater microrobot with 3 DOF”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, USA, 1: 738-743, (2002).
- [18] S. Guo, Y. Ge, L. Li and S. Liu, “Underwater Swimming Micro Robot Using IPMC Actuator”, (2006).
- [19] Shuxiang Guo, Y. Hasegawa, T. Fukuda and K. Asaka, “Fish-like underwater microrobot with multi DOF”, *International Symposium on Micromechanics and Human Science*, Nagoya, Japan, 63–68, (2001).
- [20] S. Guo, Seiji Hata, Koujiro Tanaka and Kouhei Ishii, “Development of a ball type of underwater robot”, *International Conference on Mechatronics and Automation*, Changchun, China, 2077-2082, (2009).
- [21] V. Balanagajyothei, “Development of swimming robot with a helical coil propeller and its control algorithm”, *Ocean Electronics (SYMPOL)*, Kochi, India, 167-174, (2013).
- [22] D. Korkmaz, G. Ozmen Koca, G. Li, C. Bal, M. Ay and Z. H. Akpolat, “Locomotion control of a biomimetic robotic fish based on closed loop sensory feedback CPG model”, *Journal of Marine Engineering & Technology*, 20(2): 125-137, (2021).
- [23] T. Fukuda, H. Hosokai, H. Ohyama, H. Hashimoto and F. Arai, “Giant magnetostrictive alloy (GMA) applications to micro mobile robot as a micro actuator without power supply cables”, *Micro Electro Mechanical Systems*, Nara, Japan, 210-215, (1991).
- [24] M. de Jong, W. Chen, H. Geerlings, M. Asta and K. A. Persson, “A database to enable discovery and design of piezoelectric materials”, *Sci Data*, 2(1): 150053, (2015).
- [25] V. Piefort, “Finite Element Modelling of Piezoelectric Active Structures”, 154, (2001).
- [26] A. Erturk, “Macro-Fiber Composite Actuated Piezoelectric Robotic Fish”, Robot Fish, *Springer Berlin Heidelberg*, Berlin, 255-283, (2015).
- [27] J. E. Sader, “Frequency response of cantilever beams immersed in viscous fluids with applications to the atomic force microscope”, *Journal of Applied Physics*, 84(1): 64-76, (1998).
- [28] J. W. M. Chon, P. Mulvaney and J. E. Sader, “Experimental validation of theoretical models for the frequency response of atomic force microscope cantilever beams immersed in fluids”, *Journal of Applied Physics*, 87(8): 3978-3988, (2000).
- [29] M. Aureli ve M. Porfiri, “Low frequency and large amplitude oscillations of cantilevers in viscous fluids”, *Appl. Phys. Lett.*, 96(16): 164102, (2010).
- [30] F. Berlinger, M. Saadat, H. Haj-Hariri, G. V. Lauder and R. Nagpal, “Fish-like three-dimensional swimming with an autonomous, multi-fin, and biomimetic robot”, *Bioinspir. Biomim.*, 16(2): 026018, (2021).
- [31] M. Ay, G. Özmen Koca, S. Yetkin, C. Bal and Z. H. Akpolat, “Farklı kuyruk modellerine sahip bir robot balığın fsı analizi”, *NWSA*, 12(1): 78-89, (2017).
- [32] R. Verma, “Detecting and Tracking a Moving Object in a Dynamic Background using Color-Based Optical Flow”, (2017).
- [33] X. Dai and F. Qin, Rapid BeagleBoard prototyping with MATLAB and Simulink. Birmingham, UK: Packt Pub., (2013)