

Titreşimli Bir Konsol Kirişinin Dalga Yayılımına Dayanan Yılan Benzeri Bir Yüzme Hareketi Yapan Mekanizma Tasarımı

¹Ayşe Kırbış ve ^{1*}Murat Reis

¹ Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa Uludağ Üniversitesi, Türkiye

Özet:

Bu çalışmada ilerleme için, ince metal filmin doğal titreşim davranışını kullanan, yılan ve balıkların sıvı içerisindeki ilerlemesine benzer bir hareket mekanizması tanıtılmaktadır. Konsol kiriş şeklinde modellenen ince metal filmin, titreşimi ile oluşan dalga ilerlemesi yardımıyla ortaya çıkan yüzme hareketi, analitik hesaplamalar ve deneyler yardımıyla doğrulanmıştır. Basit bir mikro titreşim motoru yardımıyla doğal frekansta titreşime zorlanan bir metal konsol kiriş (metal film), sıvı içerisinde dalgalanan bir kanat gibi itici bir kuvvet oluşturmakta ve bu yolla kirişin yönelimine bağlı olarak belirlenen yönlerde sıvı içerisinde ilerleme hareketi sağlanmaktadır. Bu sayede yenilikçi ve düşük enerji tüketim değerine sahip bir ilerleme mekanizmasının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Kirişin doğal frekansına ve ilerleme performansına etki eden kiriş boyu ve eni gibi tasarım değişkenlerinin etkileri farklı test prototipleri üzerinde deneysel olarak incelenmiştir. Robotun farklı yönlerde ilerlemesi ve kendi eksenini etrafındaki dönme hareketi ikinci bir konsol kiriş eklenerek sağlanabilmektedir. Deneysel sonuçlar, önerilen yaklaşımın ve tasarımın uygulanabilirliğini göstermiştir. Çalışmada tanıtılan ilerleme mekanizması, yön kontrolü ve düşük enerji tüketim özellikleri ile mikro robotik uygulamalarında kullanım potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: ilerleme, titreşim, yüzme, robot, konsol kiriş

Abstract:

In this study a locomotion mechanism which is similar to snake and fish swimming has been developed by using the natural vibration behavior of a simple cantilever beam (thin metal film). The swimming locomotion of the mechanism that is driven by wave propagation motion of the metal film has been confirmed by experiments. A metal cantilever beam (metal film), which is forced to vibrate at natural frequency by using a simple micro vibration motor, generates a propelling force, such as a fish fin that fluctuates in the liquid. And in this way, the swimming locomotion is provided in the specified directions depending on the orientation of the beam. In this way, it is aimed to develop an innovative and low energy consumption locomotion mechanism. The effects of design variables such as beam length and width, which effect the beam's natural frequency and locomotion performance, have been experimentally investigated on various test prototypes. The direction control and maneuverability of the robot can be improved by adding a second cantilever beam. Analytical calculations and experimental results showed the applicability of the proposed approach and the design. The locomotion mechanism introduced in the study has the potential to be used in micro robotic applications with its maneuverability and low energy consumption features.

Key words: locomotion, vibration, swimming, robot, cantilever beam

*Corresponding author: Address: Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, TURKEY. E-mail address: reis@uludag.edu.tr, Phone: +902242942001

1. Giriş

Biyolojik sistemler, kas-iskelet sistemlerini ustaca kullanarak karmaşık ortamlarda ilerleyebilecek hareket kabiliyetine sahiptir [1]. Araştırmacılar etkin ilerleme mekanizmaları ve robotik yapılar geliştirmek için canlıların bu özellikleri incelemektedir. İlerleme mekanizmalarının temelini anlamak için biyolojik canlıların yüzme, yürüme, uçma, zıplama, koşma düzenlerini, çevikliklerini, el becerilerini ve verimliliklerini anlamak oldukça önemlidir. Bu amaç doğrultusunda canlıların yürüyüş modellerinin araştırması ve kabaca sınıflandırılabilmesi için birkaç farklı yaklaşım önerilmiştir [2-7]. Bunlar kararlılık, enerji tüketimi ve hareket hızına dayanan çok yönlü hareket modelleridir. Burada temel zorluk, karmaşık mekanik ve kontrol değişkenlerini belirlemek için yol gösterici ilkeler geliştirmektir. Zira, dinamik ortamlardaki karmaşık gövdeleri kontrol edebilen biyolojik sistemlerle karşılaştırıldığında, modellerimiz ve robotlarımız hala oldukça basittir. Bunun yanında ölçeklendirmelerin nasıl yapılacağı da tam olarak bilinmemektedir. Bu problemlerin çözümü konusundaki çalışmalar gün geçtikçe artmakta ve robotik yapılar az da olsa geçmişe kıyasla hayvanlara daha yakın doğallıkta ilerleme hareketleri ortaya koyabilmektedir.

Morfolojik hesaplamalar yeni araştırma alanları açarak daha yüksek hareket kabiliyetine sahip robotlar üretilmesine ışık olmaktadır. Çünkü hayvanlar daha az kontrol girdisi ve enerji kullanarak çok daha karmaşık ama kararlı hareketler yapabilmektedir. Buna karşın günümüz robotları halen yüksek enerji tüketen çok sınırlı hareket gerçekleştirebilen makinelerdir. Son yıllarda, hayvan benzeri bacaklı robotların geliştirilmesi, robotik araştırmalarında yeni bir trend olarak ortaya çıkmıştır. Araştırmacılar yürüme, koşma ve zıplama ilerleme şekillerini taklit edebilen iki veya daha çok ayaklı robotların ilerlemelerini temel olarak hız ve enerji verimliliği açısından derinlemesine incelemektedir.[8-12] Örneğin, insan gibi iki ayaklı yürüme [13,14] ve zıplama şeklindeki ilerleme hareketleri [15,16] hız ve enerji açısından araştırmacılar tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmaların pek çoğu hayvan hareketinin temel prensiplerini anlamak ve robot hareketini iyileştirmek için bu prensipleri kullanmayı amaçlamıştır.

Pasif dinamik yürüyücü, eğimli bir rampadan aşağıya doğru yürüyen, eklemlerle birbirine bağlanmış rijit uzuvlardan oluşan basit mekanik ilerleme mekanizmasıdır. Motor ve kontrol sistemleri yoktur ancak, insan yürüyüşü doğallığında bir yürüme hareketi ortaya koyabilmektedir. Collins ve ark. insan yürüyüşlerini gözlemleyerek pasif yürüme ve koşma hareketi için basit bir mekanizma ve model ortaya koymuştur. Bu yapı, diğer bacaklı robotlara göre daha az kontrol girdisi ve daha az enerji kullanmaktadır. Mekanik yapının doğal salınım frekanslarını ve pasif dinamiklerini kullanan bu model daha doğal bir ilerleme şekli ortaya koymaktadır [17].

Zıplama hareketi ile ilgili ilk çalışmalar 1980 yılında MIT Bacak Laboratuvarında yapılmıştır [18]. Ancak çalışmalarda insan ve hayvan kas sistemine benzer yapılar kullanılarak yapılan sistemlerin hem çok kompleks hem maliyetinin çok yüksek olması hem de aşırı yüksek enerji tüketmesi sebebiyle kullanışlı olmamıştır [19-20]. Reis ve ark. ise bu konuyu ele alarak elastik uzuvlu bacaklarda titreşim hareketi ile yürüme, koşma ve zıplama hareketleri gerçekleştirmiştir. Bu sistem hem düşük enerji tüketimi hem de basit bir yapı ortaya koymuştur [21-23].

Yürüme, zıplama, koşma hareketlerinin yanında su üzerinde ve su altında giden robotlar içinde araştırmalar yapılmıştır. Su üzerinde ve su altında giden robotlar geliştirilirken de bu kez su

canlıları gözlemlenerek onlardan ilham alınmıştır. Bu alandaki ilk çalışmalardan biri Carnegie Mellon Üniversitesi Nanorobotik Laboratuvarı'nda, Basilisk kertenkelelerinden esinlenerek geliştirilen bir su robotudur. Yapılan deneyler sonucunda suda hareket eden robotun ayağının periyodik olarak döndürüldüğünde, robotun su üzerinde hareket etmek için kullanabileceği büyüklükte bir sürükme ve kaldırma kuvveti üretilmiştir. Bu ilerleme ile robot küçük bir sürtünme kuvveti ve büyük bir kaldırma kuvveti oluşturarak ilerleyebilmektedir. Kim ve ark. Klann ve Watt-I bacak mekanizmalarını suda koşan robot mekanizmaları ile karşılaştırmıştır [24].

Du ve ark. tarafından bir balığın nasıl yüzdüğü incelenmiş, balığın sessiz ve keskin hareket performansının, aerodinamik ve mukoza gövdesi gibi birçok faktöre bağlı olduğunu gösterilmiştir [25]. Tüm bu faktörler arasında en önemlisi itme yöntemleridir. Birçok araştırmacı bu itme yönteminin ne olduğunu araştırmıştır. Araştırmalar sonucunda yüzmeye sırasında yuvarlanma, eğilme ve yalpalanma şeklinde çeşitli kuvvetlere maruz kaldığı anlaşılmıştır. Etkili bir yüzmeyi sağlayabilmek için, farklı şekillere sahip balıklar farklı yüzgeçlere ve dolayısıyla farklı itme kuvvetlerine sahiptirler. Kürek balığı ve denizyılanı gibi bazı canlılar sahip oldukları gövde yapıları gereği oluşturdukları itme kuvveti ile oldukça iyi yüzebilir. Büyük veya küçük balıklar, kuyruk çırparak itme kuvvetlerini oluştururlar. Bu yöntemden yola çıkarak canlıların sudaki hareketlerini Ming ve ark. tarafından araştırılmıştır [26]. Ming ve ark. tarafından piezoelektrik ve elyaf kompozit bir materyal kullanılarak balık veya deniz yılanı benzeri bir su altı robotu geliştirilmiş ve prototip üretilmiştir. Weigert ve ark. da aynı mantıktan yola çıkarak çeşitli ortamda dikdörtgen konsolların yatay titreşimine dayalı yılan hareketi şeklinde ilerleyen bir model tasarlamıştır. Kolun ilerlemesi çevre koşullarına, kolun boyutuna, ortamın yoğunluğuna ve frekansa bağlıdır [27].

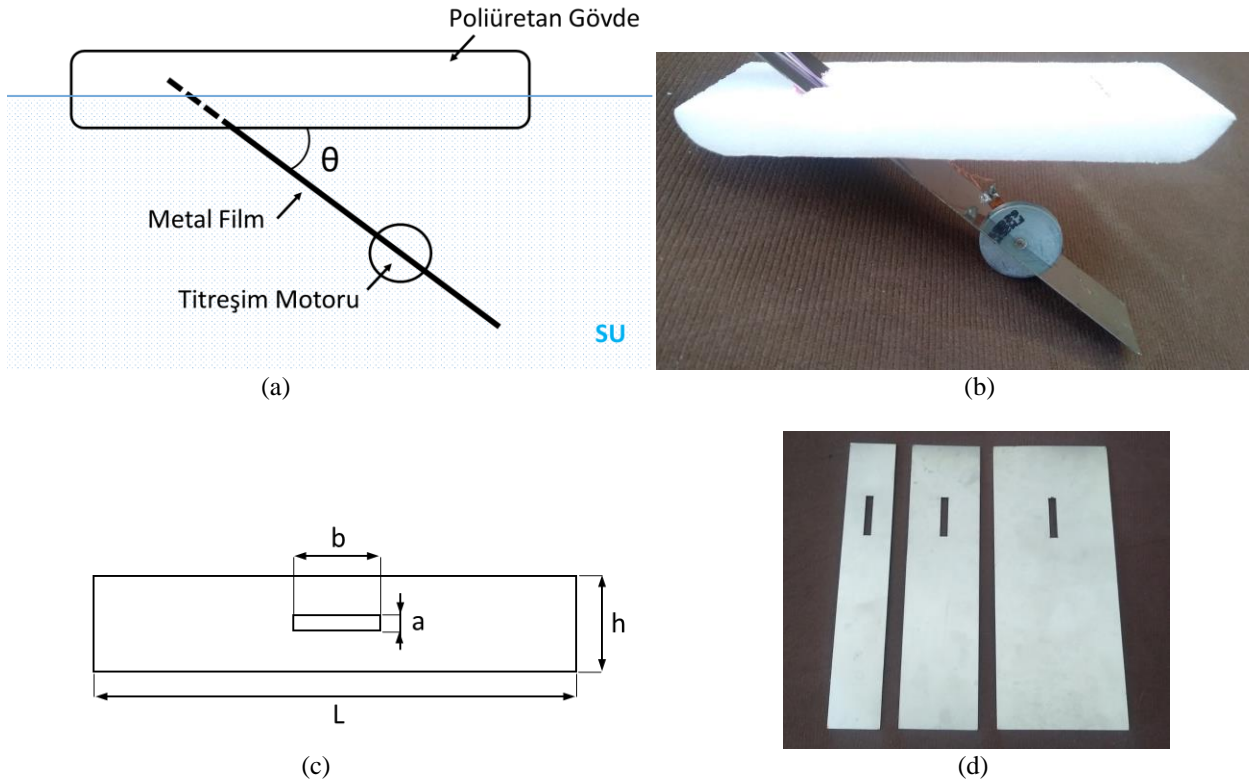
Bu çalışmada eğik konumlandırılmış ince metal filmin doğal titreşim davranışını kullanan, yılan ve balıkların sıvı içerisindeki ilerlemesine benzer bir hareket mekanizması tasarlanmıştır. Esnek bir malzemeye bir titreşim moturu bağlanarak titreşim yoluyla ilerleme sağlanmaktadır. DC motorun oluşturulduğu titreşim adeta bir balığın yüzgeçlerinde oluşan hareketi ortaya koymaktadır. İtme performansını etkileyen tasarım kriterlerini (kirişin eni, boyu) ve titreşim frekansı (motor gerilimi) değiştirerek konsol kirişinin ilerleme hızı gözlemlenmiştir. Buradaki diğer tasarım kriterleri; kirişin kalınlığı ve yönelim açısıdır. Bu tasarım sonucunda düşük enerji tüketimine sahip ilerleme mekanizması geliştirilmesi hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Metot

İlerleme mekanizması fotoğrafı ve ilerleme mekanizmasının temel elemanları basit bir fiziksel model üzerinde Şekil 1.a ve 1.b de gösterilmektedir. Bu fiziksel model sayesinde mekanizmanın mekanik yapısı, motor kontrolünün kavramsal modelleri ve robotun temel ilerleme dinamiklerini karakterize edebilmek için parametreler belirlenmiştir. Bu çalışma bu parametrelerden üç tanesine odaklanmıştır. Bunlar serbest titreşen kiriş boyu, eni ve titreşim frekansıdır. Mekanizma basit bir mikro titreşim DC motoruna sahiptir. Şekil 1.c ve 1.d 'de gösterilen yuvaya oturan bu titreşim motorunun çapı: $b = 18$ mm ve motor kalınlığı $a = 3,3$ mm 'dir. Yüzme deneyleri 150×70 cm boyutlarında bir akvaryum içerisinde yapılmış ve deneyler hızlı kamera ile kayıt edilmiştir ve ilerleme hızları hızlı kamera kayıtlarından derlenmiştir. Çelik metal film çok düşük yoğunluklu poliüretan köpükten yapılmış bir gövdeye $\theta = 45^\circ$ yapar vaziyette sabitlenmiştir. Bunun için poliüretan gövde üzerine 45° derece açı ile yarıklar açılmış ve bu yarıklara yerleştirilecek $0,05$ mm

kalınlıkta, farklı genişlik ve uzunluğa sahip paslanmaz çelik filmler hazırlanmıştır. Sacın ortasında motor için bir yuva oluşturulmuştur ve bu yuva sacın tam ortasına konumlandırılmıştır. Zira orta noktadan kaçık bir konum, robotun hareket yönünü etkileyecektir. İlerleme mekanizmasının temel elemanı olan 0,05 mm kalınlığa sahip metal film (paslanmaz çelik sac), balıkların kuyruk çırparak oluşturdukları itme kuvvetlerini meydana getirmesi için tasarlanmıştır. Sacın titreşimini üzerinde bulunan mikro titreşim motoru sağlamaktadır.

Poliüretan köpük üzerine 20 - 30 - 40 - 50 (mm) genişliklerinde 100 mm ve 80 mm uzunluklarında saclar üzerlerinde konumlandırılmış titreşim motorları ile birlikte 45 derecelik açıyla yerleştirilmiştir. İlerleyen çalışmalarda bu açının ilerleme performansına etkisinin incelenmesi planlanmaktadır. Ancak bu çalışma metal filmin boyutlarının ilerlemeye etkisine odaklandığı için 45 değeri tüm deneylerde sabit olarak belirlenmiştir. Titreşim motorunun frekans kontrolü dijital bir güç kaynağı kullanılarak gerilim değiştirilerek kontrol edilmekte ve her bir deney için gerilim ve ortalama akım değerleri not edilmektedir. Bu sayede motor gerilimi ve çekilen akım değerleri ile ilerleme mekanizmasının enerji tüketim değerleri hesap edilebilmektedir. Robotun, su dolu akvaryum içerisinde hızlı kamera ile 30 cm yolu kaç saniyede aldığı kayıt altına alınmıştır. DC motor gerilimi 0,1 Volt adımlarla artırılarak ölçümler yapılmıştır. (0,5 Volt-1,5 Volt) Böylelikle hangi genişlik ve uzunlukta, hangi gerilim değerinde daha hızlı hareket ettiğini gözlenmiştir.



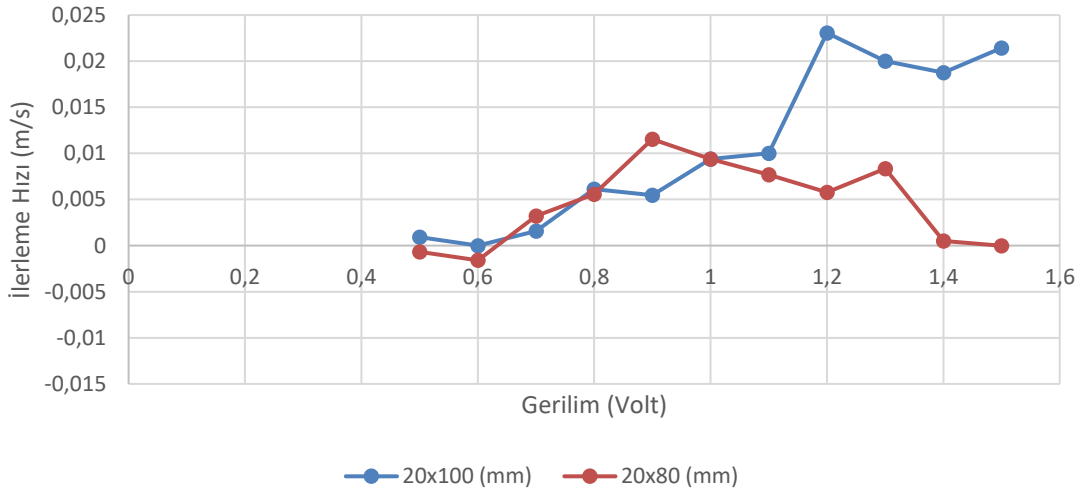
Şekil 1. a.) İlerleme mekanizması ve basitleştirilmiş ilerleme modeli, b.) İlerleme mekanizması fotoğrafı, c) Konsol kiriş boyutları, d.) Konsol kiriş (metal film) örnekleri.

3. Sonuçlar

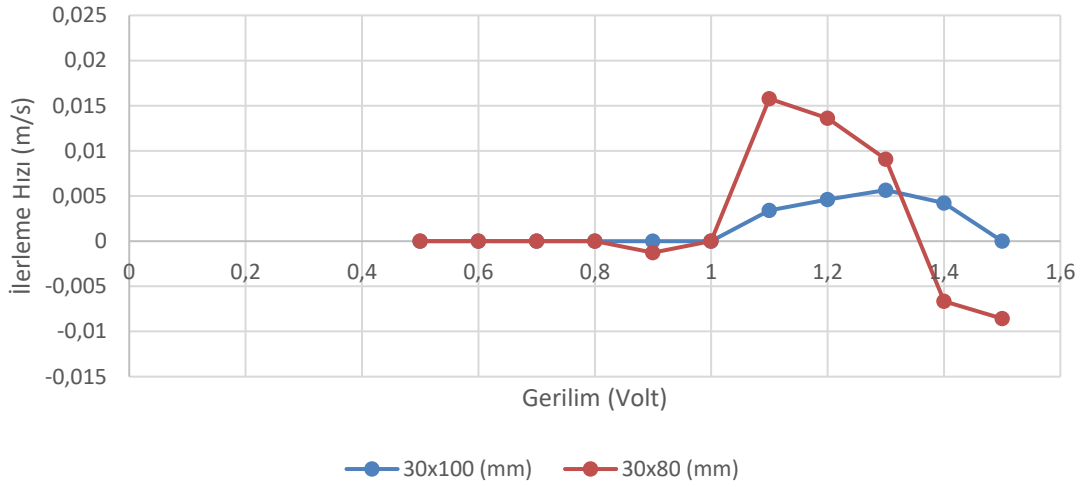
Şekil 2’de 0,05 mm kalınlık, 20 mm genişlik ve 100 mm ile 80 mm uzunluk değerlerinde farklı gerilim (titreşim frekansı) değerleri için elde edilen ilerleme hızı - gerilim grafikleri verilmiştir. Şekil 3, 4 ve 5 ’te de yine 0,05 mm kalınlık için sırasıyla 30 mm, 40 mm, 50 mm genişlik ve 100 mm ile 80 mm uzunluk değerlerinde farklı gerilim (titreşim frekansı) değerleri için elde edilen ilerleme hızı - gerilim grafikleri verilmiştir. Bu eğrilerden robotun 0,5 Volt gerilim değerinin altındaki değerlerde hareket edemediği ve genel olarak gerilim (titreşim frekansı) artışı ile birlikte ilerleme hızının önce arttığı ardından azalma eğiliminde olduğu görülmektedir.

Genel olarak tüm deney numuneleri 1,2 Volt değeri civarında en yüksek ilerleme hızlarına ulaşmıştır. İlk deney numunesi haricindeki tüm numunelerde metal filmin (sacın) boyu kısaldığında ilerleme hızı artma eğilimi göstermektedir. Buna karşın en yüksek ilerleme hız değerleri eni en düşük değere sahip ilk deney numunelerinde gözlenmiştir. Şekil 2 ‘den en küçük eni ve 100 mm uzunluktaki robotun daha hızlı hareket ettiği görülebilmektedir. Dahası metal fil eni arttıkça ilerleme hızlarının azalma eğiliminde olduğu net bir şekilde görülmektedir.

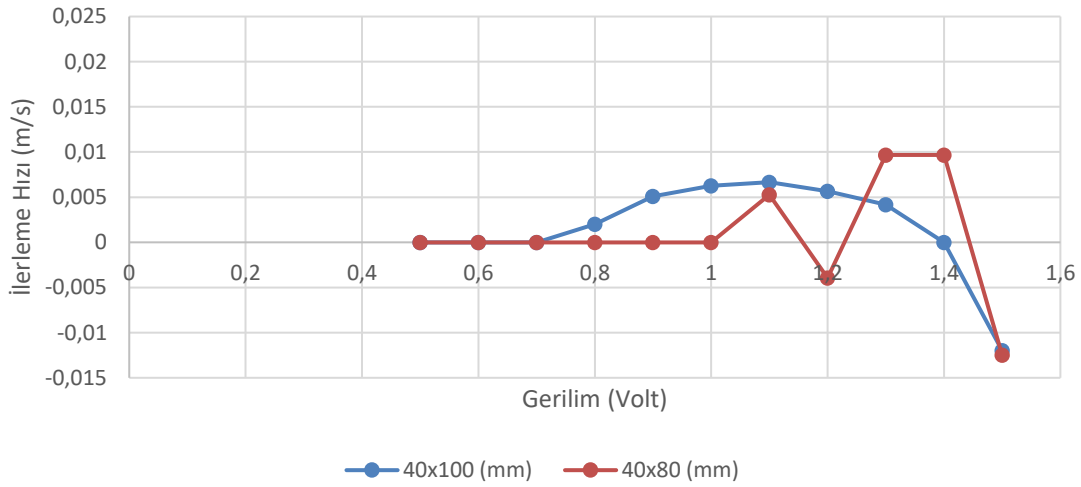
Belli gerilim değerinde robot durmaktadır. Bunun sebebi DC motora verilen gerilimin titreşim motorunu tahrik etmeye yetmeyişidir. Zira titreşim motoru çalıştığı sürece robotun her durumda ilerleme yaptığı gözlenmiştir. Şekil 2’de görüldüğü üzere 20 mm genişlikteki deney numunesi yüksek gerilim değerlerinde de ileri yönde harekete devam etmiştir. Ancak 30-40-50 mm genişlikteki numunelerin belli gerilim değerlerinden sonra zıt yönlere ilerleme gösterdiği gözlemlenmiştir.



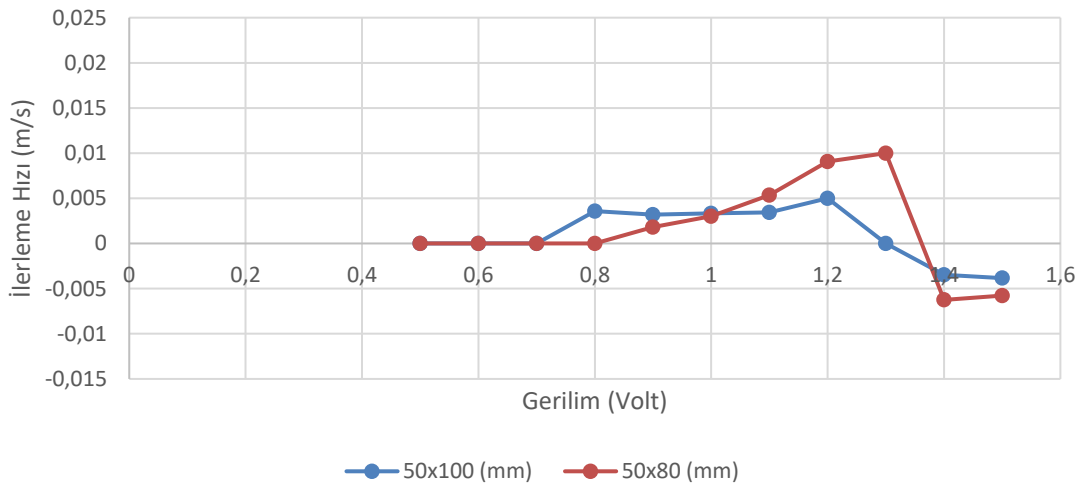
Şekil 2. 20 mm en, 100 mm ve 80 mm uzunluğa sahip metal filmler için gerilim (Volt) - ilerleme hızı (m/s) eğrileri.



Şekil 3. 30 mm en, 100 mm ve 80 mm uzunluğa sahip metal filmler için gerilim (Volt) - ilerleme hızı (m/s) eğrileri.



Şekil 4. 40 mm en, 100 mm ve 80 mm uzunluğa sahip metal filmler için gerilim (Volt) - ilerleme hızı (m/s) eğrileri.



Şekil 5. 50 mm en, 100 mm ve 80 mm uzunluğa sahip metal filmler için gerilim (Volt) - ilerleme hızı (m/s) eğrileri.

Tartışma

Bu çalışmada, ilerleme için ince metal bir filmin doğal davranışını kullanan bir ilerleme mekanizması tanıtılmıştır. Çalışmada suda yaşayan canlılardan ilham alınarak balıkların yüzgeç hareketini taklit eden, ancak elastik bir kirişin titreşim hareketini kullanan, bir ilerleme mekanizmasının geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Robotun küçük boyutlarından dolayı deneyler esnasında elektrik enerjisinin titreşim motoruna iletilmesi ciddi bir sorun teşkil etmekte ve deneyleri oldukça zorlaştırmaktadır. Çok ince kablolar kullanıldığında bile oluşan gerilmeler ve kablo yükleri robotun hareketini etkilemektedir. Bunun yanında çok ince kablolar kullanıldığı için kablolardaki enerji kayıpları da dikkate alınmalıdır. Yapılan çalışmalar sonucunda ilerleme mekanizmasının belli gerilimlerde zıt yönlerde hareket ettiği gözlemlenmiştir. Bu durumun titreşim sonucu su içerisinde oluşan girdaplardan kaynaklandığı düşünülse de ilerleyen dönemlerde bunun sebebi daha detaylı bir biçimde araştırılmalıdır.

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde suda daha hızlı ilerlemesini sağlayabilecek yüzgeç tasarımları geliştirilebilir. Bunun yanında kiriş yönelim açısı, film kalınlığı, titreşim motorunun konumu gibi bu çalışmada incelenmeyen tasarım parametrelerinin de ilerleme performansına etkisi ilerleyen dönemdeki çalışmalarda ele alınabilir.

Kaynaklar

- [1] Reis M, Yu X, Maheshwari N, Lida F. Morphological Computation of Multi-Gaited Robot Locomotion Based on Free Vibration 2013
- [2] Aoi, S., Yamashita, T., Ichikawa, A., & Tsuchiya, K. Hysteresis in gait transition induced by changing waist joint stiffness of a quadruped robot driven by nonlinear oscillators with phase resetting In Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems 2010 (pp. 1915–1920)
- [3] Aoi, S., Yamashita, T., & Tsuchiya, K. Hysteresis in the gait transition of a quadruped investigated using simple body mechanical and oscillator network models. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 83(6, Pt 1), 2011. 061909.
- [4] Ijspeert, A. J. A connectionist central pattern generator for the aquatic and terrestrial gaits of a simulated salamander. Biological Cybernetics, 2001, 84, 331–348 .
- [5] Ijspeert, A. J Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review. Neural Networks, 21(4), 2008 ,642–653..
- [6] Righetti, L., & Ijspeert, A. J Pattern generators with sensory feedback for the control of quadruped locomotion. In Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (pp. 819–824). 2008
- [7] Taga, G., Yamaguchi, Y., & Shimizu, H Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment. Biological Cybernetics, 65(3), 1991, 147–159.
- [8] Hauser, H., Ijspeert, A. J., Fuchslin, R. M., Pfeifer, R., & Maass, W Towards a theoretical foundation for morphological computation with compliant bodies. Biological Cybernetics, 2011,105, 355–370 .
- [9] Iida, F., & Pfeifer, R Sensing through body dynamics. Robotics and Autonomous Systems, 54(8), 2006,631–640.

- [10] Pfeifer R., Iida F., & Gomez, G. Morphological computation for adaptive behavior and cognition. *International Congress Series*, 1291, 22–29. 2006
- [11] Pfeifer R., & Scheier, C. *Understanding intelligence*. Cambridge, MA: MIT Press. 1999.
- [12] Pfeifer R., & Bongard, J. C. *How the body shapes the way we think*. Cambridge, MA: MIT Press. 2006.
- [13] Mc Geer, .: Passive dynamic walking. *Int. J. Robot. Res.*, 1990 9(2), 62–82.
- [14] Rummel, F.Iida.J., Seyfarth, A.: Bipedal walking and running with spring-like biarticular muscles. *J. Biomech.*, 41, 656–667. 2008
- [15] Blickhan, R.: The spring-mass model for running and hopping. *J. Biomech.* 1989, 22, 1217–1227
- [16] Iida, F.: Minimalistic models of an energy efficient vertical hopping robot. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 2013,61-2, 1053–1062 .
- [17] S. Collins et al. *Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers*. *Science* 2005, 307.1082
- [18] R. MH. *Legged robots*. *Communications of the ACM*; 1986, 29: 499–514.
- [19] Yu X, Iida F. Minimalistic models of an energy-efficient vertical-hopping robot. *IEEE Transactions and Industrial Electronics*; 2014, 61(2):1053-1062
- [20] Geyer H, Blickhan R, Seyfarth A. Spring-mass running: simple approximate solution and application. *Journal of Theoretical Biology*; 2005, 232:315-328.
- [21] Reis M, Iida F. Vibration based under-actuated bounding mechanism *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*; 2011, 892–897.
- [22] Reis M, Yu X, Maheshwari N, Iida F. Morphological computation of multi-gaited robot locomotion based on free vibration. *Artificial Life*; 2013 19:97–114.
- [23] Reis M, Iida F. An energy-efficient hopping robot based on free vibration of a curved beam. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*; 2014 19:300–311.
- [24] Kim H. Lee S. ,Lim E. , Jeong K, and Seo T. *Comparative Study of Leg Mechanisms for Fast and Stable Water-Running*
- [25] Du R, Li Z, Youcef K –Toumi, P. V. *Alvarado Robot fish- Bio-inspired fishlike Underwater robots*.2015
- [26] A. Ming, T. Ichikawa, W. Zhao, M. Shimojo *Development of a sea snake-like underwater robot* *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* December 5-10, , Bali, Indonesia 2014
- [27] S. Weigert, M. Dreier, and M.Hegner *Frequency shifts of cantilevers vibrating in various media* *Institut für Physik der Universität Basel, Klingelbergstrasse 82, CH-4056 Basel, Switzerland* 1996.