

Robotik Uygulamalar İçin Titreşime Dayalı Hareket Eden Amfibik İlerleme Mekanizması

Ahmed Burak TAPAN*¹, Murat REİS²

^{1,2}Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa, Türkiye

(Alınış / Received: 26.04.2019, Kabul / Accepted: 17.11.2019, Online Yayınlanma / Published Online: 20.04.2020)

Anahtar Kelimeler

Amfibik robot,
Titreşim,
İlerleme,
Elastik

Özet: Bu çalışma, robotik uygulamaları için, titreşime dayalı olarak hem karada hem de su üzerinde hareket edebilen, yenilikçi bir ilerleme mekanizmasını tanıtmaktadır. İlerleme mekanizması, su üzerinde batmadan durmasını sağlayan düşük yoğunluklu dikey kanat profiline sahip iki ayaktan ve U şeklinde yay çeliğinden üretilmiş elastik bir çubuktan oluşmaktadır. U şekilli çubuğun ortasına yerleştirilen basit bir sarkaç vasıtası ile sistem titreşime zorlanarak ilerleme gerçekleştirilmektedir. Su içerisinde dikey konumlandırılmış ayaklar salınım yaptıkça ön ve arka yüzeyler arasında oluşan basınç farkı ile robot ileri yönde hareket etmektedir. Karadaki hareketi ise elastik kirişin doğal titreşim modlarına bağlı olarak gerçekleşmektedir. Çalışmada farklı titreşim frekanslarının ilerleme hızına ve yer değiştirme maliyetine etkisi deneyler ile incelenmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Buna ek olarak ön modelin yer değiştirme maliyeti (CoT) literatürdeki bazı robotlar ve canlılar ile karşılaştırılmıştır.

Vibration Based Amphibious Locomotion Mechanism for Robotic Applications

Keywords

Amphibious robot,
Vibration,
Locomotion,
Elastic

Abstract: This work presents an innovative locomotion mechanism both on land and water surface based on vibration, for robotic applications. The locomotion mechanism consists of two legs with a low-density vertical wing profile that allows them to stand on water and a U-shaped elastic beam made of spring steel. The locomotion is generated by forcing the system to vibrate by means of a simple pendulum placed in the middle of the U-shaped bar. As the vertically positioned feet in the water oscillate, the robot moves in the forward direction with the pressure difference between the front and rear surfaces. The movement on the land is realized depending on the natural vibration modes of the elastic beam. In this work, the effect of different vibration frequencies on the locomotion velocity and the Cost of Transport (CoT) were investigated experimentally and the results were interpreted and discussed. In addition to these, the Cost of Transport of the preliminary model was compared with that of some robots and creatures in the literature.

1. Giriş

Tekerleğin icadı ile insanoğlu yeryüzündeki kara parçaları üzerinde ilerlemenin en verimli yolunu bulmuştur. Ancak, tekerlekli araçların ulaşamadığı farklı ortamlarda ilerleme ihtiyacı, bilim insanlarını canlıları taklit eden ilerleme mekanizmaları geliştirmeye zorlamaktadır. Zira dünya yüzeyinin çok küçük bir bölümü tekerlekli araçların ulaşımına uygun iken, bacak fizyolojisine bağlı olarak canlılar dünya yüzeyinin neredeyse tamamına ulaşabilmektedir. Günümüzde robotlar canlıları taklit eden yürüme, koşma, sıçrama ve yüzme gibi farklı yer değiştirme hareketlerini yapabilmektedirler. Ancak günümüz robotları bu yer değiştirme hareketlerini

yüksek enerji tüketerek gerçekleştirebilirken, canlılar çok daha az kontrol girdisi ve enerji kullanarak daha karmaşık fakat kararlı yer değiştirme hareketleri yapabilmektedir. Bu nedenle, düşük enerji tüketim değerlerine sahip robotlar geliştirmek için hayvan hareketinin prensiplerini anlamak oldukça önemlidir. Bu konuda yapılan çalışmalar, özellikle hayvanların yürüyüş biçimlerine bağlı olarak yer değiştirme esnasında tükettikleri enerjiye odaklanmıştır [1-5]. Robotların ilerleme hareketleri üzerine yapılan çalışmalar esas olarak hayvanların hareketlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi ve bu hareketlerin fiziksel modellerinin ortaya konulması şeklinde olmuştur [6]. Farklı ilerleme modelleri ve bu

*İlgili yazar: ahmedburaktapan@gmail.com

modellere ait robot örnekleri Calisti ve arkadaşları tarafından ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir [7]. Pasif dinamik yürüme veya koşma hareketi yapabilen robotlar, diğerlerine göre daha az kontrol girdisine ihtiyaç duyarlar ve daha az enerji tüketimi ile hareketlerini gerçekleştirirler. Bu tür robotlar, herhangi bir hareket sağlayıcı motor veya kontrol birimi olmaksızın daha doğal yürüme yapabildikleri için insan ve hayvanların ilerlemeleri için kullanışlı bir model olarak gösterilebilirler [8-10]. Zıplayarak koşma hareketi hayvanlar tarafından özellikle yüksek hızlarda oldukça sık kullanılır. Hayvanlar ayrıca hareket kabiliyetlerini arttırabilmek için vücut uzuvlarının sertliğini ve şeklini değiştirmektedirler. Zıplayan robotlar üzerine yapılan çalışmalarda, özellikle ilerleme hareketi esnasında sertlik ve şekil değiştirme yetenekleri üzerine araştırmalar yapılmıştır [11]. Zıplayan robotlar ile ilgili ilk araştırmalar 1980 'lerde MIT Bacak Laboratuvarı'nda (Leg Laboratory) yapılmıştır [12]. Bu çalışmalar sonucunda iki ve üç boyutlu hareketler yapabilen robot mekanizmaları geliştirilmiş, ancak bu mekanizmalar karmaşık yapıları ve aşırı enerji tüketim değerleri nedeniyle kendilerine kullanım alanı bulamamıştır. Buna karşın, uygun şekilde tasarlanmış elastik uzuvlu mekanizmalar, doğal titreşim davranışları manipüle edilerek daha düşük yer değiştirme maliyetine sahip bacaklı robotların geliştirilmesine imkân sağlamaktadır [13-14].

Robotlarda elastik uzuv kullanımı enerji verimliliği beraberinde bir dizi kontrol güçlüğü problemi getirmektedir. Bu güçlük elastik uzuvların doğal frekansı ile robotun periyodik ilerleme hareketinin frekansları örtüştürülerek giderilebilmektedir. Reis ve arkadaşları doğal titreşim modlarını kontrol girdisi olarak kullanarak yürüme, koşma, sürünme, zıplama hareketlerinin her birini gerçekleştirebilen ve oldukça düşük enerji tüketimine sahip elastik bir ilerleme mekanizması geliştirilmiştir [15-17]. Son yıllarda elastik uzuvlu pek çok robotik sistem geliştirilmiştir. Örneğin Bhatti ve arkadaşları tek ayaklı bir hidrolik robot için sıçrama yüksekliği, adım uzunluğu ve dolayısı ile uçuş süresini değiştirebilecek basit ama etkili bir kontrol ünitesi geliştirmiştir [18].

Mikro boyutlarda hem karada ve hem de suda ilerleyebilme özelliğine sahip robotlar oldukça popüler bir araştırma alanı olarak ortaya çıkmıştır. Amfibik özelliğe sahip ve hacimleri birkaç santimetre küp civarında olan bu robotlar daha çok çevre ve tıp alanlarında uygulama potansiyeline sahiptir. Bu robotlar suyun kaldırma kuvvetinin yanında yüzey gerilimini kullanarak ta su yüzeyinde hareket edebilmektedir. Tahrik sistemi piezo-elektrik malzeme kullanılarak yapılan amfibik mikro robotlar, piezo-mikro robotlar olarak isimlendirilmektedir [19]. Tahrik sisteminin oluşturduğu titreşim ile, düz sert zeminlerde ve su yüzeyinde ilerleyebilen piezo-mikro robotlar, yüksek enerji verimine sahiptirler. Piezo-elektrik sistemde elektrik enerjisinin yaklaşık %90' ı mekanik enerjiye dönüştürülebilmektedir [20]. Yakın

zamanda, karada ve su üzerinde yürüyebilen ve bu yüzeyler arasındaki geçişi sağlayabilen dört ayaklı piezo-amfibik mikro robotlar geliştirilmiştir [21]. Bu amfibik mikro robotlar, ileriye doğru yüzmek ve dönebilmek için ayaklarının üzerine yerleştirilmiş pasif kanatları kullanmaktadır. Bu robotların diğer bir özelliği, ayaklarında bulunan elektro ıslanma sistemi vasıtasıyla su üzerinde iken kontrollü bir dalış yaparak suyun altında inebilmeleri ve suyun içerisinde de ilerleyebilmeleridir. Ancak mikro-robotlar hafif olmaları nedeni ile oldukça sınırlı uygulama alanına sahiptirler. Bu çalışmalara paralel olarak, esas amacı mikro robotları görev alanına taşımak olan, yük taşıma kapasitesine sahip, daha büyük küresel amfibik robotlar da geliştirilmiştir [22]. Bu robotlar, iki çeyrek küresel kabuk ve plastik bir dairesel plakadan oluşan yarım küre biçimindeki amfibik robotlardır. Güncel çalışmalarda bu yapının hız performansını eğimli ve nispeten pürüzsüz yüzeylerde arttırmak amacı ile küresel robotun her ayağına pasif bir tekerlek takılarak paten-kayma hareketi yapması sağlanmıştır [23]. Son olarak bir su jeti eklenerek su altında ileriye itilmesi ve yönlendirilmesi sağlanan bu karma yapı, bir hibrit amfibik küresel robot halini almıştır [24].

Son zamanlarda dikkatleri üzerine çeken amfibik robotlar; altı bacaklı bir amfibik robot olan AmphiHex-II [25] ve bir vatoz gibi silikon yüzgeçlerini kullanarak hareket edebilen Velox' dur [26]. AmphiHex-II, farklı ortamlara adaptasyon sağlayabilmek için tasarlanmış ayarlanabilir ayak sertlikleri ile yüksek ilerleme performansına sahiptir. Velox ise, esnek yapıdaki dalgalı tahrik sistemi ile buzlu ya da karlı zeminde bile rahatlıkla ilerleyebilmekte ve aynı zamanda yüzgeçleri sayesinde etkin bir yüzme performansı göstermektedir.

Amfibik robotların birçoğunun hareket ve ilerleme mekanizmaları, canlıların hareketlerinden ilham alınarak geliştirilmiştir. Amfibik hayvanların sinir sistemleri incelenmiş ve sinir sistemleri merkezi model jeneratörü ile taklit edilmiştir. Bu şekilde yürüme, solunum ve yüzme gibi hareket modellerini kontrol edebilen bir robot hareket kontrol sistemi geliştirilmiş ve çok ayaklı bir amfibik robota uygulanmıştır [27]. Bunun yanında, amfibik kaplumbağalardan ilham alınarak, amfibik küresel bir robot geliştirilmiş [28] ve bu robot yapısı üzerine yukarıda belirtilen geliştirmeler [22-24] yapılarak, robotun hareket ve ilerleme performansı arttırılmıştır. Suyun üzerinde koşabilme yeteneği ile tanınan basilisk kertenkelesinden ilham alınarak tasarlanan, altı pedallı amfibik robot [29], suda yürüyebilen ve yüzebilen bir tür kuyruklu kurbağa cinsi semenderden ilham alınarak tasarlanan, dört bacaklı Salamandra robotu [30] ve son olarak, hamamböceğinden ilham alınarak tasarlanan, karma ilerleme mekanizmasına sahip altı bacaklı amfibik robot (AmphiHex-I) [31] doğayı taklit eden robot örneklerinin en bilinenleridir.

Bu çalışmada, basit bir sarkaç tarafından titreşime zorlanan elastik bir mekanizmanın karadaki ve su üzerindeki ilerleme hareketi incelenmektedir. İlerlemeye etki eden tasarım değişkenlerini ve etkilerini belirlemek için kara ve su için iki farklı fiziksel model geliştirilmiştir. Karasal ilerleme modelinde, robotun omurga ile bacakları birbirlerine elastik dönme yayları ile bağlı olup, bacaklardaki boylamasına titreşimler doğrusal yaylar ile modellenmiştir. Mekanizmanın yaylı kütlesi, üç adet noktasal kütleyle indirgenmiştir. Gövdenin merkezine yerleştirilen sarkacın salınım frekansı, bu yayların doğal frekanslarına ayarlandığında robotun çok düşük enerji tüketim değeri ile oldukça kararlı bir ilerleme hareketi ortaya koyduğu görülmüştür. Bu mekanizmanın kendi kendisini organize ederek gerçekleştirdiği ilerleme, herhangi bir merkezi otoriteye, algısal geri bildirim veya planlanmış bir harekete neden olan harici bir elemana ihtiyaç duymamaktadır [16].

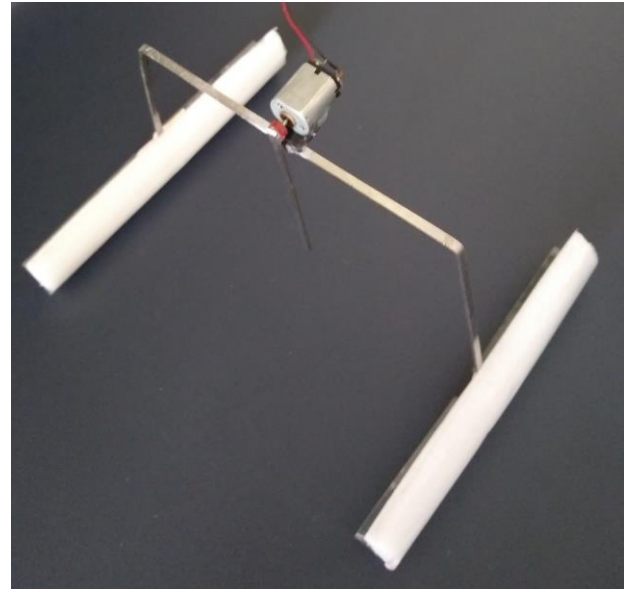
Sucul ilerleme modelinde ise, robot su üzerinde rijit bir cisim gibi davranmakta ve kayda değer bir şekil değişimi ve dönme hareketi yapmamaktadır. Bu sayede robot gövdesinin tamamı bir noktasal kütle, sarkaç ise bu kütle etrafında salınım yapan ikinci bir noktasal kütle olarak modellenebilmektedir. Omurganın merkezine yerleştirilmiş sarkaç harekete geçirildiğinde, robot gövdesi ile birlikte kanat şeklindeki ayaklar su içerisinde dikey yönde salınım hareketi yapmaktadır. Bu hareket nedeniyle ön ve arka yüzeyler arasında oluşan basınç farkı ve sarkacın oluşturduğu merkezkaç kuvvetinin etkisiyle elastik mekanizma su üzerinde planlanan yönde ilerleme hareketi yapabilmektedir. Bu sayede aynı mekanizmanın hem karada hem de su üzerinde ilerleyebilmesi sağlanarak, robotik uygulamalar için bacaklı amfibik bir ilerleme mekanizması geliştirilmiştir. Mekanizma katı yüzeylerde elastik gövdenin farklı rezonans modları tahrik edilerek yürüme, koşma, zıplama ve sürünme benzeri karasal ilerleme hareketleri yapabilirken, geliştirilen ayak yapısı sayesinde su üzerinde de ilerleyebilmektedir.

Çalışmanın ilk bölümünde mekanizmanın genel tanıtımı, karasal ve sucul ilerleme modelleri, tasarım parametreleri ile mekanizmanın karasal ilerlemesinde etkili olan rezonans frekansları ve sucul hareketi idare eden denklemler verilmektedir. Sonrasında deney sonuçları verilmekte ve bu sonuçların değerlendirilmesi yapılmaktadır. Sonuç bölümünde genel değerlendirmeler ve mevcut çalışmanın sonuçlarından yola çıkarak gelecekte yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmektedir.

2. Materyal ve Metot

Amfibik ilerleme mekanizmasının temel ilerleme dinamiklerini karakterize edebilmek için karasal ve sucul ilerleme hareketleri için basitleştirilmiş iki farklı fiziksel model geliştirilmiştir. Bu sayede elastik mekanizmanın karada ve sudaki dinamik davranışına

etki eden temel tasarım değişkenleri ve etkileri anlaşılabilir. Mekanizma, basit bir mikro DC motor, batmaya karşı poliüretan köpükten yapılmış kanat şeklindeki iki duba ayak ve U şekli verilerek bükülmüş elastik bir çubuktan oluşmaktadır. Yay çeliğinden üretilmiş, et kalınlığı $a = 0.8$ mm ve genişliği $b = 2$ mm lama kesite sahip E elastisite modülü 200 GPa olan elastik çubuk, robotun bacaklarını ve omurgasını oluşturmaktadır. Omurganın merkezine monte edilmiş mikro DC motora küçük bir sarkaç bağlanmıştır. Sarkaç, robotun tahrik sistemi olup, sarkacı tahrik eden mikro motor, 1/90 çevrim oranına sahip plastik bir dişli kutusuna sahiptir. Robotun karada ve su yüzeyinde hareketini sağlayabilmek için çok düşük yoğunluklu malzemeden üretilmiş iki ayak tarafından desteklenmektedir. Yarım elips kesitine sahip poliüretan ayaklar %50 oranında suya batmak suretiyle robotun 11 gr'lık toplam M kütlesini statik olarak taşımaktadır. Deneyler için geliştirilen amfibik ilerleme mekanizmasının fotoğrafı Şekil 1' de, boyutları ve kütleler Tablo 1' de verilmektedir.



Şekil 1. Amfibik ilerleme mekanizmasının fotoğrafı

Tablo 1. Robot ön modelinin boyutları

Değişken	Boyut
m_{motor}	3 gr
m_f, m_h	0,4 gr - 0,4 gr
m_R	0,7 gr
M	11 gr
L_v	75 mm
L_h	85 mm
R	25 mm
E	200 GPa
r_1	10 mm
r_2	7 mm
l_p	90 mm
a	0.8 mm
b	2 mm

2.1. Karasal ilerleme modeli

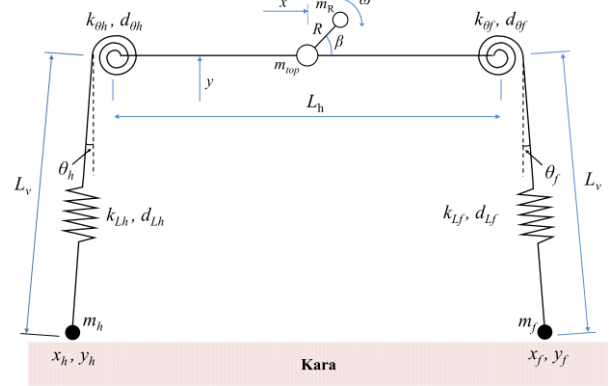
Amfibik mekanizmanın karada ilerlemesinin sistematik bir analizini yapabilmek ve karasal hareket için fiziksel bir model oluşturabilmek için şu varsayımlar yapılmıştır [16];

- Robotun davranışı sagittal düzlemde analiz edilebilir ve ayakların her birinin zemin ile teması bir noktasal temas olarak değerlendirilebilir.
- Robotun omurgası ve bacakları birbirlerine elastik dönme yayları ve sönümleyiciler ile bağlı elemanlar olarak kabul edilebilir.
- Bacaklardaki boylamasına titreşim doğrusal yay ve sönümleyiciler ile modellenilebilir.
- Omurga ve DC motorun kütleleri omurganın merkezinde birleşik bir nokta kütle olarak alınabilir.
- Bacakların kütleleri ihmal edilebilir ve ayakların her biri birer noktasal kütle olarak alınabilir.
- Titreşimi esnasında robotun gövde yapısında kalıcı şekil değişimlerinin olmadığı kabul edilmektedir.

Bu varsayımlara dayanarak, karasal ilerleme hareketi için oluşturulan basitleştirilmiş fiziksel model, Şekil 2' de gösterilmektedir. Karasal model, yay-sönümleyici elemanlar ile birbirine bağlı üç farklı yapıdan oluşmaktadır. Bu elemanların yayılı kütleleri Şekil 2' de gösterildiği gibi noktasal kütlelere indirgenmiştir. Bu noktasal kütlelerden ilki eyleyici ve omurga kütlelerini temsil eder ve omurganın merkezinde yer almaktadır (m_{top}). Diğer iki kütle ise ön ve arka ayak kütlelerini temsil eden m_f ve m_h ' dir. Omurganın uzunluğu L_h ile, ön ve arka bacakların uzunlukları L_v ile ve bacak ile omurgaya dik olan çizgi arasındaki açılar θ_f ve θ_h ile ifade edilmektedir. Elastik çubuğun herhangi bir sıkışma veya uzama etkisinde kalmadığı durumda, simetrik haldeki robotun bacaklarının doğal uzunlukları ile açılar L_0 ve θ_0 ile gösterilir. Omurga ve bacaklar, burulma sertliği k_θ ve sönümleme katsayısı d_θ olan elastik dönme yayları ile bağlanır. Robotun bacakları, sertliği k_L ve sönümleme katsayısı d_L olan doğrusal yaylar olarak modellenmiştir. Omurganın merkezine sabitlenmiş kütlesi m_{motor} ile verilen motor, ucuna m_R kütlesi bağlanmış R uzunluğundaki bir çubuğu ω açısal hızı ile döndürmekte olup, çubuğun omurga ile yaptığı açı β ile verilmektedir. Sonuç olarak, bu basit model 13 mekanik tasarım parametresinden ($k_\theta, d_\theta, k_L, d_L, \theta_0, \theta_{h0}, L_h, L_v, m_f, m_h, m_{top}, R$ ve m_R), bir kontrol parametresinden (ω) ve 16 durum değişkeninden ($x_f, y_f, x_h, y_h, L_v, \theta_f, \theta_h, \beta$ ve bunların zamana göre birinci türevleri) oluşmaktadır. Burada x_f ve y_f ön ayakların yatay ve düşey konumlarını, x_h ve y_h arka ayakların yatay ve düşey konumlarını göstermektedir.

Robotun karasal hareketi rezonans frekanslarına bağlı olarak ortaya çıkan yüksek genlikteki şekil değişimleri ile oluşmaktadır. İki boyutlu bu yapıda, ayakların çarpılması ve boylamasına sıkışıp uzaması şeklinde iki baskın titreşim hareketi ortaya

çıkılmaktadır ve basit fiziksel model bu iki harekete izin verecek şekilde özel olarak seçilmiştir. İlk titreşim modu daha düşük bir salınım frekansında (ω_θ) ortaya çıkmaktadır ve robotun ters sarkaç hareketi sonucu robot yürüme hareketi yapmaktadır. İkinci titreşim modu daha yüksek bir salınım frekansında (ω_L) gerçekleşir ve bacakların boyuna titreşimleri sonucu robot zıplayarak ilerler. Farklı gövde oranları için ara frekans değerlerinde robot sürünerek ve koşarak ilerleme yapabilmektedir [16].



Şekil 2. Basitleştirilmiş karasal ilerleme modeli [16]

Robot ön modelinin ω_θ ve ω_L rezonans frekansları hem deneysel hem de analitik olarak elde edilmiştir. Sarkacın açısal hızı elastik gövdenin doğal frekanslarına ayarlanarak serbest titreşim modları görsel olarak kolayca belirlenebilmektedir. Bu değerler doğrusal ve dönme yaylarının sertlik değerleri ölçülerek te hesaplanabilmektedir. Burada, kullanılan elastik yay çeliğinde sönüm katsayısının çok küçük olduğu, her iki bacağın başlangıç boylarının L_0 , başlangıç açılarının ise sifıra eşit olduğu varsayılmaktadır ($\theta_0 = 0$ (rad)).

Basitleştirilmiş modelde çarpılma (torsiyonel) rezonans frekansı için en basit analitik çözümlerden biri, elastik robotu birbirine dönme yayları ile bağlı paralel çubuk mekanizması olarak kabul edilerek hesaplanabilir ($\theta_f = \theta_h = \theta$ ve $L_v = L$). Bu durumda, U-şeklindeki elastik çubuğun çarpılma rezonans frekansı (ω_θ)

$$\omega_\theta = \sqrt{\frac{2k_\theta - m_{top}g/L}{m_{top}L^2}} \quad (1)$$

ve elastik kirişin boyuna rezonans frekansı (ω_L)

$$\omega_L = \sqrt{\frac{2k_L}{m_{top}}} \quad (2)$$

olarak basitçe ifade edilebilir [16]. Burada k_θ ve k_L sırası ile Şekil 2' de gösterildiği gibi omurga ile bacaklar arasındaki birleşme noktasında çubuğun burulma sertliğini (k_θ) ve bacakların boyuna sertliğini (k_L) temsil etmektedir.

Robotu titreşime zorlayarak ilerlemesini sağlayan tahrik sistemi herhangi bir algısal geri bildirimle sahip olmayan basit bir DC motor ve sarkaçtan ibarettir. Sarkacın açısal hızı, motora uygulanan gerilim ile değiştirilebilir. Dönen kütle için açısal hız sabit olduğu varsayılarak $F(t)$ merkezci kuvveti, açısal hız ω , dönen kütle m_R ve dönme yarıçapı R cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$F(t) = m_R \omega^2 R \quad (3)$$

Bu ifadeden, robotun titreşiminde açısal hızın yanında dönen kütle ve dönme yarıçapı gibi diğer tasarım parametrelerinin de etkili olduğunu anlaşılmaktadır.

2.2. Sucul ilerleme modeli

Amfibik mekanizmanın su üzerindeki ilerlemesini ifade eden, basit bir fiziksel model kurmak için aşağıdaki kabuller yapılmaktadır;

- Robot su içerisinde rijit bir cisim gibi davranmakta, elastik gövde kayda değer bir şekil değişimi göstermemektedir.
- Robotun su içerisinde dönme hareketi yapmadığı x ve y eksenlerinde ötelenme hareketi yaptığı kabul edilmektedir ki, deneyler bu kabulü doğrulamaktadır. Böylece robot gövdesinin tamamı bir noktasal kütle, sarkaç ise ana gövdeye bağlı ikinci bir noktasal kütleyle indirgenebilmektedir.

Bu varsayımlara dayanarak oluşturulan robotun fiziksel modeli Şekil 3' de gösterilmektedir. Sucul ilerleme modelinde robot rijit cisim olarak ele alınmakta olup, robotun gövdesinin tamamı bir noktasal kütle, m_{top} , sarkaç ikinci bir noktasal kütle m_R olarak temsil edilmektedir. Omurga uzunluğu L_h , rijit bacakların uzunlukları L_v , ayakların uzunlukları L_p , eliptik ayak kesit yüzeyinin dikey ve yatay yarıçapları sırası ile r_1 ve r_2 ile ifade edilmektedir. Ön ve arka ayakların kütleleri m_f ve m_h , hacimleri ise V_f ve V_h ile verilmektedir. Özet olarak, sucul ilerleme modeli 12 mekanik tasarım parametresinden ($L_h, L_v, L_p, r_1, r_2, V_f, V_h, m_f, m_h, m_{top}, R$ ve m_R) oluşmaktadır.

Yukarıda tanımlanan ve Şekil 4'de gösterilen iki noktasal A ve B kütleleri ele alınarak, su üzerinde dönmeden ötelenen robotun ve sarkacın için ivme ifadeleri aşağıdaki gibi elde edilir.

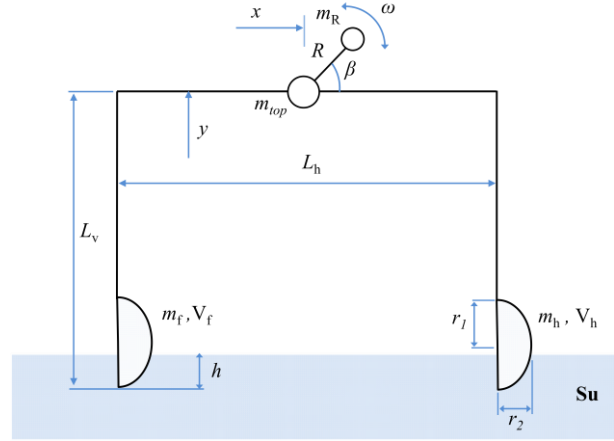
$$a_A = \ddot{x}i + \ddot{y}j \quad (4)$$

$$a_B = [\ddot{x} - R\omega^2 \cos\beta]i + [\ddot{y} - R\omega^2 \sin\beta]j, \quad (5)$$

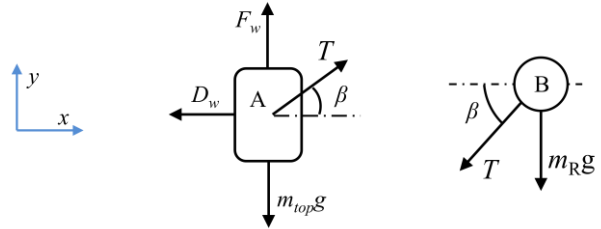
$$\dot{\beta} = \omega, \quad \ddot{\beta} = 0 \quad (6)$$

Şekil 4' de gösterilen iki noktasal kütle için serbest cisim diyagramları yardımı ve 4-6 nolu denklemlerde verilen ivme ifadelerinin kullanılması ile, sucul ilerleme için hareket denklemleri (7-13 nolu denklemler) elde edilmiştir. Bu denklemler bir adet

bağımsız değişken (zaman; t), bir adet kontrol parametresi ($\dot{\beta} = \omega$), altı adet bağımlı değişken (x, y, T, F_w, D_w, β) ve türevlerini ihtiva etmektedir.



Şekil 3. Basitleştirilmiş sucul ilerleme modeli



Şekil 4. Sucul ilerleme modeli için serbest cisim diyagramları

$$D_w + T \cos \beta = m_{top} \ddot{x} \quad (7)$$

$$F_w + T \sin \beta = m_{top} \ddot{y} \quad (8)$$

$$-T \cos \beta = m_R [\ddot{x} - R\omega^2 \cos \beta] \quad (9)$$

$$-T \sin \beta - m_R g = m_R [\ddot{y} - R\omega^2 \sin \beta] \quad (10)$$

$$\beta = \beta_0 + \omega t \quad (11)$$

$$F_w = k \cdot y^n \quad (12)$$

$$D_w = d_f \cdot \frac{|\dot{x}|^m}{2} \cdot \frac{|\dot{x}|}{\dot{x}} \cdot (-1) \cdot \left[\frac{|\dot{x}|}{\dot{x}} + 1 \right] + d_h \cdot \frac{|\dot{x}|^m}{2} \cdot \frac{|\dot{x}|}{\dot{x}} \cdot \left[\frac{|\dot{x}|}{\dot{x}} - 1 \right] \quad (13)$$

Burada, \ddot{x} ve \ddot{y} ivmenin yatay ve dikey bileşenlerini, g yer çekim ivmesini, β_0 sarkacın başlangıçta yer ile yaptığı açığı, T sarkaç kuvvetini, F_w suyun kaldırma kuvvetini, D_w ise suyun direncini ifade etmektedir.

3. Bulgular

Amfibik ilerleme mekanizması, titreşime dayalı hareket eden karasal bir ilerleme mekanizması [15-17] geliştirilerek, su üzerinde de hareketini sağlamak sureti ile elde edilmiştir. Bu amaçla robotun boyutları yeniden belirlenerek, yarı eliptik bir kanat profilli ayaklara sahip bir ön model üretilmiş ve deneylerde kullanılmıştır. Yapılan ölçümler esnasında, sarkacın açısal hızı DC motora uygulanan V gerilimi ile kontrol edilmiş ve aynı zamanda motor tarafından çekilen I

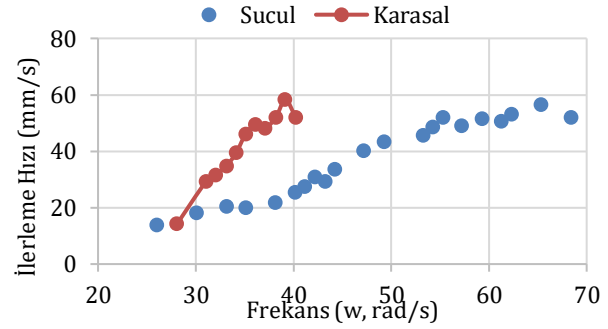
akımı, enerji tüketimini hesaplamak için kaydedilmiştir. Robotun hareketi hem karada hem de su dolu 70x150 cm boyunda bir akvaryum içerisinde hızlı kamera ile kayıt edilmiş ve sarkacın frekansı hızlı kamera kayıtlarından ölçülmüştür. DC motor gerilimi, 1.2 Volt ile 2.1 Volt aralığında 0.1 Volt adımlarla artırılarak ölçümler yapılmıştır.

Şekil 5' de robotun karasal ve sucul ilerleme hızlarının sarkacın açısal hızı ile değişimi görülmektedir. Robot karasal zeminde 38 rad/s ve su üzerinde ise 65 rad/s açısal hız değerinde en yüksek yer değiştirme hızına ulaşmaktadır. Deneysel verilerin alındığı frekans değerleri dışında kalan bölgelerde ise robot kayda değer bir yer değiştirme hareketi yapmamaktadır.

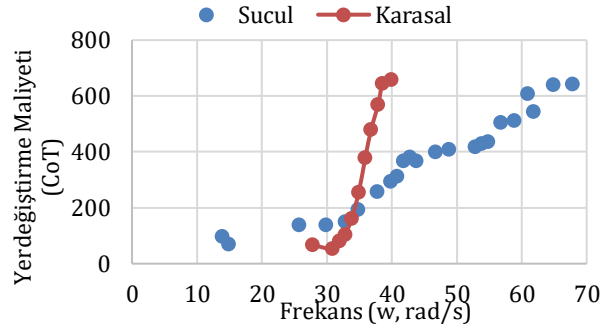
Şekil 6' da robotun karasal ve sucul yer değiştirme maliyetinin (Cost of Transport- CoT) sarkacın açısal hızı ile değişimi görülmektedir. Benzer şekilde robot en düşük yer değiştirme enerjisi değerlerine karasal zeminde 31 rad/s ve su üzerinde ise 16 rad/s açısal hız değerlerinde ulaşmaktadır. Burada, ilerleme hızındaki çok küçük artış ile birlikte, DC motora uygulanan gerilimin de yakın oranlarda artması belli bir aralıkta birim kütle başına enerji tüketimini sabit tutmaktadır.

Şekil 7' de çeşitli mekanizmalar ve biyolojik organizmalar için vücut kütlelerine göre taşıma maliyetinin değişimi gösterilmektedir. Tucker diyagramı [32] olarak bilinen bu grafikte çeşitli canlılar ve makinelerin birim kütle başına yer değiştirme maliyetleri boyutsuz birer sayı ile gösterilmektedir. Tüm değerlerin tek bir eğri üzerinde gösterilebilmesi logaritmik bir eğri kullanımını zorunlu kılmaktadır. Diyagramdaki kırmızı yıldız sembolü çalışmada tanıtılan mekanizmanın karasal zemindeki ilerleme maliyetini, mavi yıldız sembolü ise su üzerindeki ilerleme

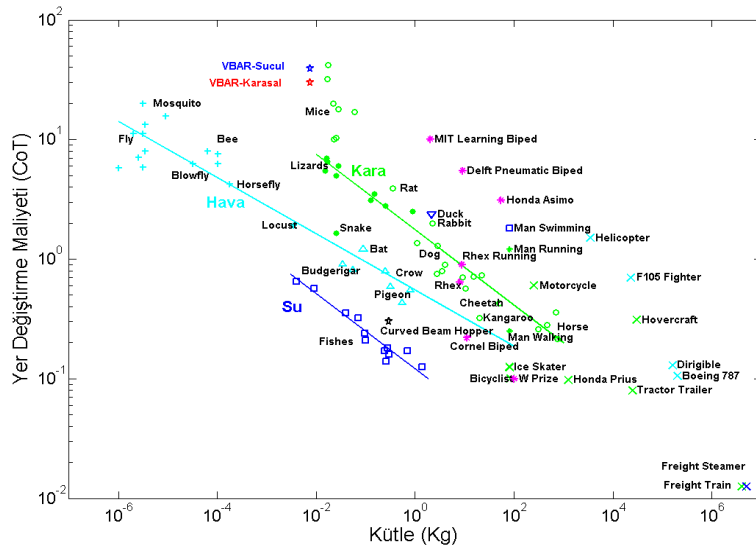
maliyetini göstermektedir. Grafikten anlaşılacağı üzere su canlıları yer değiştirmek için en az enerjiye ihtiyaç duyan türdür. Buna karşılık mevcut ilerleme mekanizmasının enerji tüketim değeri oldukça yüksek gözükmetedir. Ancak eğride dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta, canlı organizmalar dâhil olmak üzere, tüm türlerde kütle azaldıkça birim kütle başına yer değiştirme enerjisi ihtiyacının hızla arttığıdır. Mevcut robotun daha büyük kütleli versiyonlarında birim kütle başına yer değiştirme enerjisi ihtiyacı logaritmik olarak azalacak ve literatürdeki robotların seviyesine inecektir.



Şekil 5. Karasal ve sucul ilerleme hızlarının sarkacın açısal hızı ile değişimi



Şekil 6. Karasal ve sucul yer değiştirme maliyetlerinin (CoT) sarkacın açısal hızı ile değişimi



Şekil 7. Çeşitli mekanizmalar ve biyolojik organizmalar için vücut kütlelerine göre taşıma maliyeti (Tucker diyagramı [32]). Mavi ve kırmızı yıldız sembolleri, çalışmada tanıtılan mekanizmanın karasal ve sucul ilerlemeleri için diyagramdaki yerlerini göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, titreşime zorlanan bir basit bir elastik çubuğun uygun geometri ve ayak yapısı ile bir amfibik ilerleme mekanizması olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir. Daha önceki çalışmalarımızda aynı prensipler kullanılarak karada ilerleyen, oldukça düşük enerji tüketimi olan ve farklı salınım frekanslarında farklı ilerleme şekilleri gösteren mekanizmalar tanıtılmıştı. Bacaklı robotlar yüksek enerji tüketim değerleri nedeniyle pratikte çok kullanışlı değildir. Ancak elastik elemanların ve farklı ilerleme yöntemlerinin geliştirilmesi ile birlikte bu tüketim değerleri biyolojik organizmaların seviyesine yaklaşabilmektedir.

Bu çalışmanın sonuçlarından faydalanarak, ilerleyen dönemlerde suda daha hızlı ilerlemeyi sağlayacak bir ayak yapısının geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu sayede yer değiştirme maliyetinin düşürülmesi ve su canlılarının ilerleme maliyetine daha yakın değerlere ulaşılması amaçlanmaktadır. Geliştirilecek ayak yapısı aynı zamanda robotun karadan-suya ve sudan karaya kolaylıkla geçişini sağlayabilecek şekilde olmalıdır. Her ne kadar mevcut ayak yapısı ile bu geçiş sağlanmışsa da mekanizmanın farklı yüzeyler arasındaki geçiş performansını arttırmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir. Mevcut ilerleme mekanizması hem karada hem de suda ilerleyebilme yeteneğinin yanı sıra ölçeklenebilirliği sayesinde çok küçük ve çok büyük boyutlarda üretilebilir özelliğine sahiptir. Öyle ki, hidro-statik yüzey gerilmelerinin yardımı ile su yüzeyinde kalabilecek kadar küçük boyutlu robotların üretimi mümkün olmaktadır. Ancak suya batmayan bir robotun titreşim ile ilerlemesi için yine farklı bir ayak yapısının geliştirilmesini gerekmektedir. Bunların yanında, miligram mertebesinde kütleyle sahip bir robotun elektrik enerjisinin iletilmesi de oldukça problemli ve zor bir iştir. Zira, çok ince kablolar kullanılmasına rağmen kablolarda oluşan gerilmeler robotun hareketini etkilemekte ve kısıtlamaktadır. Bu problem ayrıca üzerinde çalışılması gereken konulardan bir tanesi olarak durmaktadır.

Kaynakça

[1] Kar, D.C., Kurien, I.K., Jayarajan, K. 2003. Gaits and energetics in terrestrial legged locomotion. *Mechanism and Machine Theory*, 38, 355-366.

[2] Armour, R., Paskins, K., Bowyer, A., Vincent, J., McGill, W. 2007. Jumping robots: a biomimetic solution to locomotion across rough terrain. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2, 565-582.

[3] Zhang, Z., Chen, D., Chen, K., Chen, H. 2016. Analysis and comparison of two jumping leg models for bioinspired locust robot. *Journal of Bionic Engineering*, 13, 558-571.

[4] Hanan, U. B., Weiss, A., Zaitsev, V. 2018. Jumping efficiency of small creatures and its applicability

in robotics. *Procedia Manufacturing*, 21, 243-250.

[5] Kelasidi, E., Jesmani, M., Pettersen, K. Y., Gravdahl, J. T. 2018. Locomotion efficiency optimization of biologically inspired snake robots. *Applied Science*, 8, 1-23.

[6] Alexander, R. N. 2006. *Principles of animal locomotion*. Princeton University Press. Princeton, NJ, 384s

[7] Calisti, M., Picardi, G., Laschi, C. 2017. Fundamentals of soft robot locomotion. *Journal of Royal Society Interface*, 14, 1-16.

[8] McGeer, T. 1990. Passive dynamic walking. *The International Journal of Robotics Research*, 9(2), 62-82.

[9] Collins, S., Ruina, A., Tedrake, R., Wisse, M. 2005. Efficient bipedal robots based on passive dynamic walkers. *Science*, 307, 1082-1085.

[10] Owaki, D., Koyama, M., Yamaguchi, S., Kubo, S., Ishiguro, A. 2010. A two-dimensional passive dynamic running biped with knees. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Mayıs 3-8, Alaska, 5237-5242.

[11] Kühnel, D.T., Helps, T., Rossiter, J. 2016. Kinematic Analysis of VibroBot: A Soft, Hopping Robot with Stiffness and Shape-Changing Abilities. *Frontiers in Robotics AI*, 3(60), 1-11.

[12] Raibert, M.H. 1986. Legged robots. *Communications of the ACM*, 29, 499-514.

[13] Yu, X., Iida F. 2014. Minimalistic models of an energy-efficient vertical-hopping robot. *IEEE Transactions and Industrial Electronics*, 61(2), 1053-1062

[14] Geyer, H., Blickhan, R., Seyfarth, A. 2005. Spring-mass running: simple approximate solution and application. *Journal of Theoretical Biology*, 232, 315-328.

[15] Reis, M., Iida, F. 2011. Vibration based under-actuated bounding mechanism *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 892-897.

[16] Reis, M., Yu, X., Maheshwari, N., Iida, F. 2013. Morphological computation of multi-gaited robot locomotion based on free vibration. *Artificial Life*, 19, 97-114.

[17] Reis, M., Iida, F. 2014. An energy-efficient hopping robot based on free vibration of a curved beam. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 19, 300-311.

[18] Bhatti, J., Hale, M., Iravani, P., Plummer, A., Sahinkaya, N. 2017. Adaptive height controller for an agile hopping robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 98, 126-134.

[19] Steltz, E., Seeman, M., Avadhanula, S., Fearing, R. S. 2006. Power Electronics Design Choice for

- Piezoelectric Microrobots. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 9-15 Ekim, Pekin, Çin, 1322-1328.
- [20] Becker, F., Zimmermann, K., Volkova, T., Minchenya, V.T. 2013. An Amphibious Vibration-driven Microrobot with a Piezoelectric Actuator: 7. Regular and Chaotic Dynamics, 18(1-2), 63-74.
- [21] Chen, Y., Doshi, N., Goldberg, B., Wang, H., Wood, R.J. 2018. Controllable water surface to underwater transition through electro wetting in a hybrid terrestrial aquatic microrobot. Nature Communications 9(2495), 1-11.
- [22] Li, M., Guo, S., Hirata, H., Ishihara, H. 2015. Design and performance evaluation of an amphibious spherical robot. Robotics and Autonomous Systems, 64, 21-34.
- [23] Li, M., Guo, S., Hirata, H., Ishihara, H. 2017. A roller-skating/walking mode-based amphibious robot. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 44, 17-29.
- [24] Xing, H., Guo, S., Shi, L., He, Y., Su, S., Chen, Z. Hou, X. 2018. Hybrid Locomotion Evaluation for a Novel Amphibious Spherical Robot. Applied Science, 8(156), 1- 24.
- [25] Zhong, B., Zhang, S., Xu, M., Zhou, Y., Fang, T., Li, W. 2018. On a CPG-Based Hexapod Robot: AmphiHex-II With Variable Stiffness Legs. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 23(2), 542-551
- [26] Pliant Enerji Sistemleri, 2019. Velox tanıtım sayfası. <https://www.pliantenergy.com/home-1> (Erişim Tarihi: 07.02.2019).
- [27] Matsuo, T., Yokoyama, T., Ueno, D., Ishii, K. 2008. Biomimetic Motion Control System Based on a CPG for an Amphibious Multi-Link Mobile Robot. Journal of Bionic Engineering Suppl., 91-97.
- [28] Shi, L., Guo, S., Mao, S., Yue, C., Li, M., Asaka, K. 2013. Development of an Amphibious Turtle-Inspired Spherical Mother Robot. Journal of Bionic Engineering, 10, 446-455.
- [29] Kim, H.G., Lee, D.G., Liu, Y., Jeong, K., Seo, T.W. Hexapedal Robotic Platform for Amphibious Locomotion on Ground and Water Surface. Journal of Bionic Engineering, 13, 39-47.
- [30] Crespi, A., Karakasiliotis, K., Guignard, A., Ijspeert, A.J. 2013. Salamandra Robotica II: An Amphibious Robot to Study Salamander-Like Swimming and Walking Gaits. IEEE Transactions on Robotics, 29(2), 308-320.
- [31] Zhang, S., Liang, X., Xu, L., Xu, M. 2013. Initial Development of a Novel Amphibious Robot with Transformable Fin-Leg Composite Propulsion Mechanisms. Journal of Bionic Engineering, 10, 434-445.
- [32] Tucker, V.A. 1975. The Energetic Cost of Moving About: Walking and running are extremely inefficient forms of locomotion. Much greater efficiency is achieved by birds, fish and bicyclists. American Scientist, 63(4), 413-419.