



Mustafa Ay
Gonca Özmen Koca
Seda Yetkin
Cafer Bal
Zühtü Hakan Akpolat

Fırat University, Elazığ-Turkey
mustafaay@firat.edu.tr; gonca.ozmen@gmail.com;
sedayetkin23@gmail.com; cbal@firat.edu.tr; hakpolat@firat.edu.tr

<http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2017.12.1.1A0375>

FARKLI KUYRUK MODELLERİNE SAHİP BİR ROBOT BALIĞIN FSI ANALİZİ

ÖZ

Bu çalışmada, akışkan içerisinde hareket edebilen ve farklı kuyruk yapılarına sahip olan robot balığa akışkan tarafından etki eden hız, basınç, kinetik enerji ve girdap değerlerinin bulunması amaçlanmıştır. Belirtilen amaca ulaşmak için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımlarından biri olan ANSYS paket programı kullanılmıştır. Analizler için carangiform yüzüş moduna sahip balıklar örnek alınarak bir robot balık modeli ve 3 farklı kuyruk modeli SolidWorks paket programında tasarlanmıştır. Oluşturulan robot balık modelleri için Akışkan-Yapı Analizi (FSI) yöntemi tercih edilmiştir. Analizlerin sonuçlarına göre kuyrukların yüzey alanlarının akışkanda oluşturduğu hız, basınç, kinetik enerji ve girdap değerlerini nasıl etkilediği incelenmiştir. FSI analizlerindeki basınç, girdap ve kinetik enerji değerlerine bakıldığında oluşturulan robot balık modeli için en uygun kuyruk yapısının girintili kuyruk yapısı olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Robot Balık, Carangiform Yüzüş Modu, Akışkan-Yapı Analizi (FSI), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), ANSYS

FSI ANALYSIS OF A ROBOT FISH WITH DIFFERENT TAIL MODELS

ABSTRACT

In this study, it is aimed to find the velocity, pressure, kinetic energy and vorticity values affecting robot fish which can move in the fluid and have different tail structures. The ANSYS package program, which is one of the Computational Fluid Dynamics (CFD) softwares, has been used to achieve the stated goal. For analysis, a robotic fish and three different tail models have designed in the SolidWorks package program inspired by fish with carangiform swimming type. The Flow-Structure Analysis (FSI) method was preferred for the robot fish models created. According to the results of the analyzes, how the surface areas of the tails affect the velocity, pressure, kinetic energy and vortex values in the fluid are investigated. When the pressure, vortex and kinetic energy values of the FSI analysis are examined, it has concluded that the most suitable tail structure for the robotic fish model is the forked tail structure.

Keywords: Robotic Fish, Carangiform Swimming Mode, Fluid Structure Analysis (FSI), Computational Fluid Dynamics (CFD), ANSYS

How to Cite:

Ay, M., Özmen Koca, G., Yetkin, S., Bal, C., and Akpolat, Z.H., (2017). Farklı Kuyruk Modellerine Sahip Bir Robot Balığın Fsi Analizi, **Engineering Sciences (NWSAENS)**, 12(1):78-89, DOI: 10.12739/NWSA.2017.12.1.1A0375.



1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Balıklar çok farklı ortamlarda yaşadıkları için vücut ve yüzme şekilleri birbirinden farklıdır. Birçok balık türü sudaki hareketlerini vücutlarının ve kuyruklarının kıvrılmasıyla (Body Caudal Fin-BCF) gerçekleştirirken, bazıları ise orta ve çift yüzgeçlerinin (Median Paired Fin-MPF) hareketleriyle sağlamaktadır. Balıkların hareketlerini sağlayan çift yüzgeçler, pelvik ve göğüs yüzgeçleri olarak bilinmektedir [1]. Balıklar suyun içerisinde BCF ve MPF yüzme hareketlerini birlikte gerçekleştirirler. Balıkların düz yüzüş hareketinde yer değiştirme özelliği manevra yapma özelliklerinden daha etkili olduğu için BCF yüzme şekli balıkların çoğunda görülmektedir. BCF türü yüzme şekli Anguilliform, Subcarangiform, Carangiform ve Thunniform olmak üzere 4 farklı yüzüş modunu içermektedir [2]. Bu çalışmada, analiz sırasında kullanılan robot balık Carangiform yüzüş moduna sahip olan bir sazan balık model alınarak oluşturulmuştur.

Carangiform bir balık, yüzme hareketini gerçekleştirirken kuyruğunun titreşimi ve vücut hareketleri nedeniyle balığın çevresinde basınç farkları oluşturur. Bu basınç farkları balığın yüzüşü için gerekli olan itme kuvvetini oluşturmaktadır [3]. Park vd. yaptıkları çalışmada [4], bir robot balık için itme kuvvetini oluşturan kuyruğun ve eklemelerin etkilerini incelemişlerdir. Robot balığın hareketine yardımcı olan kuyruğun esnekliği, kalınlığı ve titreşim frekansının itme kuvvetini nasıl etkilediğini ve maksimum itme kuvvetini oluşturmak için uygun mekanizmaya ait farklı kuyruk kalınlıklarının etkilerini incelemişlerdir. Robot balıklar için ince kalınlıktaki kuyrukların kalınlara göre daha çok itme kuvveti oluşturduğu belirlenmiştir [5].

Robot balıkların yüzme hareketlerini hassas bir şekilde yapabilmelerini sağlayacak uygun eklem ve uzuv parametrelerine sahip olması gerekir. Anton ve Listak çalışmalarında [6], biomimetik bir robot balığın uygun eklem sayısı ve uzuv uzunluklarının optimum değerlerinin bulunması için bir algoritma ortaya koymuştur. Bu algoritma analitik ve HAD sonuçlarının birleşiminden oluşturulmuştur. Kuyruğun titreşimi sırasında kuyruk sapı ile kuyruk kılçıkları arasındaki hareketi etkileyen faz açısı, kaldırma ve itme kuvvetlerini etkilemektedir. Ziyu vd. çalışmalarında [7], gerçek bir balığın kuyruk yapısını referans alarak biomimetik bir robot balık geliştirmişlerdir. Bu robot balığa farklı akışkan hızları ve faz açıları uygulanmıştır. Bu iki parametrenin itme ve kaldırma kuvvetlerini etkilediği görülmüştür. Taverna vd. çalışmalarında [8], 3 boyutlu bir robot balık modelini 3 farklı akış koşuluna maruz bırakıp girdap ve itme kuvvetleri arasındaki ilişki üzerinde durmuşlardır. Guan vd. çalışmalarında [9], biomimetik bir robotun 3 boyutlu hidrodinamik analizini benzetim ortamında sunmuşlardır.

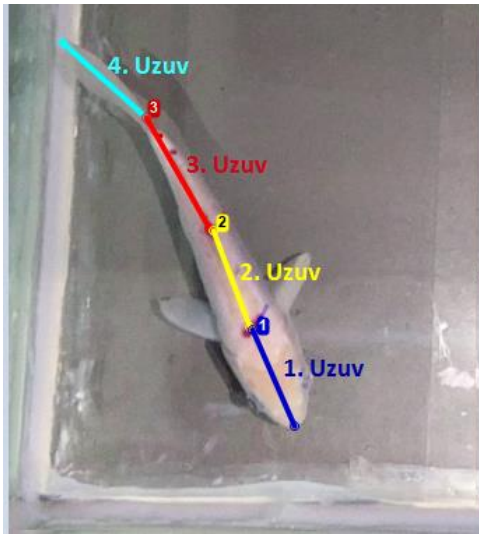
Analiz sırasında hesaplanmalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemini kullanmışlardır. Ayrıca robot balığın yüzüş hareketlerini oluşturmak için Fluent (6.3.26.), kullanıcı-tanımlı fonksiyonu (UDF) ve dinamik ağ modeli kullanılmıştır. Robot balıklar suda türbülans akış oluşturmaktadır. Bu yüzden Guan vd. çalışmalarında [10], biomimetik bir robot balığın hidrolik analizini HAD yazılımlarından biri olan ANSYS-Fluent modülünde yapmışlardır. Robot balığın kuyruk yapıları ve malzemeleri suda oluşan türbülans için önemlidir. Lee vd. araştırmalarında [11], 4 farklı kuyruk yüzgecine sahip robot balığın hidrodinamik analizlerini kullanıcı-tanımlı fonksiyonu (UDF) kullanarak yapmışlardır. Park vd. çalışmalarında [12], bir robot balığın kuyruğunun esnek malzemeden yapılması gerekliliğini ortaya koyarak, tek kuyruk yapısına sahip robot balığın hidrodinamik analizini FSI ve UDF yöntemi ile gerçekleştirmiştir.

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICATION)

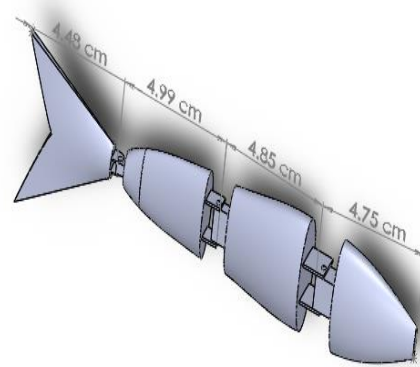
Bu çalışmanın önemi, farklı kuyruk yapılarına sahip carangiform yüzüş modunda bir robot balığın akışkan tarafından etki eden hız, kinetik enerji, basınç ve girdap değerleri analiz edilerek oluşturulan model için en uygun kuyruk yapısının tespitidir. Analiz sırasında akışkana 0.42 m/sn hız verilerek üç eklemli, üç boyutlu ve farklı kuyruk yapılarına sahip robot balıklar havuzun merkezine yerleştirilerek incelenmiştir. Farklı kuyruk yapılarına sahip bu robot balıklara etki eden hız, basınç, gerilme ve türbülans kinetik enerji değerleri YZ düzleminde hesaplanmıştır. Buna ek olarak belirlenen eklem açı değerleri ANSYS programının Structure Modülü'nde eklemelere uygulanarak robot balığın hareketi sağlanmış ve bu hareket sonucunda akışkanda oluşan basınç ve türbülans kinetik enerji değerleri YZ düzleminde incelenmiştir. Yapılan FSI analizi sonucunda, robot balığın deneysel gerçeklemesinden önce benzetim ortamına yansıtılmasıyla bu balığa etki edecek basınç, hız, kinetik enerji ve girdap değerlerinin kuyruk yapılarıyla ilişkisi irdelenmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Deneysel çalışmada ilk olarak analizde kullandığımız farklı kuyruk yapısına sahip robot balığın uzuv boyutları ve eklem açıları hesaplanmıştır. Robot balığın uzuv boyutları ve eklem açıları, carangiform yüzüş moduna sahip bir sazan balığının gerçek zamanlı yüzüş videolarının Kineovea (8.20) programı ile analizi sonucunda bulunmuştur. Şekil 1'de analiz edilen videolara göre balığın uzuv boyutlarının sırasıyla 4.75, 4.85, 4.99 ve 4.48 cm olduğu belirlenmiştir.



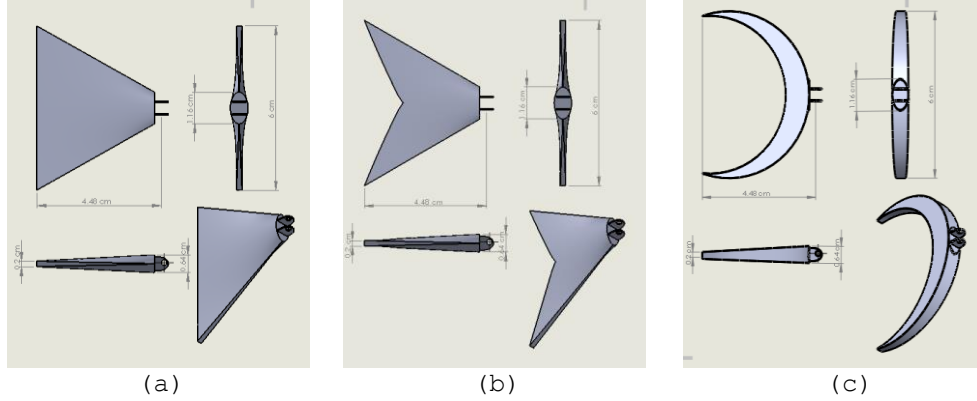
(a)



(b)

Şekil 1. a) 3 eklemli balığın uzuv uzunlukları b) Solidworks çizimi
(Figure 1. a) Link lengths of three jointed robotic fish b) Solidworks design)

Şekil 1.a'da gerçek sazan balığın uzuv boyutları dikkate alınarak 3 eklemli ve 3 boyutlu bir robot balık modeli Şekil 1.b'de gösterildiği gibi SolidWorks paket programında çizilmiştir. Ayrıca 4. uzuvun boyutuna uygun olarak 3 farklı kuyruk yapısı da SolidWorks programında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de FSI analiz esnasında kullandığımız 3 farklı kuyruk yapısının teknik çizimleri verilmiştir.



Şekil 2. a) Kare kuyruk modeli b) Girintili kuyruk modeli c)Yarım ay kuyruk modeli
(Figure 3. a) Square tail model b) Indented tail model c) Lunate tail model)

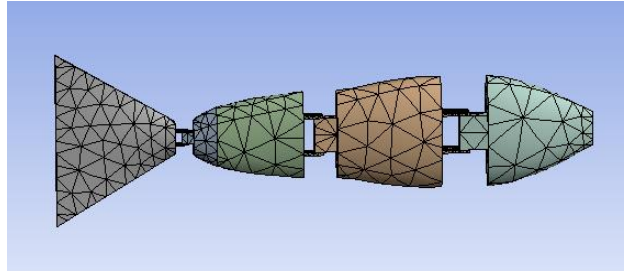
Sazan balık videoları incelendiğinde balığın üzerindeki eklem noktaları optimize edilmiş uzuv boyutlarına göre işaretlenmiştir. Sazan balığı su içerisinde düz yüzüş hareketini gerçekleştirirken belirlediğimiz eklemlerin açı değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Robot balığın düz yüzüş moduna ait eklem açı değerleri
(Table 1. Joint angles of the robotic fish for forward swimming mode)

Eklemler			
Düz yüzüş modu	1. Eklem	2. Eklem	3. Eklem
Açılar (Deg.)	176.1357950	153.0836859	145.1361851
	175.2354979	153.5292984	162.2068716
	174.6678633	153.4573632	165.4830793
	173.3023498	152.3611529	166.9507686
	171.7543274	149.9014388	167.9305946
	169.3704546	147.7570309	166.6468511
	168.4959410	143.7463111	159.5197187
	169.1222742	141.5525605	153.5925120
	172.4078685	142.9951819	148.5464624
	176.4014157	147.6507552	149.2393738
	177.7763526	154.2271972	152.9226300
	178.3821152	158.9154077	166.0022865
	178.0812566	158.5450940	178.8764245
	176.8572285	160.2030977	175.9446906
	175.6917178	156.6436476	175.1177144
	172.3287574	153.3357456	171.9750266
	171.1927050	150.0253247	166.2016652
	171.3580211	147.7005275	161.1904263
	176.8642063	147.9686596	153.8922833
	185.8689995	152.3831979	152.8802917

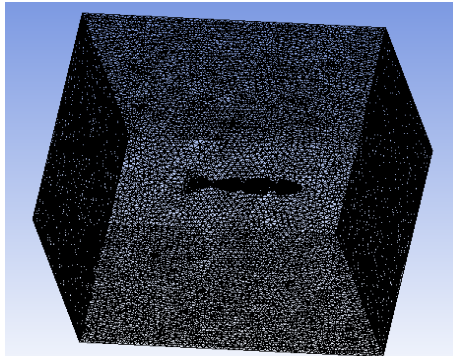
Deneyisel çalışmanın ikinci aşaması ise carangiform yüzüş moduna sahip bir robot balığın ANSYS programında FSI analizini gerçekleştirmektir. FSI analizi yapılırken ANSYS programında Fluent (akışkan) ve Structure (yapı) Modülleri ile birlikte çözüm yapılmaktadır. Solidworks de tasarımını gerçekleştirdiğimiz robot balığın kuyruk yapısını değiştirerek oluşturulan farklı kuyruklu balık modelleri sırasıyla Structure Modülü'ne aktarılmıştır. Bu modüle robot balık modelinin hareket edeceği havuz boyutu 50x50x50(cm) olacak şekilde belirlenmiş ve robot balık modelleri havuzun merkezine yerleştirilmiştir. Ayrıca yaptığımız FSI analizlerinde 2 durum göz

önüne alınmıştır. Bu durumlardan birincisi, farklı kuyruk yapılı robot balık modellerinin havuzun merkezinde sabitlenerek Fluent Modülü'nde akışkan olarak seçilen suya Kineovea (8.20) programı ile belirlenmiş ortalama 0.42 m/sn'lik hız verilmesi durumudur. İkinci durum ise, Structure Modül' de farklı kuyruk yapılı balık modellerinin düz yüzüş hareketini gerçekleştirilmesi için robot balığın eklemelerine Tablo 1' de gösterilen açı değerlerinin girilmesi ve Fluent Modülü' nde akışkana hız verilmemesi durumudur. Analizler sırasında model olarak Türbülans Modeli (k-epsilon) ve ağ yapısı olarak Smoothing Metodu (System Couplig) seçilmiştir. Robot balığın FSI analizi yapılırken 2 ayrı ağ yapısı oluşturulmuştur. Bunlardan birincisi Şekil 3'de gösterilen Structure Modülü' ndeki robot balığın ağ yapısıdır.



Şekil 3. Robot balığın Structure Modülü'ndeki ağ yapısı
(Figure 3. The mesh structure of the robotic fish in the Structure Module)

İkincisi ise Şekil 4'de gösterilen Fluent modülündeki robot balığın çevresindeki havuzun ağ yapısıdır.



Şekil 4 Fluent Modülü'ndeki ağ yapısı
(Figure 4. The mesh structure on the Fluent Module)

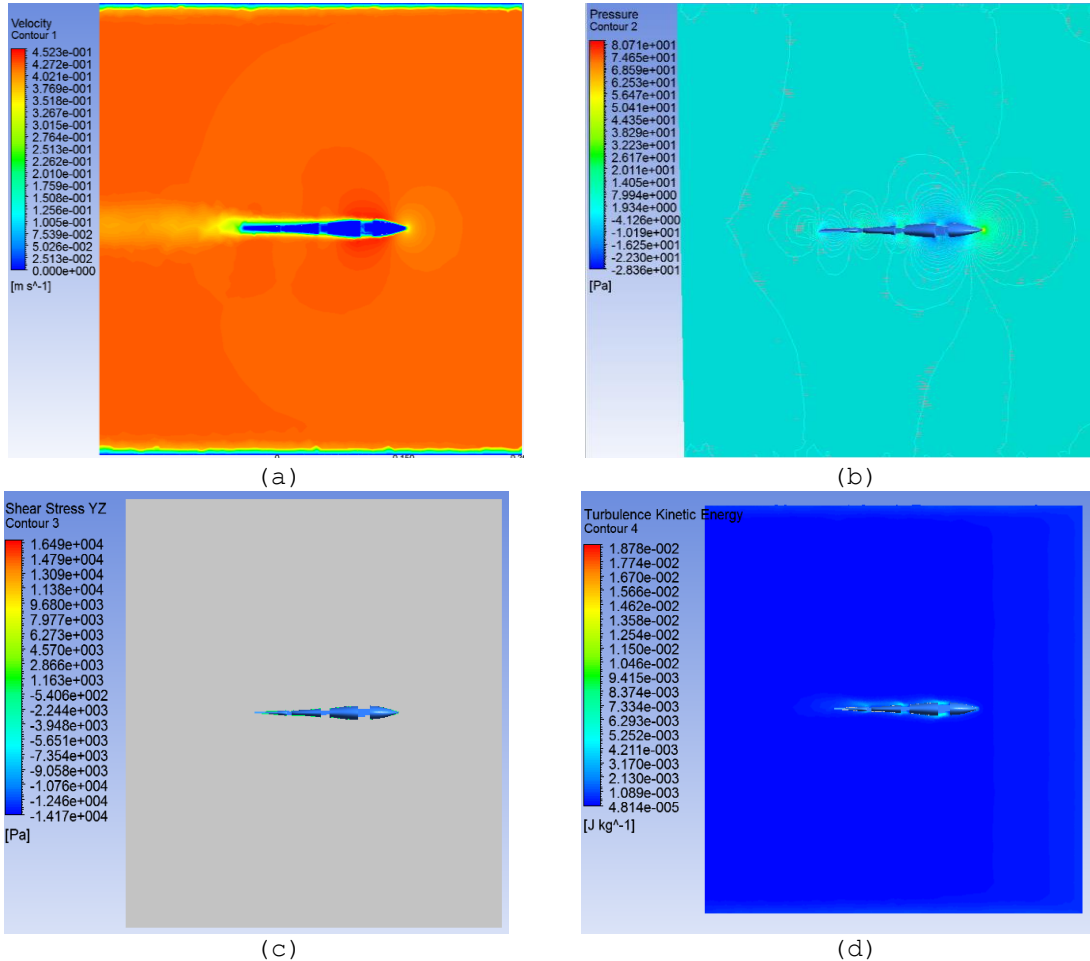
Ağ yapısının boyutu her bir yüzey alanı 0.01 birim olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu boyuta uygun olarak oluşturulan ağ modelinin eleman ve düğüm sayıları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Robot balık modellerinin ağı yapısı özellikleri
(Table 2. Properties of the mesh structure of the robotic fish models)

Ağ Modelinin Modülü	Robot Balık Modellerinin	Düğüm Sayısı	Eleman Sayısı
Structure Modulu	Birinci	4883	2278
	İkinci	4640	2132
	Üçüncü	4603	2211
Fluent Modulu	Birinci	127546	694635
	İkinci	127594	694898
	Üçüncü	126938	690677

4. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS)

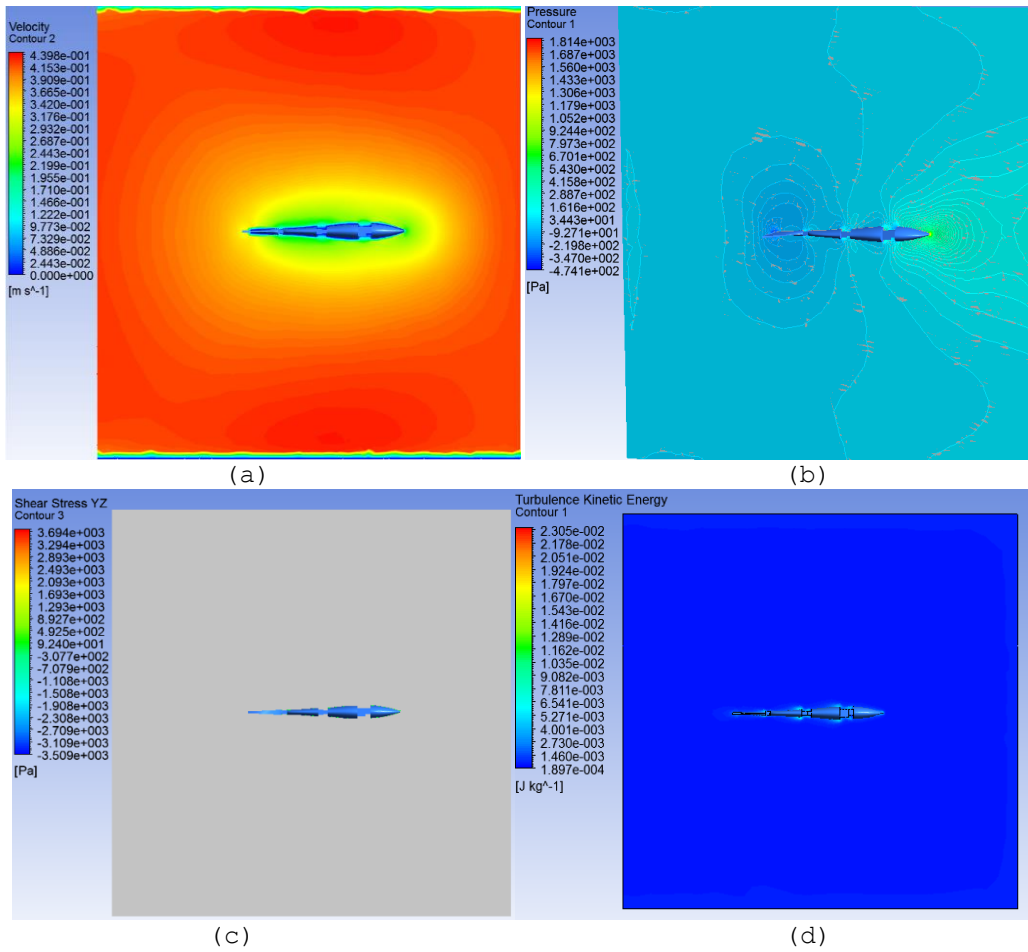
Şekil 2.a'da gösterilen kare kuyruk yapısına sahip bir robot balığın havuzun merkezine yerleştirilmesi ve akışkana 0.42 m/sn hız verilmesi durumunda robot balığın 1.8 sn'lik zaman diliminde YZ düzleminde oluşturduğu hız kontur eğrileri ve değerleri Şekil 3.a'da gösterilmiştir. Basınç kontur eğrilerinin değerleri ve girdap şekilleri Şekil 3.b'de, kayma gerilmeleri ve türbülans kinetik enerjileri sırasıyla Şekil 3.c ve Şekil 3.d'de verilmiştir.



Şekil 3. Kare kuyruk modeline sahip robot balığın a) Hız b) Basınç ve girdap kontur eğrileri c) Kayma gerilmeleri d) Türbülans kinetik enerjileri

(Figure 3. a) Velocity b) Pressure and vorticity contour curves c) Shear stress d) Turbulence kinetic energy of the robotic fish with square tail model)

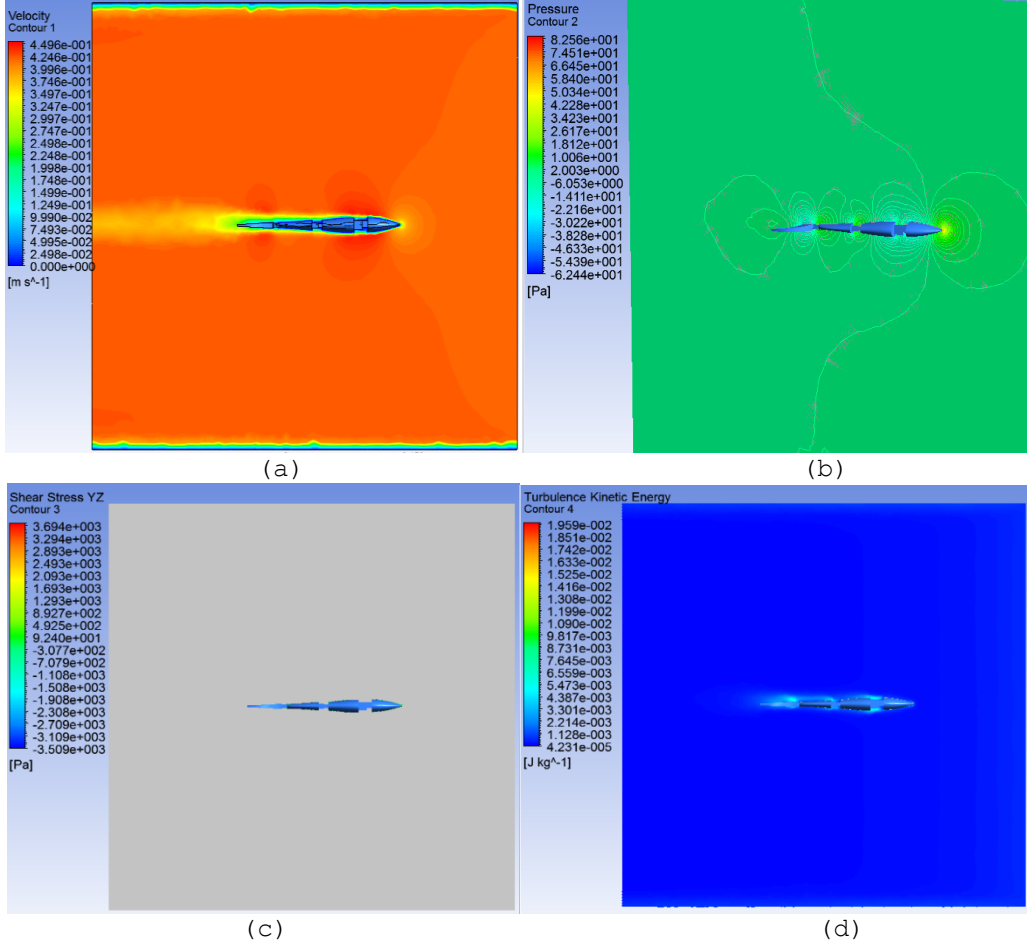
Analiz esnasında akışkana 0.42 m/sn sabit bir hız verilmiştir ve robot balık etrafındaki hız değerinin yaklaşık olarak $3.267e^{-1}$ m/sn olduğu Şekil 3'de görülmektedir. Ayrıca robot balığın suda oluşturduğu basınç değeri yaklaşık olarak $3.44e^{-1}$ Pa, kayma gerilmelerinin yaklaşık olarak $2.866e^3$ Pa ve robot balığın suda oluşturduğu kinetik enerji değerinin yaklaşık olarak $5.252e^{-3}$ J/kg olduğu ANSYS paket programında yapılan analiz sonucunda Şekil 3'deki gibi elde edilmiştir. Şekil 2.b'de gösterilen girintili kuyruk yapısının seçildiği robot balığın havuzun merkezine yerleştirilmesi ve akışkana sabit 0.42 m/sn hız verilmesi durumunda robot balığın YZ düzleminde oluşan hız kontur eğrilerinin değerleri Şekil 4.a'da gösterilmiştir. Şekil 4.b'de ise basınç kontur eğrilerinin değerleri ve girdap şekilleri verilmiştir. Kayma gerilmeleri ve türbülans kinetik enerjileri sırasıyla Şekil 4.c ve Şekil 4.d'de verilmiştir.



Şekil 4. Girintili kuyruk modeline sahip robot balığın a) Hız b) Basınç ve girdap kontur eğrileri (Figure 4. a) Velocity b) Pressure and vorticity contour curves c) Shear stress d) Turbulence kinetic energy of the robotic fish with indented tail model)

Girintili kuyruk modelli robot balığın analizi sonucunda robot balığın hız değerinin, robot balığın suda oluşturduğu basınç değerinin, kayma gerilmesinin ve robot balığın suda oluşturduğu kinetik enerji değerinin yaklaşık olarak sırasıyla $2.199e^{-1}$ m/sn, 1.934 Pa, $1,163e^1$ Pa ve $4.01e^{-3}$ J/kg olduğu Şekil 4'de gösterilmiştir. Şekil 2.c'deki yarım kuyruk yapısının seçildiği robot balığın havuzun

merkezine yerleştirilmesi ve akışkana 0.42 m/sn hız verilmesi durumunda robot balığın YZ düzleminde oluşan hız kontur eğrileri ve değerleri Şekil 5.a'da, basınç kontur eğrileri ve değerleri Şekil 5.b'de gösterilmiştir.



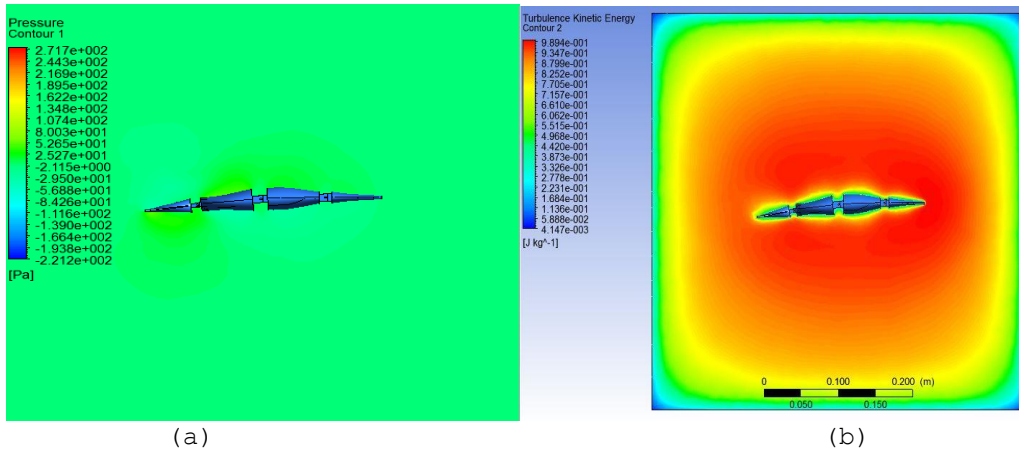
Şekil 5. Yarım ay kuyruk modeline sahip robot balığın a) Hız b) Basınç ve girdap kontur eğrileri c) Kayma gerilmeleri d) Türbülans kinetik enerjileri

(Figure 5. a) Velocity b) Pressure and vorticity contour curves c) Shear stress d) Turbulence kinetic energy of the robotic fish with lunate tail model)

Yarım ay kuyruk modeline sahip robot balığın hız değerinin, robot balığın suda oluşturduğu basınç değerinin, kayma gerilmesinin ve robot balığın suda oluşturduğu kinetik enerji değerinin yaklaşık olarak sırasıyla $3.497e^{-1}$ m/sn, 2.003 Pa, $9.24e^1$ Pa ve $4.387e^{-3}$ J/kg olduğu Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 3.a, 4.a ve 5.a'daki hız kontur eğrilerine bakıldığında robot balığın çevresinde en düzenli hız dağılımına sahip olan robot balık modeli girintili kuyruk yapısına sahip olan modeldir. Girintili kuyruk yapısından sonra oluşan akışkanda ikinci düzenli hız dağılımı ise yarım ay kuyruk yapısına sahip olan robot balık modelidir. Bu düzenli hız dağılımı robot balığın akışkan içerisinde daha rahat hareket ettiğini belirtmektedir. Şekil 3.b, 4.b ve 5.b'de gösterilen basınç değerlerine bakıldığında robot balık modellerinin baş kısmında maksimum basınç değerlerinin oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.b'de robot balığın kuyruk çevresinde oluşan basınç değeri diğer 2 kuyruk çevresinde oluşan basınçtan daha

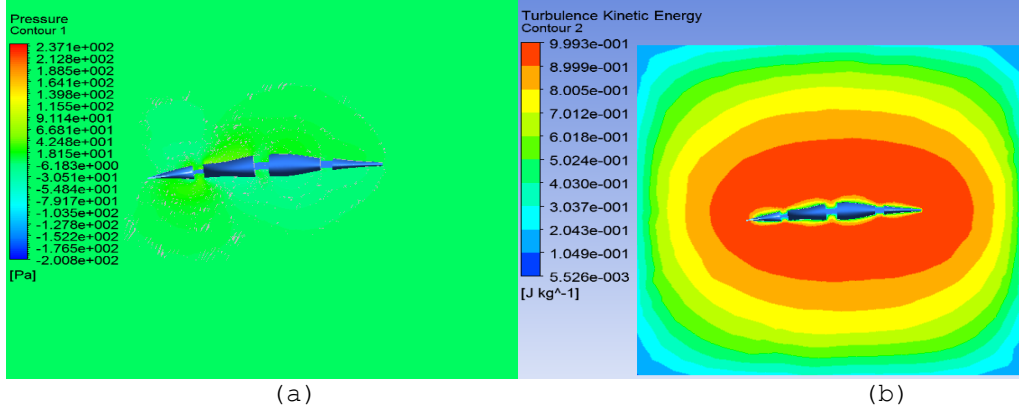
küçüktür. Bunun nedeni robot balığın birinci eklemının çevresinde oluşan basıncı yenebilmesinden dolayı robot balığın kuyruğunun daha az basınca maruz kalmasıdır. Buda robot balığın ilk eklemının sonraki eklemlerine etki edecek basıncı azalttığı ve robot balığın kuyruğunun daha iyi hareket etmesini sağladığını göstermektedir. Şekil 3.c, 4.c ve 5.c'deki kayma gerilmesi değerlerine bakıldığında girintili kuyruk modeline sahip robot balığın daha düşük bir kayma gerilmesi değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu da robot balığın üzerine teğetsel olarak etki eden kuvvetin az olduğunu belirtmektedir. Robot balık modelleri düz yüzüş hareketini gerçekleştirirken akışkan etrafında düzensiz bir akış oluşturduğu görülmektedir ve bu düzensiz akışa türbülans akış denilmektedir.

Şekil 3.d, 4.d ve 5.d'de gösterilen türbülans kinetik enerji değerleri, havuzda oluşan türbülans akıştaki birim kütle başına düşen ortalama kinetik enerji değerini vermektedir. Kinetik enerji değeri ise hızın karesi ile doğru orantılı olduğu için düşük hız değerine sahip olan girintili kuyruk yapısında daha düşük değerde türbülanslı kinetik enerji değeri görülmektedir. Structure modülünde ise, su içerisinde robot balığın kuyruğunun bir periyotluk hareketini gerçekleştirilmesi için gerekli olan açı değerlerinin robot balığın eklem noktalarına 0.8 saniye boyunca uygulanmasıyla robotun düz yüzüş hareketi sağlanmıştır. Bundan dolayı kuyruğunun maksimum açığa ulaştığı an 0.3 sn'deki an olduğu için 0.3 sn' deki analiz sonuçları verilmiştir. Sağlanan bu hareket sonucunda sırasıyla kare kuyruğa, girintili kuyruğa ve yarım ay kuyruğa sahip robot balığın suda 0.3 saniyede oluşturduğu basınç ve türbülans kinetik enerji kontur eğrileri Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir.



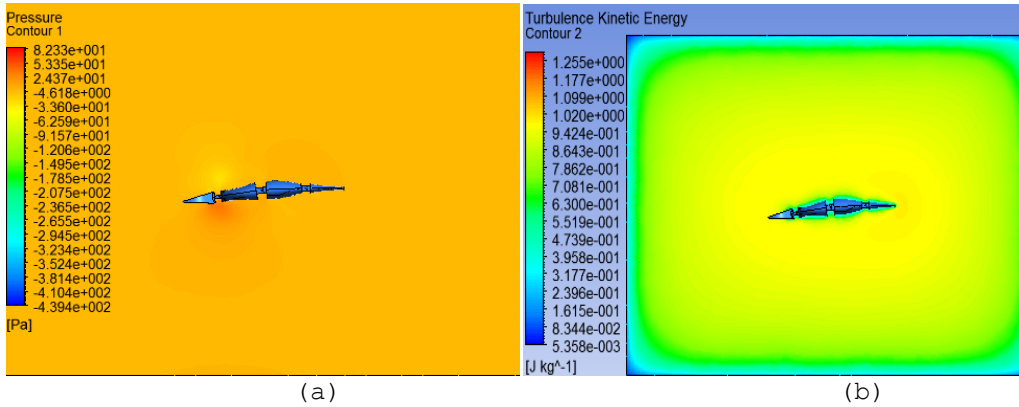
Şekil 6. Kare kuyruk modeline sahip robot balığın 0.3'üncü saniyedeki
a) Basınç kontur eğrileri b) Türbülans kinetik enerji
(Figure 6. a) Pressure contour curves b) Turbulence kinetic energy in
0.3rd seconds of the robotic fish with square tail model)

Kare kuyruk modelli robot balığa hareket verilmesi durumunda robot balığın suda oluşturduğu basınç değerinin ve robot balığın suda oluşturduğu kinetik enerji değerinin yaklaşık olarak sırasıyla $5.265e^1$ Pa ve $6.062e^{-3}$ J/kg olduğu Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 7. Girintili kuyruk modeline sahip robot balığın 0.3'üncü saniyedeki a) Basınç kontur eğrileri b) Türbilans kinetik enerji (Figure 7. a) Pressure contour curves b) Turbulence kinetic energy in 0.3rd seconds of the robotic fish with indented tail model)

Girintili kuyruk modellenli robot balığa hareket verilmesi durumunda robot balığın suda oluşturduğu basınç değerinin ve robot balığın suda oluşturduğu kinetik enerji değerinin yaklaşık olarak sırasıyla $4.248e^1$ Pa ve $4.030e^{-1}$ J/kg olduğu Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 8. Yarımay kuyruk modeline sahip robot balığın 0.3'üncü saniyedeki basınç ve türbülans kinetik enerji (Figure 8. a) Pressure contour curves b) Turbulence kinetic energy in 0.3rd seconds of the robotic fish with lunate tail model)

Yarımay kuyruk modellenli robot balığa hareket verilmesi durumunda robot balığın suda oluşturduğu basınç değerinin ve robot balığın suda oluşturduğu türbülans kinetik enerji değerinin yaklaşık olarak sırasıyla $5.33e^1$ Pa ve $5.19e^{-1}$ J/kg olduğu Şekil 8'de görülmektedir. Şekil 6.a, 7.a ve 8.a'deki basınç kontür eğrilerine bakıldığında kuyruğun hareket ettirilmesi nedeniyle kuyruk etrafında basınç farkları oluşmaktadır. Bu basınç farkı robot balığın kuyruğunun çarpınma hareketinden kaynaklanmaktadır. Şekil 6.b, 7.b ve 8.b'deki türbülans kinetik enerjilerine bakıldığında robot balığın en düşük değeri girintili kuyruk yapısında gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu değerler incelendiğinde su ortamında düz yüzüş hareketi yapan robot balıklar arasında en az basınç değerini girintili kuyruğa sahip robot balık oluşturduğu için en uygun kuyruk yapısının girintili kuyruk yapısı olduğu belirlenmiştir.

5. GENEL SONUÇLAR (GENERAL CONCLUSIONS)

Bu çalışmada farklı kuyruk yapılarına sahip Carangiform bir robot balığın FSI analizi gerçekleştirilmiş ve bu analizler sonucunda elde edilen verilere dayanarak girintili kuyruk şeklinin robot balık için daha uygun olduğu görülmüştür. Kare ve yarım ay kuyruk şekillerine sahip robot balığın FSI analizi sonucunda hız kontur eğrilerinde doğrusal olmayan şekiller saptanmıştır. Bu şekillerden elde edilen sonuçlar basınç kontur eğrileri ve türbülans kinetik enerji ile birleştirildiğinde sistemin suya karşı uyguladığı direnç ile girintili kuyruğa ait olan basınç şekillerinin yorumlanmasıyla elde edilen direnç karşılaştırıldığında girintili kuyruk modelinin sistem için en uygun kuyruk olduğu saptanmıştır.

Robot balığın havuzun merkezine yerleştirilip akışkana hız verilmesi durumunda, robot balıklardaki basınç kontur eğrileri incelendiğinde sırasıyla kare kuyruğa, girintili kuyruğa ve yarım ay kuyruğa sahip robot balığın suda oluşturduğu basınç değerleri yaklaşık olarak $3.44 \cdot 10$ Pa, 1.934 Pa ve 2.003 Pa'dır. Robot balığın düz yüzüş hareketini gerçekleştirmesi ve akışkana hız verilmemesi durumunda, robot balıklardaki basınç kontur eğrileri incelendiğinde sırasıyla kare kuyruğa, girintili kuyruğa ve yarım ay kuyruğa sahip robot balığın suda oluşturduğu basınç değerleri yaklaşık olarak $5.265 \cdot 10$ Pa, $4.248 \cdot 10$ Pa ve $4.468 \cdot 10$ Pa'dır. Bu iki durum için, kuyrukların suya uyguladığı direnç değerine bakıldığında sistem için en uygun kuyruk yapısının suda en düşük basınç değeri oluşturan girintili kuyruk yapısı olduğu görülmektedir. Gelecek çalışmalarda düz yüzüş hareketiyle yapılan analizlerin robot balığın dönüş hareketi için gerçekleştirilmesi düşünülmektedir. Ayrıca 3. boyut hareketinde (derinlik) balık yüzeylerine etki eden basıncın tayin edilmesi balıkla haberleşme ve derine inildikçe su sızdırmazlığının sağlanması açısından önemli olduğundan 3 boyutlu analizlerin gerçekleştirilmesi de hedefler arasındadır.

NOT (NOTE)

Bu çalışma, 1-4 Eylül 2016 tarihleri arasında İstanbul-Büyükdada'da yapılan International Science Symposium (ISS2016)'da sözlü bildiri olarak sunulduktan sonra genişletilmiş ve yeniden yapılandırılmıştır.

AÇIKLAMA (EXPLANATION)

Bu çalışma 114E652 No'lu TÜBİTAK 1001 projesi ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Özbilgin, H., Kınacıgil, H.T. ve Özbilgin, Y.D., (2004). Balıklarda Yüzme Davranışı ve Trol Operasyonu Açısından Önemi, E.Ü. Su Ürünleri Dergisi, 21, 3-4, 355-359.
2. Korkmaz, D., (2011). Uzaktan Kontrollü Bir Robot Balığın Tasarımı ve Gerçeklemesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
3. Mohammadshahi, D., Yousefi, K.A., Bahmanyar, S., and Maleki, H., (2008). Design, Fabrication and Hydrodynamic Analysis of a Biomimetic Robot Fish, International Journal Of Mechanics, 4, 2, 59-66.
4. Park, Y.J., Jeong, U., Lee, J., Kim, H.Y., Cho, and K.J., (2010). The Effect of Compliant Joint and Caudal Fin in Thrust Generation for Robotic Fish, Biomedical Robotics and Biomechatronics, Tokyo, 528-533.
5. Heo, S., Wiguna, T., Park, H.C., and Goo, N.S., (2007). Effect of an Artificial Caudal Fin on the Performance of a Biomimetic



-
- Fish Robot Propelled by Piezoelectric Actuators, *Journal of Bionic Engineering*, 4, 151-158.
6. Anton, M. and Listak, M., (2011). Hydrodynamic Optimization a Relative Link Lengths for a Biomimetic Robotic Fish, 15th International Conference on Advanced Robotics, Tallinn, 530-535.
 7. Ziyu, R., Tianmiao, W., and Li, W., (2015). Hydrodynamic Function of a Robotic Fish Caudal Fin: Effect of Kinematics and Flow Speed, *Intelligent Robots and System*, Hamburg, 3882-3887.
 8. Taverna, L., Chellali, R., and Rossi, L., (2010). 3D Simulation of Robotic Fish Interactions with Physic-Based Underwater Environment, *OCEANS 2010 IEEE*, Sydney, 1-4.
 9. Guan, Z., Gao, W., Gu, N., and Nahavandi, S., (2010). 3D Hydrodynamic Analysis of a Biomimetic Robot Fish, 11th International Conference, Singapore, 793-798.
 10. Guan, Z., (2012). 3D Locomotion Biomimetic Robot Fish with Haptic Feedback, *Doktora Tezi*, Deakin University, Avustralya, 181.
 11. Lee, J.E, Park, H.C., Choi H. S., Kyung, J., Yun, D., Jeong, S., and Ryu, Y., (2013). Numerical Simulation for Biomimetic Robot Fish, 13th International Conference, Gwangju, 890-893.
 12. Park, H.C., Lee, J H., Choi, H.S., Kyung, J., Yun, D., Jeong, S., and Ryu, Y., (2013). Application of FSI (Fluid Structure Interaction) to Biomimetic Robot Fish, *Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*, Jeju, 439-441.