



KENDİNDEN TAHRİKLİ MİKRO ORGANİZMALARIN NEWTONYEN AKIŞKAN İÇİNDEKİ HAREKETİNİN SAYISAL MODELENMESİ

Hatice MERCAN^{1*}, Tufan Tuna KÖSELER^{1,2}

¹Yıldız Technical University, Department of Mechatronics Engineering, 34349, İstanbul, Türkiye

²Martı Yazılım Danışmanlık Sanayi ve Ticaret A.Ş., 35170, İzmir, Türkiye

Özet: Mikro organizmaların hareketi gerek biyolojik davranışlarını anlamada gerekse mikro robot dizaynında önem taşımaktadır. Mikro yüzücü çoğu zaman durağan akışkanda oldukça düşük hızlarda kıvrınma hareketi ile yer değiştirmektedir, bu da düşük Reynolds sayısından dolayı viskozitenin domine ettiği bir akıştır. Kıvrınma hareketi yüzücünün sürüklenme kuvvetlerinin etkisini farklılaştırmaktadır. İleri, geri ve nötral moddaki hareketler için zamana bağlı periyodik kıvrınma hareketi ANSYS® yazılımı ile modellenmiştir. Sonuçlar durağan duruma erişildikten sonraki tam bir periyod için akış çizgileri, hız vektörü eş eğrileri ve yüzücü çeperindeki duvar kesme kuvveti, girdaplılık ve sürüklenme katsayısı değişimi olarak sunulmuştur. Kıvrınan yüzücünün yüzme verimliliğinin hem Reynolds sayısına hem de yüzücü moduna bağlı olduğu gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kendinden tahrikli akış, Düşük reynolds sayılı akış, Sürüklenme katsatısı, Hesaplamalı akışkanlar mekaniği, Biyomedikal akışkanlar mekaniği


Numerical Modeling of the Movement of Self-Propelled Microorganisms in Newtonian Fluid


Abstract: The movement of micro-organisms is important both in understanding their biological behavior and in micro-robot design. The micro swimmer is often displaced by squirming motion at very low speeds in stationary fluid, a flow dominated by viscosity due to the low Reynolds number. The squirming movement differentiates the effect of the drag forces of the swimmer. Time-dependent periodic squirming motion for forward, reverse and neutral mode movements is modeled by ANSYS® software. The results are presented as streamlines, velocity isocurves, and wall shear force, vorticity, and drag coefficient variation at the swimmer wall for a full period after steady state is reached. It has been shown that the swimming efficiency of a squirming swimmer is dependent on both the Reynolds number and the swimmer's mode.

Keywords: Self-propelled flow, Low Re flow Drag coefficient, Computational fluid dynamics, Biomedical fluid dynamics

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Yıldız Technical University, Department of Mechatronics Engineering, 34349, İstanbul, Türkiye

E mail: hmercan@yildiz.edu.tr (H. MERCAN)

Hatice MERCAN  <https://orcid.org/0000-0002-3445-3441>

Tufan Tuna KÖSELER  <https://orcid.org/0009-0000-4138-6219>

Gönderi: 11 Eylül 2023

Kabul: 22 Kasım 2023

Yayınlanma: 15 Ocak 2024

Received: September 11, 2023

Accepted: November 22, 2023

Published: January 15, 2024

Cite as: Mercan H, Köseler TT. 2024. Numerical modeling of the movement of self-propelled microorganisms in Newtonian fluid. BSJ Eng Sci, 7(1): 36-42.

1. Giriş

Dünya biyokütlesinin çoğu mikroplardan özellikle bakterilerden oluşur ve mikro organizmalar sıvılar içinde hareket ederler. Mikro ölçekli akışların dinamiği, bu tür canlıların davranışlarının belirli yönlerini anlamamıza yardımcı olur. Ayrıca mikro organizmaların sıvı ortamlardaki hareketinin modellenmesi medikal alanda hastalık tetkik-teşhis süreçlerinde ve tedavi protokollerinde kontrol edilebilir ilaç ulaştırma amaçlı kullanılacak mikro robotların dizaynında önem arz etmektedir. Yüzen canlıların akışkanlar mekaniği yöntemleri ile incelenmesi mikro ölçekte makro ölçeğe nazaran büyük farklılıklar gösterir. Karakteristik boylarının küçüklüğü (mikron mertebesinde) ve yine karakteristik hızlarının küçüklüğü (mikron/sn mertebesinde) akışı tanımlayan Reynolds sayısını da bir hayli küçük olmasına yol açar; öyleki tipik Reynolds sayısı 1 civarındadır. Bu durumda, viskoz etkiler akışı

domine ederken atalet kuvvetleri göz ardı edilebilecek kadar küçüktür ve bu sebeple mikro yüzücü hareketi Stokes denklemleri ile modellenebilir (Blake, 1971). Buna ek olarak kıvrınma hareketinin matematiksel olarak tanımlanmasında yüzücünün sınır koşulu klasik akışkanlar mekaniğinde olduğu gibi kaymanın sıfır olması olarak tanımlanmaz. Çünkü organizmaların tahrik için kullandıkları kamçı, sil veya şekil değiştirme hareketlerinden birinin veya bir kaçının ileri, geri veya durma (nötral) hareketi için tanımlanması gerekir (Blake, 1971; Pedley, 2006).

Literatürde kıvrınma hareketi için sınır koşulu ilk defa küresele yakın şekilli ve deformasyona uğrayabilecek organizmaların düşük Reynolds sayılı akışlarda Lighthill (1952) tarafından önerilmiştir. Bu model daha sonraki yıllarda çok sayıda çalışmada çeşitli versiyonlarla kullanılmıştır. Düşük Reynolds sayıları altındaki akışta, Blake (1971) sonsuz silindirik yüzeyindeki kaymazlık sınır koşulunu zarf içinde belirlenen sonlu bir hız ile



değiştirmiştir. Bu yeni sınır koşulu, mikro organizmaların şekil değiştirme yoluyla iki boyutta hareket etmesinin modellenmesini mümkün kılmıştır. Pedley (2016) sınır koşulunu yeniden ele almış ve kıvrancının yüzey hızını sabit teğet bileşene indirgemıştır. Yeni formülasyon mikro yüzücülerin yakınlardaki hidrodinamik akışların kesin olarak hesaplanabilmesini sağlamıştır. Datt ve ark. (2007) tarafından kompleks akışkanlar içindeki aktif partikül akışının modellenmesinde kullanılmıştır, sedimentasyondaki partikül davranışı kısmen modellenenmiştir. Hamilton ve ark. (2018), tek ferro manyetik partikülün hareket edebilen esnek kuyruğu ile makro hareketi modellemiştir. Bunun için salınan manyetik alan oluşturmuş ve kuyruk uzunluğunun ideal uzunluğunu farklı manyetik alan frekansları için belirlemiştir. Pedley (2016) mikro organizmaların hareketine ek olarak hücre çeperinden besin alımını da bu modele eklemiştir.

Daddi-Moussa-Ider ve ark. (2018), Newtonyen akışkan içinde nötr, itilen ve çekilen akış modları için üç küresel mikro yüzücüyü kanal içi akışta modellemiştir. Akışta salınımlı kayma durumu gözlemlemişler ve bunun kanalın orta alanında ve duvarlardan birine daha yakın bir yerde meydana gelebileceğini raporlamışlardır. Çalışmada itici modundaki harekette salınımlı süzülme durumu kararsız olduğu raporlanmıştır. Çekici modundaki harekette ise bunun aksine, hareket tarzlarının geometrik özelliklerine güçlü bir şekilde bağımlı olduğu gösterilmiştir. Yüzücünün parametreleri değiştikçe, yakalama durumları kaybolabildiği ve yüzücülerin sabit bir oryantasyon ile sabit bir yükseklikte hareket ettiği kayma durumları ortaya çıkabildiği belirtilmiştir. Narinder ve ark. (2018) deneysel çalışmada ışık enerjisi ile tahrik olan mikro yüzücünün viskoelastik akışkan içindeki hareketini deneysel olarak incelemiştir. Dönme hareketi yaparak ilerlemesi temin edilen yüzücülerin koloidal akışkanın içinde doğrusal olmayan bir şekilde itme hızına bağlı olan bir açılma hız ve bir eğrilik yarıçapı sergileyebildiğini raporlamışlardır. Bu denge dışı hareketin akışkanın Newtonyen olmamasından kaynaklandığı gösterilmiştir. Zöttl ve Stark (2014), ısılı gürültü ile kıvranan tarafından oluşturulan hidrodinamik akış alanını sayısal olarak modellemiştir. Çalışmalarında kolektif anlamda kıvranma sınırı ve çoklu kıvranma hareketleri arasındaki hidrodinamik etkileşimleri irdelemiş, yüksek yoğunlukta kıvrancıda ve nötr kıvrancıda küme benzeri faz oluşurken güçlü itici ve çekicilerde altıgen küme gözlemlendiği raporlanmıştır. Devam eden çalışmalarında, Zöttl ve Stark (2018) çoklu parçacık çarpışma dinamiği yöntemi kullanılarak küresel şekilli kıvrananların hidrodinamiğini ele almıştır. Doğrusal momentum transferinin, akış ve çarpışma adımını birleştirerek ve çözüm prosedürüne sanal parçacıklar ve termal gürültü ekleyerek değerlendirildiğini raporlamışlardır. Kuhr ve ark. (2017) yerçekimi kuvveti altında farklı türde kıvrananları içeren toplu çökelmeyi modellemiştir. Sedimentasyon profili, yoğunluğun yükseklik ve kıvranım

tipi ile üstel olarak değiştiğini göstermiştir. Dibe yakın bölge, çoğunlukla durgun yüzücüler veya zayıf itici ve çekiciler içeren yoğun bir şekilde paketlenmiş katmana sahiptir. Bununla birlikte üst bölge, sedimentasyonun üst tarafında dinamik profil ve konveksiyon akışları gösterir. Takip eden çalışmada Kuhr ve ark. (2019) yerçekimi kuvveti altındaki mikro yüzücü hareketine çoklu parçacık çarpışma dinamiği yöntemi uygulamış, bunun için mikro yüzücülerin kolektif dinamiklerini kıvranan tipine ve yoğunluğuna göre kategorize etmiş ve Wigner sıvısının hidrodinamiğinin akış alanının yapısında altıgen bir düzen oluşturduğunu bildirmiştir.

Biyolojik akışların pek çoğu Newtonyen olmayan özellik gösterse de özellikle kan vb. vücut sıvıları pek çok sayısal çalışmada Newtonyen olarak kabul edilmiş ve çeşitli akışlar için sonuçlar literatürde raporlanmıştır (Gijzen ve ark., 1999; Valencia ve Solis, 2006; Mercan ve Atalık, 2018). Ayrıca literatürde yer alan çalışmaların çoğunda kıvranan yüzücülerin hareketi geçirgenliği olmayan rijit organizma yüzeyinde durağan ve zarf içi yüzey hızı şeklinde tanımlı sınır koşulu kullanılarak modellenmiştir. Ancak bu durum özellikle sil hareketinin modellenmesinde sayısal çözümü kolaylaştırır da akış fiziğinin zamana bağlı değişim bilgisini verememektedir. Bu çalışmada geçirgen olmayan rijit silindirik yüzücünü kıvranma hareketi yeni önerilen zamana bağlı periyodik bir fonksiyonla tanımlanmıştır. Newtonyen akışkan için silli organizmanın özelliklerini taklit eden yeni bir sinüzoidal kıvranma modeli sunulmuştur. Düşük Reynolds sayılı Newtonyen akış içindeki mikro organizmanın hareketi sayısal olarak incelenmiş, sürüklenme katsayılarının değişimi gösterilmiştir. Mikro organizmanın iki farklı akış modu iki farklı akış hızı altında irdelemiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada rijit ve sonsuz silindirik şekilli bir mikro yüzücünün kıvranma hareketi ANSYS programı kullanılarak modellenmiştir. Yüzücü düşük ve çok düşük Reynolds sayılı ($Re=5$; $Re=0,0005$) akışların içinde zamana bağlı olarak tanımlanmış sil hareketi yapmaktadır. Çalışmada kullanılmış olan ana denklem takımları aşağıda detaylıca verilmiştir.

Kütle korunumu ve momentum dengesi denklemleri sırasıyla Denklem 1 ve 2'de verilmiştir;

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

olup, burada p akışkan yoğunluğu, u hız vektörü, p basınç ve τ ekstra stres tensörüdür. Ekstra stres tensörü Newtonyen akışkan için Denklem 3'deki gibi ifade edilir:

$$\tau = 2\mu D \quad (3)$$

olup, burada μ dinamik viskozite ve D şekil değiştirme oranı tensörüdür. Reynolds sayısı (Denklem 4)

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu} \quad (4)$$

burada U karakteristik hız, D yüzücünün çapıdır. Literatürde tanımlanmış kıvranma hareketi durağan durumda ve yarıçapı D/2 olan yüzücünün yüzeyinde tanımlı teğet hızlardan oluşmuş bir zarf fonksiyonudur. Analiz, kıvranma hareketinin zaman içinde periyodik olarak değiştiği bir teğetsel hız ile gerçekleştirilir. Bu yeni zamana bağlı hareket, yüzeyde kurbağalama benzeri hareket, silleri dövme veya kamçıyı itme gibi daha gerçekçi bir kıvranma hareketi sağlamıştır ve Denklem 5'deki gibi tanımlanır:

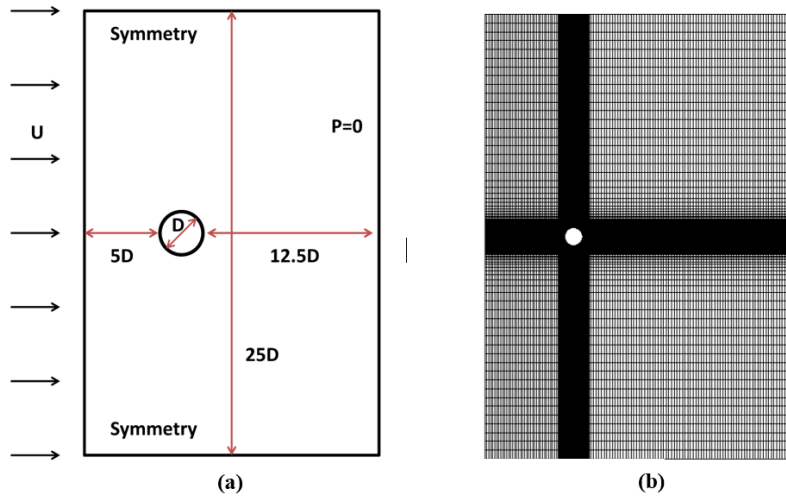
$$u_{\theta} \left(r = \frac{D}{2}, t \right) = \left[\sin\theta + \frac{1}{2r^3} \sin\theta + \frac{3}{2} \beta \frac{1}{r^4} \sin\theta \cos\theta \right] (\sin\omega t + 1) \quad (5)$$

burada t zamandır ve hesaplamalarda sabit açısal frekans $\omega = 1$ rad/sn şeklinde alınmıştır. θ yüzücünün yüzeyinde saat yönünün tersi istikametinde tanımlı açı, r yüzücünün yarıçapıdır ve β yüzücünün ileri geri veya nötral hareketini temsil eden boyutsuz sayıdır. $\beta > 0$ çeken, $\beta < 0$ iten ve $\beta = 0$ ne itici ne çekicidir. Nötral hareket ne itici ne çekicidir ve durağan durumdaki en yüksek enerji verimine sahip moddur (Pedley, 2016). Önerilmiş yeni zamana bağlı periyodik sil hareketi kıvranma hareketinin modunu değiştirmez. Zamana bağlı etkiler altında organizma itilen, çekilen veya nütür olarak

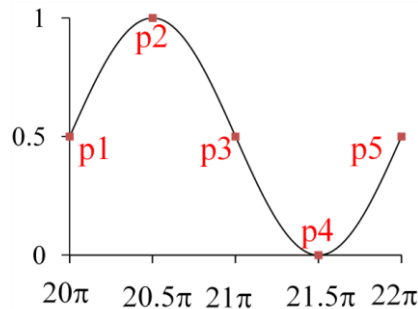
kalır.

Sayısal çözümleme ANSYS® programı ile yapılmıştır. Zamana bağlı ve durağan problemlerde hız ve basınç eşlemesi SIMPLE şeması ile gerçekleştirilmiştir (Şahin ve Atalık, 2019). Sınır koşulları klasik kaymazlık sınır koşulu olmadığından, kullanıcı tanımlı fonksiyon (UDF) kullanılarak ANSYS® programına tanımlanmıştır. Yüzücünün simetrik geometrisi sebebiyle 2 boyutta çözüm yapılmıştır. D çapındaki yüzücü girişten 5D, çıkıştan 12,5D mesafe uzaktadır. Dikdörtgen şeklindeki çözüm alanının yüksekliği 25D'dir, bakınız Şekil 1a. Kıvranma sınır koşulu yüzücü yüzeyinde, uniform hız girişte ve simetri sınır koşulu üst ve alt sınırlarda tanımlanmıştır. Çıkışta basınç değeri atmosferik basınca eşit olarak alınmıştır, o sebeple fark basınç 0'dır. Çözüm alanındaki ağ ANSYS® ICEM CFD program kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan örnek ağ, Şekil 1b'de verilmiştir.

Üç farklı ağ yoğunluğunda çözümlenmeler yapılmış ve eleman boyu küçültüldüğünde sonucun %0,1 den fazla değişmediği 46596 hücre sayılı ağ seçilmiştir. $Re = 40$ için kaldırma katsayısı değeri literatür ile karşılaştırılmış, farkın Şahin ve Atalık (2019) 'ın raporladığı değer olan %0,3'den küçük olduğu gözlemlenmiştir. Çözümün zamana bağlı periyodik durağan durumda olmasının sağlanması için sonuçlar 10'uncu periyottan sonraki periyotta sunulmuştur. Zamana bağlı sonuçlar Şekil 2'de gösterilen şemadaki noktalara karşılık gelen zamanda paylaşılmıştır.



Şekil 1. Çözümleme uzayı, (a) boyut ve sınır koşullarının şematik gösterimi, (b) simülasyonlarda kullanılan ağ.



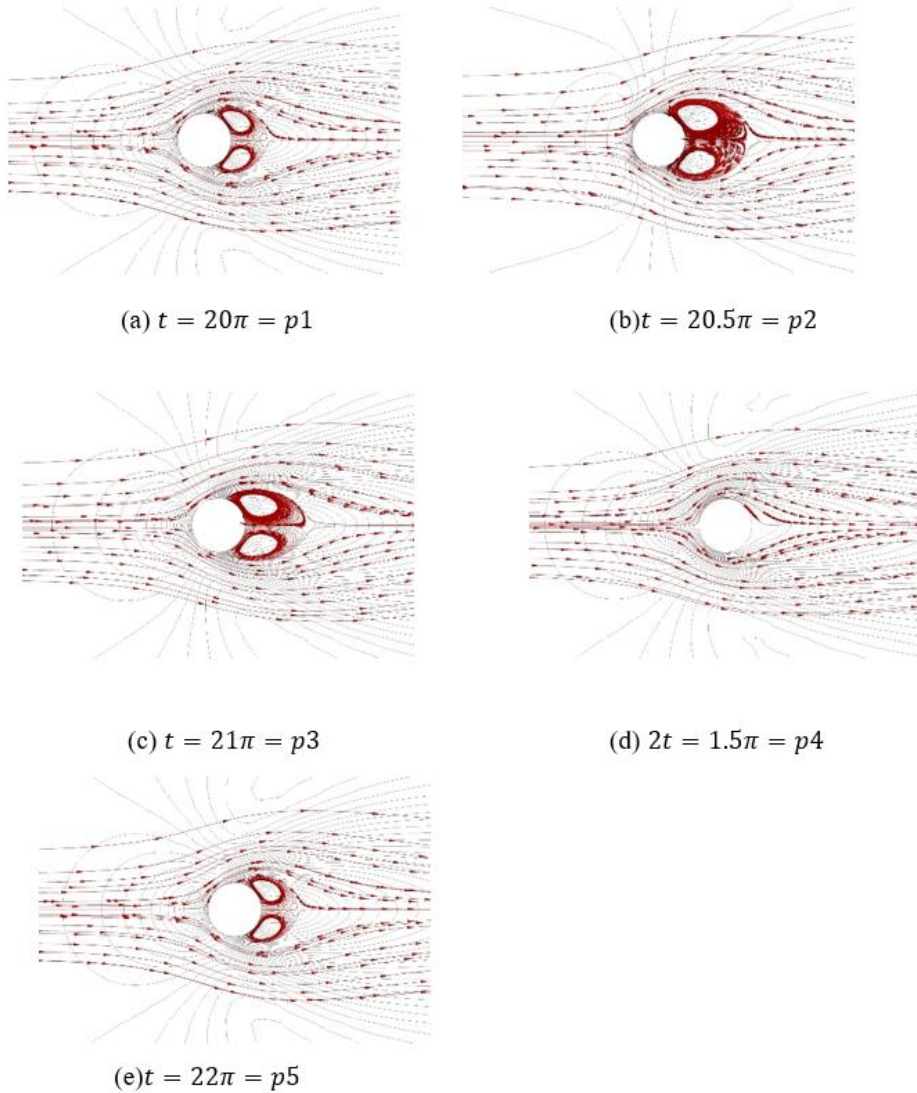
Şekil 2. Zaman bağlı periyodik hız değişiminin tam bir periyot boyunca karşılık geldiği değerlerin şematik gösterimi.

3. Bulgular ve Tartışma

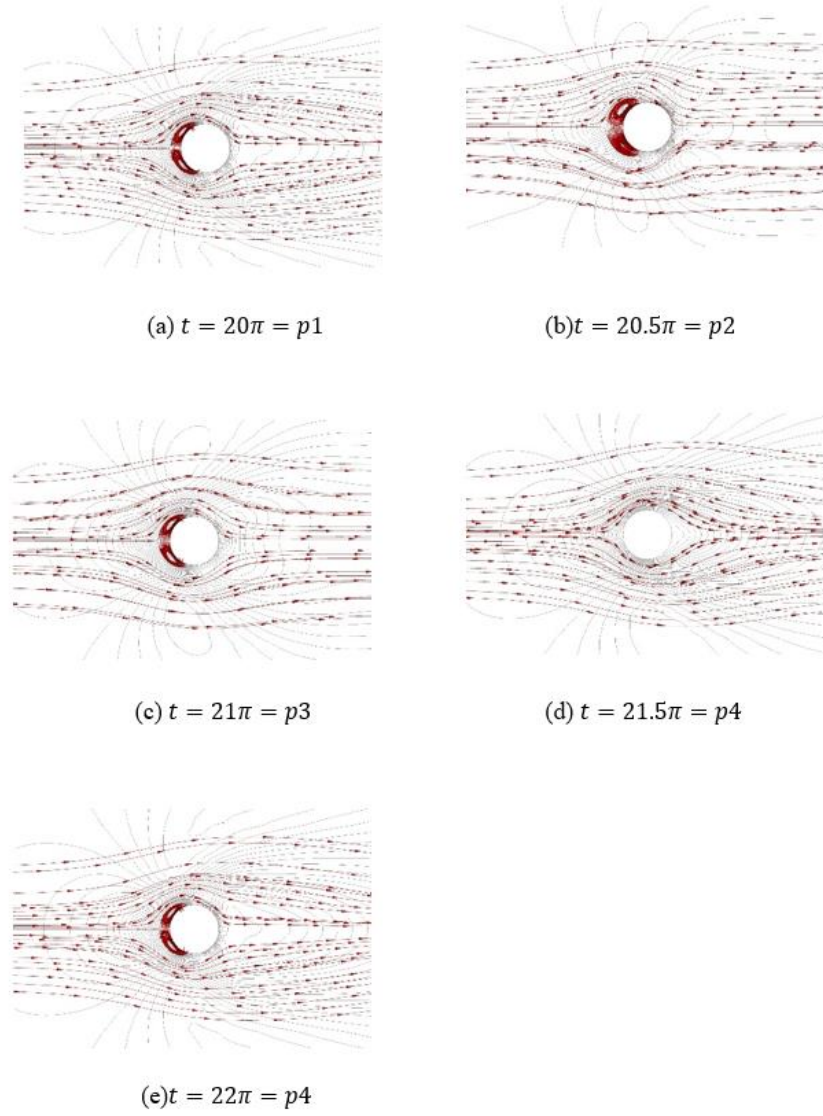
Bu çalışmada öncelikle yüzücünün periyodik olarak tanımlanmış sil hareketinin etkileri periyot süresince incelenmiştir. Bunun için 10'uncu tam periyot başlangıcından itibaren her çeyrek periyot zamanına denk gelen çözümler paylaşılmıştır. Seçilmiş noktalar Şekil 2'de gösterildiği gibidir. Sonuçlar itme ve çekme modlarında ve sabit $Re = 5$ değeri için gösterilmiştir. Öncelikle akış çizgileri ve eş hız eğrileri sonrasında da aynı zamana denk gelen duvar kayma gerilmesi ve girdaplılık değerleri incelenmiştir. Devamında bu sefer itme ve çekme modlarının ve Reynolds sayısının sürüklenme katsayılarına etkisi gösterilmiştir. Son olarak hareket modu ve Reynolds sayısının sürüklenme katsayısına etkisi araştırılmıştır.

Hareket modunun akış çizgilerine ve hız eşeğirilerine etkisi incelenmiştir. Mod etkisinin ($\beta < 0$ iken itme ve $\beta > 0$ iken çekme) kıvranan yüzücünün girdap oluşumuna belirgin etkileri gözlemlenmiştir. Mod

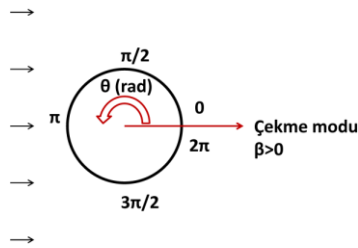
etkisinin belirgin şekilde gözlemlendiği iki farklı mod için tam bir periyot boyunca akış çizgileri ve hız eşeğirileri çekme modu $\beta = 5$ için Şekil 3'te ve itme modu $\beta = -5$ için Şekil 4'te gösterilmiştir. Yüzücü çekme modunda akış yönünde hareket etmekte olduğu için, girdap simetrik şekilde yüzücü arkasında oluşmuştur. Ancak itme modunda yüzücü akışa doğru kıvrandığı için simetrik girdaplar bu sefer yüzücünün ön tarafında oluşmuştur. İtme modundaki girdaplar çekme moduna göre küçüktür. Çekme ve itme modlarında benzer eğilim Ouyang ve ark. (2018) tarafından da raporlanmıştır. Periyodun $21,5\pi$ değerinde (Şekil 2'de p4 noktası) kıvranma hızı 0 olduğu için çekme veya itme modu akış çizgilerini ve hız eşeğirilerini etkilememiş, durum $Re = 5$ 'e karşılık gelen akışa indirgenmiştir, bakınız Şekil 3 ve 4. Her iki modda da en büyük girdaplılık periyodun $20,5\pi$ 'e eşit olduğu anda gözlemlenmiştir (Şekil 2'de p2 noktası).



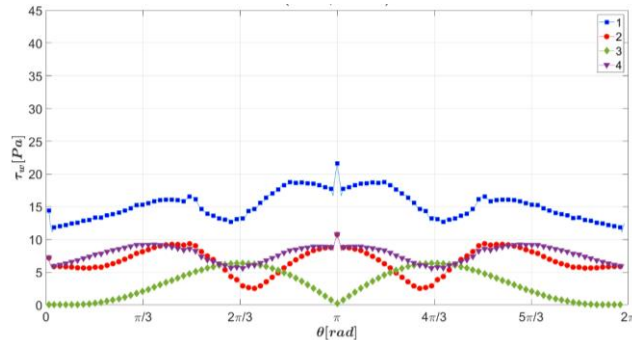
Şekil 3. Tam bir periyotta akış çizgileri (kırmızı çizgiler) ve eş hız eğrilerinin (siyah çizgiler) değişimi, $Re = 5, \beta = 5$, (a) 20π ; (b) $\frac{41\pi}{2}$; (c) 21π ; (d) $\frac{43\pi}{2}$; (e) 22π .



Şekil 4. Tam bir periyotta akış çizgileri (kırmızı çizgiler) ve eş hız eğrilerinin (siyah çizgiler) değişimi, $Re = 5, \beta = -5$, (a) 20π ; (b) $\frac{41\pi}{2}$; (c) 21π ; (d) $\frac{43\pi}{2}$; (e) 22π .



Şekil 5. Yüzücü çevresinde tanımlı açıların şematik gösterimi.



Şekil 6. Yüzücü çevresi boyunca duvar kesme kuvvetinin değişimi (çekme modu $\beta=5$, $Re = 5$).

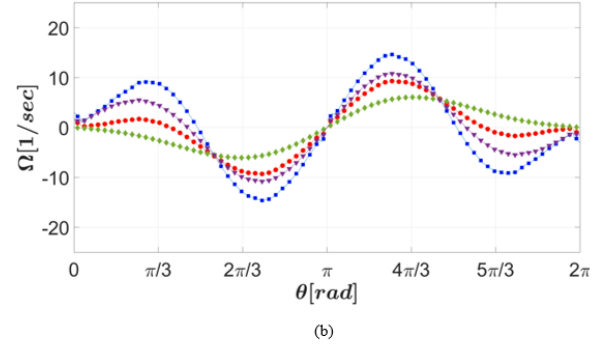
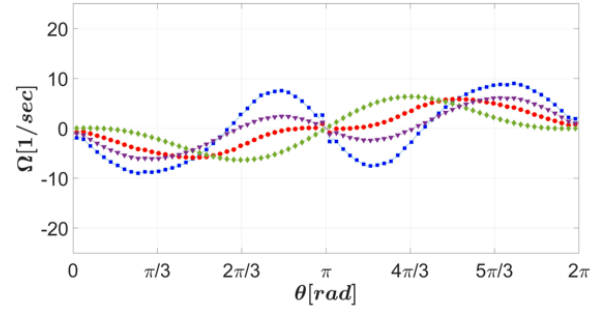
Periyot süresince ve çekme modundaki yüzücü çevresi boyunca kesme kuvveti incelenmiştir. Şekil 5'de şematik olarak gösterilen çekme modundaki yüzücü yüzeyindeki açılar pozitif θ yönünde tanımlanmıştır ve açının π radyan değeri gelen akış yönündeki uç noktaya denk gelmektedir. Çekme modundaki yüzücünün duvar kesme kuvvetindeki değişim Şekil 6'da p1 (mavi), p2 (kırmızı), p3 (yeşil) ve p4 (mor) noktalarına denk gelen zamanlar için gösterilmiştir, p5 noktası p1 noktası ile eşdeğer olduğu için şekilde gösterilmemiştir. Kesme kuvvetinin en yüksek olduğu zaman periyot başlangıcıdır ve maksimum değerini, beklendiği gibi uç noktada almaktadır.

Kıvrancı etrafındaki girdaplılık dağılımları Şekil 7'de gösterilmektedir. Girdap alanlarının üst yarısında, iticiler (çekiciler) yüzme yönlerinin ilerisinde (gerisinde) pozitif (negatif) girdap üretirler (Şekil 7 a çekici, Şekil 7 b itici). Girdaplılığın mutlak değerleri, kıvrancının hareket eksenine göre simetriktir. Kıvranma sınırı civarında, kesme kuvvetlerine maruz kalır ve bu da farklı akış davranışına neden olur. Kıvranan yüzücünün etrafındaki girdap düzeni doğrudan yüzme moduyla ilgilidir. İticilerin yüzeyindeki akış çizgileri girdabı aşağı yönde iter ve yönlendirirken, çekiciler yukarı ve aşağı yönlere yakın girdapları biriktirir. İticilerin yüzeyindeki akım çizgileri girdabı aşağı yönde iter ve yönlendirirken, çekiciler yukarı ve aşağı yönlere yakın girdapları biriktirir.

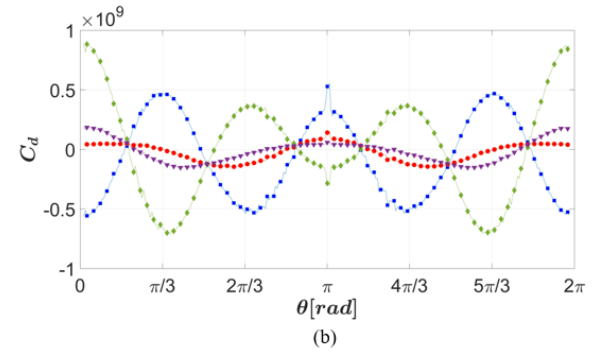
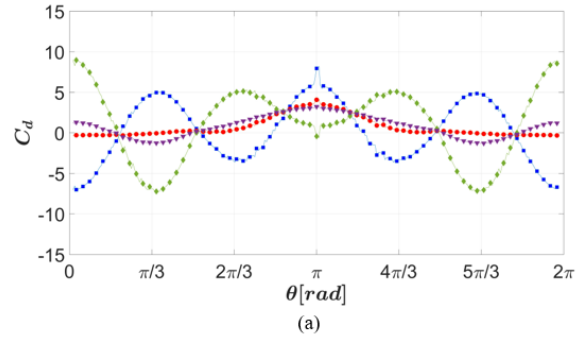
Son olarak hareket modunun ve Reynolds sayısının sürüklenme kuvvetlerine etkisi incelenmiştir. Sıvının kıvrancıya uyguladığı kuvvet, sürüklenme ve kaldırma olmak üzere iki bileşene ayrıştırılabilir. Toplam kuvvet, kıvranan cismin yüzeyi üzerindeki çekişin bir integralidir ve simülasyonumuzda, yüzey düğümlerindeki tüm birim kuvvetlerin toplamıdır. Sürüklenme kuvvetinin yüzey etrafındaki dağılımını elde etmek için sürüklenme katsayısı C_d Eşitlik 6'daki şekilde tanımlanır:

$$C_d = \frac{2F_x}{\rho U_0^2 D} \quad (6)$$

burada F_x yüzücü yüzeyindeki sürüklenme kuvveti; ρ sıvı yoğunluğu; U_0 sıvı hızıdır; ve D yüzücü çapıdır. Farklı Reynolds sayılarındaki yüzme modları için kıvrancı yüzeyi etrafındaki sürüklenme katsayıları Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 8 a $Re = 5$ ve Şekil 8 b'de $Re = 0,0005$ içindir. Reynolds sayısı arttıkça sürüklenme katsayılarının azaldığı görülmektedir. Yüzücü yüzeyinde sürüklenme katsayısı dağılımları, kıvrancının hareket eksenine göre simetrik veya antisimetriktir. Kıvrananların yüzme özelliklerinin Reynolds sayısı ve yüzme modu ile yakından ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 7. Yüzücü çevresi boyunca girdaplılık değerinin değişimi, $Re = 5$, (a) çekme modu: $\beta = 5$, (b) itme modu $\beta = -5$.



Şekil 8. Farklı hareket modları için sürüklenme katsayılarının yüzücünün dış yüzeyi boyunca dağılımı (a) $Re = 5$, (b) $Re = 0.0005$. Hareket modları sırası ile çekme modu $\beta = 5$ mavi renk; $\beta = 0.5$ kırmızı renk; itme modu $\beta = -5$ yeşil renk; $\beta = -0.5$ mor renk.

4. Sonuç

Bu çalışmada, sonsuz silindir şeklindeki kıvrancının zamana bağlı periyodik sil hareketi sayısal olarak incelenmiştir. Önerilen periyodik sınır koşulu ile tek hücreli silli organizmaların kıvranma hareketi daha

gerçekçi olarak modellenmiştir. Newtonyen sıvı içinde yüzen bir kıvrancının hidrodinamik davranışı sistematik olarak analiz edilmiştir. Reynolds sayısı ve yüzme modunun hareket üzerindeki etkilerinin yanı sıra kıvrananların güç harcaması tartışılmıştır. Sonuçlar, Re değeri 0,0005 ile 5 arasında değişen (bu aralık çoğu mikroorganizmanın yüzmesi için uygundur) kıvranan yüzücünün yüzmesinin eylemsizlik kuvvetinden etkilendiğini göstermiştir. Sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çok düşük Re 'de, Newtonyen akışkan için kıvranma hızı sabit kalmıştır. Nispeten yüksek Re 'de, kıvranma hızının değişme eğilimi gözlemlenmiştir.
- İtici hızı Re ve β değerinin artmasıyla artarken, çekicinin hızı Re 'nin artmasıyla azalır veya artar.
- Kıvranan yüzücünün yüzme verimliliği hem Re 'ye hem de β 'ye bağlıdır.

Son olarak, Newtonyen olmayan biyoakışkanlar içindeki periyodik kıvranma hareketleri ile sürüklenme ve kaldırma katsayılarının beraber incelenmesi gelecek çalışma olarak planlanmaktadır.

Katkı Oranı Beyanı

Yazar(lar)ın katkı yüzdesi aşağıda verilmiştir. Tüm yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	H.M.	T.T.K.
K	80	20
T	80	20
Y	100	
VTI	40	60
VAY		100
KT	60	40
YZ	90	10
KI	80	20
GR	80	20
PY	100	

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu çalışmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

- Blake JR. 1971. Self propulsion due to oscillations on the surface of a cylinder at low Reynolds number. Bull Aust Math Soc, 5(2): 255-264.
- Daddi-Moussa-Ider A, Lisicki M, Mathijssen AJ, Hoell C, Goh S, Bławdziewicz J, Menzel AM, Löwen H. 2018. State diagram of a three-sphere microswimmer in a channel. J Phys Condens Matter, 30(25): 254004.
- Datt C, Natale G, Hatzikiriakos SG, Elfring GJ. 2017. An active particle in a complex fluid. J Fluid Mech, 823: 675-688.
- Gijsen FJH, Allanic E, Van de Vosse FN, Janssen JD. 1999. The influence of the non-Newtonian properties of blood on the flow in large arteries: unsteady flow in a 90 curved tube. J Biomechanics, 32(7): 705-713
- Hamilton JK, Gilbert AD, Petrov PG, Ogrin FY. 2018. Torque driven ferromagnetic swimmers. Phys Fluids, 30(9): 092001. <https://doi.org/10.1063/1.5046360>.
- Kuhr JT, Rühle F, Stark H. 2019. Collective dynamics in a monolayer of squirmers confined to a boundary by gravity. Soft Matter, 15(28): 5685-5694.
- Kuhr JT, Blaschke J, Rühle F, Stark H. 2017. Collective sedimentation of squirmers under gravity. Soft Matter, 13(41): 7548-7555.
- Lighthill MJ. 1952. On the squirming motion of nearly spherical deformable bodies through liquids at very small Reynolds numbers. Commun Pure Appl Math, 5(2): 109-118.
- Mercan H, Atalık K. 2018. Numerical investigation of blood flow features in intracranial saccular aneurysms. J Thermal Eng, 4(2): 1867-1878.
- Narinder N, Bechinger C, Gomez-Solano JR. 2018. Memory-induced transition from a persistent random walk to circular motion for achiral microswimmers. Physical Rev Lett, 121(7) : 78003.
- Ouyang Z, Lin J, Ku X. 2018. The hydrodynamic behavior of a squirmer swimming in power-law fluid. Physics Fluids, 30(8): 083301. <https://doi.org/10.1063/1.5045701>.
- Pedley TJ. 2016. Spherical squirmers: models for swimming micro-organisms. IMA J Appl Math, 81(3): 488-521.
- Şahin Ç, Atalık K. 2019. Comparison of inelastic and elastic non-Newtonian effects on the flow around a circular cylinder in periodic vortex shedding. J Non-Newtonian Fluid Mechanics, 263: 1-14.
- Valencia A, Solis F. 2006. Blood flow dynamics and arterial wall interaction in a saccular aneurysm model of the basilar artery. Comput Struct, 84(21), 1326-1337.
- Zöttl A, Stark H. 2014. Hydrodynamics determines collective motion and phase behavior of active colloids in quasi-two-dimensional confinement. Physical Rev Lett, 112(11): 118101.
- Zöttl A, Stark H. 2018. Simulating squirmers with multiparticle collision dynamics. European Physical J E, 41(5): 61.