



## طراحی و ساخت یک ربات ماهی با دم انعطاف پذیر و کنترل حرکت آن با کنترلر فازی

علی سلک غفاری<sup>1\*</sup>، کسری دریانی تبریزی<sup>2</sup>، سعید حسینی<sup>2</sup>، علی مقداری<sup>3</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف پردیس بین الملل، کیش  
2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف پردیس بین الملل، کیش  
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران  
\* کیش، کدپستی 79417-76655، a\_selkghafari@sharif.edu

### چکیده

در این مقاله طراحی، ساخت و کنترل یک ربات ماهی با دم انعطاف پذیر ارائه شده است. در ابتدا تاریخچه ای از ربات ماهی ها، الگوریتم های کنترلی مورد استفاده و پژوهش های صورت گرفته در این حوزه مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، مکانیزم حرکتی ربات پیشنهادی ارائه شده و طراحی بخش های مکانیکی و الکتریکی آن به تفصیل مورد بررسی قرار می گیرد. در طراحی ربات پیشنهادی، ابعاد و ساختار آن از یک ماهی قزل آلائی رنگین کمان الگوبرداری شده است. سازه ربات ماهی موردنظر از دو قسمت مشتمل بر بدن و دم انعطاف پذیر تشکیل شده است. برای ایجاد حرکت نوسانی دم از یک سروموتور بهره گرفته شده که در آن حرکت نوسانی با مدولاسیون پهنای پالس کنترل می گردد. بخش الکتریکی ربات شامل برد الکتریکی، مدارهای الکترونیکی و میکرو کنترلر روی یک شاسی آلومینیومی نصب گردیده و پس از قرار گرفتن در محفظه موردنظر آب بندی گردید. دم انعطاف پذیر به انتهای محفظه آب بندی شده متصل و انتقال نیروی عملگر الکتریکی به آن توسط پولی و کابل سیمی کششی صورت گرفت. با عنایت به اینکه سیستم دینامیکی موردنظر غیرخطی است از یک کنترلر فازی برای کنترل حرکت ربات ماهی جهت رسیدن به هدف بهره گرفته شد. حرکت ربات ماهی در فرایند حلقه بسته توسط نرم افزار متلب شبیه سازی گردید و عملکرد آن به صورت تجربی در یک محیط محدود مورد آزمایش قرار گرفت، عملکرد قابل قبول این ربات در کنار سادگی طراحی آن از ویژگی های بارز سیستم پیشنهادی است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 18 خرداد 1395  
پذیرش: 06 مرداد 1395  
ارائه در سایت: 03 مهر 1395  
کلید واژگان:  
ربات ماهی  
کنترلر فازی  
دم انعطاف پذیر

## Design and fabrication of a robotic fish with flexible tail and the control of its movement using Fuzzy Logic Controller

Ali Selk Ghafari<sup>1\*</sup>, Kasra Daryani Tabrizi<sup>2</sup>, Saeid Hosseini<sup>2</sup>, Ali Meghdari<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, School of Science and Engineering, Sharif University of Technology International Campus, Kish Island, Iran.  
2- M.Sc. graduate, School of Science and Engineering, Sharif University of Technology International Campus, Kish Island, Iran.  
3- Professor, School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran  
\* P.C. 79417-76655 Kish, Iran, a\_selkghafari@sharif.edu

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 07 June 2016  
Accepted 27 July 2016  
Available Online 24 September 2016

Keywords:  
Robotic Fish  
Fuzzy Logic Controller  
Flexible Tail

### ABSTRACT

In this paper design, fabrication and control of a robotic fish with flexible tail was presented. First, the short introduction of the robotic fish and its common control algorithms were reviewed. In the next step, the proposed mechanism of the robotic fish and its design procedure of the mechanical and electrical subsystems were explained. Mimic of the proposed robot was inspired from the Rainbow trout. The mechanical structure of the robotic fish consists of a body and a flexible tail. Oscillatory actuation of the tail was carried out utilizing a servomotor which was manipulated by pulse width modulation signal. The electrical subsystem of the proposed robot containing the electrical boards, electronic circuits, and a microcontroller are installed on the Aluminum platform which is located in a sealed case. The flexible tail is attached to the end-side of the sealed case, and the actuating force is transferred to the tail utilizing pulley and cable mechanism. Since the dynamics of the system under investigation is nonlinear, a fuzzy logic controller is proposed to control the movement of the robot for goal seeking purpose. The closed loop simulation of the system was carried using MATLAB software. In addition, experimental investigation of the robotic fish was performed in the laboratory.

وجود دارد به عنوان مثال در مدل سازی و کنترل چنین ربات هایی استفاده از معادلات دینامیکی پیچیده هیدرودینامیکی الزامی است. این نوع ربات ها می توانند برای اهداف تحقیقاتی مختلفی مانند بررسی عوامل محیط زیستی دریایی، بازیابی، پایش و تعمیرات تأسیسات زیر آب مورد

### 1- مقدمه

در سال های اخیر تحقیقات زیادی در خصوص طراحی، ساخت و کنترل ربات های متحرک با قابلیت حرکت در آب یا زیر آب ارائه شده است. مسایل متنوعی در طراحی و ساخت ربات های زیر دریایی نظیر ربات ماهی

Please cite this article using:

A. Selk Ghafari, K. Daryani Tabrizi, S. Hosseini, A. Meghdari, Design and fabrication of a robotic fish with flexible tail and the control of its movement using Fuzzy Logic Controller, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 339-346, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

استفاده قرار گیرند [2,1]. علاوه بر این بدلیل تشابه شکل ظاهری و رفتار دینامیکی این نوع ربات‌ها استفاده از آن‌ها برای بررسی شرایط زیست محیطی گونه‌های مختلف آبیان مناسب می‌باشد.

حرکت گونه‌های مختلف ماهی‌ها بکمک باله‌ها، حرکت بدن و دم صورت می‌گیرد. نوع حرکت شنای ماهی براساس دامنه و طول موج حرکتی آن به چهار دسته انگولیفرم<sup>1</sup>، سابکارنجیفرم<sup>2</sup>، کارنجیفرم<sup>3</sup>، تانیفرم<sup>4</sup> تقسیم می‌شود. در اغلب مقالات ارائه شده در زمینه مدل‌سازی ربات‌های ماهی از مدل‌های انگولیفرم و کارنجیفرم استفاده شده است.

در حرکت انگولیفرم نظیر مارماهی‌ها تمامی بدن ماهی در یک نوسان موج مانند با دامنه زیاد مدل می‌شود درحالی‌که در حرکت کارنجیفرم نوسان ایجاد شده توسط ماهی بر کل بدن تاثیر می‌گذارد، لذا بیشترین دامنه نوسانی در یک سوم انتهایی بدن ماهی بوجود آمده و دامنه حرکت نوسانی در بخش شکمی ماهی بسیار کم و یا نزدیک به صفر است. در مجموع ماهی‌های با حرکت کارنجیفرم دارای سرعت شنای سریع‌تری نسبت به سایر ماهی‌ها می‌باشند درحالی‌که از قدرت مانور کمتری برخوردارند. استفاده از این نوع مدل در طراحی و ساخت ربات‌های ماهی بسیار مرسوم است. در سیستم‌های یاد شده از مدل‌های هیدرودینامیکی اولیه [3] که بر پایه نظریه حالت پایدار جریان استوار است نظیر روش "گوسی پایدار"<sup>5</sup> استفاده شده است. در [4] مدل واقعی‌تری ارائه شده است که بر پایه نظریه صفحه موج استوار بوده و در آن ماهی به صورت یک صفحه کشسان مدل‌سازی می‌شود. در مطالعات بعدی [5,6] با ارائه یک مکانیزم جدید دامنه حرکتی ربات ماهی افزایش یافته و مدل کارنجیفرم بهبود یافته است. مدل‌های ارائه شده در [7,8] مکمل خطی و غیرخطی نظریه صفحه موج بوده و امکان تحلیل شنا کردن ماهی با شتاب زیاد یا با سرعت ثابت را فراهم می‌نماید.

در حال حاضر سیستم‌های مصنوعی زیادی برای تحقیق در زمینه نحوه حرکت کردن ماهی‌ها توسعه یافتند. به خصوص ساختاری مانند یک ورقه نازک که به شکل سینوسی حرکت می‌کند به عنوان جایگزین پروانه‌های دو پره‌ای کلاسیک پیشنهاد شده است [6,9,10]. در [9,11] برای بهبود عملکرد مکانیزم دم در ربات ماهی از مکانیزم هشت قطعه‌ای با دم ورقه‌ای شکل استفاده شده است. در مکانیزم مذکور امکان اندازه‌گیری دقیق‌تری از نیروهای وارد بر بدن ماهی نسبت به سایر مدل‌های ارائه شده وجود دارد. در [12] از یک مکانیزم فنری برای هماهنگ‌سازی حرکت رفت و برگشتی دم و بدن با یک منبع تحریک استفاده شده است. در [13]، مدل دینامیکی ارائه شده دارای باله‌های جانبی انعطاف‌پذیر بوده و در آن از قطعات ثابت با فنر و دمیر استفاده شده است. در تحقیق مذکور، معادلات هیدرودینامیکی برای هر قسمت با استفاده از نظریه المان تیغه‌ای محاسبه می‌گردد. مدل دینامیکی ارائه شده بصورت تجربی مورد تایید قرار گرفته است. در [14] یک ربات ماهی با باله‌هایی شبیه بال پرنده پیشنهاد شده است که در آن ربات از چند قطعه صلب ساخته می‌شود. نیروهای حاصل از جریان گردابی همراه با فشار جانبی و همچنین نیروی مکش در لبه‌های باله‌ها باعث حرکت این ربات می‌شوند. مکانیزم کنترلی مورد استفاده برای این ماهی تولید الگوی مرکزی است. در [15] ربات ارائه شده از دو بخش

بدن و دم انعطاف‌پذیر تشکیل شده است که ارتعاش دم نیروی لازم برای شنای ربات را فراهم می‌سازد. برای طراحی بدن این ماهی از معادلات کیرشیف و دم از معادلات نظریه اویلر-برنولی استفاده شده است. سیستم کنترل مورد استفاده برای کنترل حرکت کنترلر "پی‌ای دی" می‌باشد. در [16] رباتی متشکل از سه قسمت که توسط یک کنترلر تطبیقی فازی پی‌ای دی، کنترل می‌شود. نتایج تجربی حرکت این ربات بیانگر کنترل بسیار خوب ربات و سرعت روبه جلوی قابل قبول آن می‌باشد.

در سال‌های اخیر، ربات ماهی با دم انعطاف‌پذیر یکی از محورهای تحقیق در زمینه وسایل متحرک زیر آب بوده است، در [17] یک ربات ماهی با بدن انعطاف‌پذیر ساخته شده که دمیده شدن هوا از بین پره‌های تعبیه شده در دم آن باعث حرکت سینوسی می‌شود؛ در [18] از نیروی الکترومغناطیسی (جذب و دفع) برای ایجاد حرکت در دم ماهی از جنس یک ورقه نازک استفاده شده است و در [19] از نیروی هیدرولیکی برای ایجاد حرکت در یک ربات ماهی با بدن انعطاف‌پذیر استفاده است. در تمام این مدل‌ها، از مکانیزم‌های بسیار پیچیده برای ساخت و کنترل استفاده شده است، با وجود این‌که برخی از ربات‌های ارائه شده دارای قدرت مانور خوب و سرعت حرکت بالایی هستند، در آن‌ها از مکانیزم‌های بسیار پیچیده استفاده شده است که امکان ارائه مدل دینامیکی مناسب جهت طراحی و پیاده‌سازی کنترلرهای مختلف بسادگی فراهم نمی‌گردد. در این مقاله طراحی، ساخت و کنترل یک ربات ماهی با استفاده از یک مکانیزم انعطاف‌پذیر، قدرت مانوردهی بالا و با دقت زیاد ارائه شده است. همانطور که در قسمت پایانی مقاله به آن اشاره خواهد شد، در مقایسه با نمونه‌های ذکر شده اخیر، با صرف هزینه ساخت نسبتاً پائینی انجام گرفته و مکانیزم پیشنهادی برای تحریک دم و کنترل آن از سادگی بسیار بالایی برخوردار است.

## 2- طراحی ربات ماهی

برای طراحی ربات از ماهی قزل‌آلای رنگین کمان ایده گرفته شده است. ابعاد و اندازه‌های هندسی و نیز شکل دم ربات مشابه یک ماهی قزل‌آلا به طول بیست سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. برای ایجاد نیروی مورد نیاز در حرکت جانبی دم از عملگر الکتریکی و کابل سیمی کششی استفاده شده است. محل اتصال سیم کششی به بدنه ربات یک بازوی ده سانتی‌متری است که در مرز دم و بازو به فاصله ده سانتی‌متری از ابتدای دم قرار گرفته است.

### 2-1- طراحی بخش مکانیکی ربات ماهی

طراحی مکانیکی ربات ماهی از سه بخش اصلی شامل دم انعطاف‌پذیر، دیسک تفلونی و صفحه آلومینیومی می‌باشد. دم انعطاف‌پذیر از طریق گیره‌های فلزی به یک طرف دیسک تفلنی و صفحه آلومینیومی به طرف دیگر دیسک از طریق اتصال پیچی متصل شده است. علاوه بر این محل اتصال سروموتور، بردهای کنترلی و منبع تغذیه جریان مستقیم نیز روی صفحه آلومینیومی نصب شده‌اند.

### 2-2- مکانیزم حرکت دم ربات ماهی

در شنای ربات ماهی حرکت دم به طرفین از طریق یک ساختار مکانیکی قرقره و نخ ایجاد می‌گردد بدین شکل که یک قرقره به بر روی سر سرو موتور نصب شده و یک نخ با مقاومت بالا (نخ ماهی‌گیری) بدور قرقره ثابت

<sup>1</sup> Anguilliform

<sup>2</sup> Subcarangiform

<sup>3</sup> Carangiform

<sup>4</sup> Thunniform

<sup>5</sup> quasistatic

### 3- ساخت نمونه اولیه ربات ماهی

انتخاب جنس مناسب برای دم ربات ماهی به گونه ای باید صورت گیرد که دم نه تنها دارای انعطاف‌پذیری کافی برای تامین قدرت لازم جهت راندن آب را داشته باشد بلکه بتواند با نیروی کم اعمال شده توسط سروموتور به آن خمش لازم را نیز به وجود آورد. برای این منظور از ورق پلی اتیلن با چگالی بالا به ضخامت یک میلی‌متر استفاده شد. شکل ظاهری آن نیز به گونه‌ای طراحی گردید که حتی‌الامکان الگوی مشابه با دم واقعی در ماهی بر روی آن برش داده شود. سپس با گیره‌های فلزی مناسب و تعبیه آن روی دم، سیم‌های متصل به پولی مستقر بر روی سروموتور از طریق این گیره ها تثبیت گردید. نحوه اتصال کابل‌های انتقال قدرت به دم در "شکل 3" نشان داده شده است.

با تغییر پهنای پالس تولیدی توسط میکروکنترلر و تنظیم زمان ارسال سیگنال، دامنه حرکتی چپ گرد و راست گرد سروموتور و فرکانس آن تغییر می‌یابد که از این طریق می‌توان مانور لازم برای ربات ماهی را ایجاد نمود. دم ماهی بوسیله گیره‌های فلزی بر روی یک صفحه دایره‌ای از جنس تفلون به ضخامت دو سانتی‌متر و قطر یازده سانتی‌متر توسط اتصال پیچی تثبیت گردید. تجهیزات الکتریکی و کنترلی شامل سروموتور، باتری‌ها و بردهای کنترلی روی صفحه آلومینیومی نصب گردید. برای مجموعه از یک محفظه پلاستیکی مخروطی شکل به طول 31 سانتی‌متر استفاده شد. آرایش قطعات داخلی و تجهیزات کنترلی ربات ماهی در "شکل 4" نشان داده شده است.

برای اطمینان از سازگاری کامل ابعاد و قطعات الکتریکی و مکانیکی، مدل سه‌بعدی ربات ماهی در محیط مجازی توسط نرم‌افزار سالیدورکس طراحی و ساخته شد. مدل موردنظر با ابعاد واقعی در "شکل 5" نشان داده شده است. همچنین مدل اولیه ساخته شده از ربات در "شکل 6" نشان داده شده است.

### 4- طراحی کنترلر فازی

نتایج تحقیقات آزمایشگاهی و تئوریک بیانگر این واقعیت است که برای کنترل حرکت سیستم‌هایی که دارای دینامیک حرکتی پیچیده یا غیرخطی می‌باشند استفاده از کنترلرهای تطبیقی فازی ابزار قدرتمندی خواهد بود [20-23]. علاوه بر این استفاده از این نوع کنترلرها می‌تواند

جدول 1 جدول بیت‌های انتخاب کلاک در میکرو کنترلر

Table 1 Clock selection bit description in the microcontroller

توضیح	CS10	CS11	CS12
حالت توقف شمارنده/کلاک	0	0	0
بدون اندازه گیری از پیش ( clk/O/1 ) (تعیین شده)	1	0	0
( از کانتر دیجیتال ) clk/O/8	0	1	0
( از کانتر دیجیتال ) clk/O/64	1	1	0
( از کانتر دیجیتال ) clk/O/256	0	0	1
( از کانتر دیجیتال ) clk/O/1024	1	0	1
کلاک خارجی بر روی پین T1. کلاک بر روی لبه پایین رونده	0	1	1
کلاک خارجی بر روی پین T1. کلاک بر روی لبه بالا رونده	1	1	1

شده است و دو سر دیگر از آن به گیره‌های نصب شده در دو طرف بخش دوم از دم ربات ماهی محکم گردیده است (شکل 1) و با تنظیم حرکت چرخشی سرو موتور به چپ و راست دم ربات ماهی به چپ و راست کشیده می‌شود.

### 3-2- طراحی بخش الکترونیکی ربات ماهی

کنترل حرکت ربات با استفاده از کنترلر سرعت و زاویه چرخش سروموتور امکان‌پذیر است. برای این منظور از کنترلر سرعت با سیگنال مدولاسیون پهنای پالس<sup>6</sup> و فرکانس 50 هرتز استفاده می‌شود که پهنای پالس سیگنال کنترلی تعیین‌کننده موقعیت زاویه‌ای سروموتور می‌باشد (شکل "2").

برای تولید سیگنال کنترلی از میکرو کنترلر ATMEGA32 با تایمر 1 استفاده شد. تایمر ابتدا از صفر بصورت افزایشی تا مقدار تعیین شده و سپس به صورت کاهشی تا صفر شمارش را انجام می‌دهد. برای این منظور سرعت کلاک سیستم و سرعت کلاک تایمر دو پارامتر تعیین‌کننده می‌باشند. سرعت کلاک تایمر با تقسیم سرعت کلاک سیستم به مقسم بدست می‌آید. مقسم‌ها از طریق بیت‌های CS10, CS11, CS12 مربوط به رجیستری TCCR1B طبق جدول 1 تنظیم می‌شوند.

CLKI/O کلاک سیستم می‌باشد که در این طراحی 16 مگا هرتز مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به مقدار مقسم، تایمر 1 می‌تواند یکی از مقادیر 15.625، 62.5 یا 250 کیلوهرتز یا 2 یا 16 مگاهرتز را داشته باشد. برای محاسبه فرکانس این میکروکنترلر می‌توان از فرمول زیر که در در برگه مشخصات آن داده شده است بهره گرفت:

$$f_{oc_n} = \frac{f_{clk\_I/O}}{2 \cdot N\_TOP} \quad (1)$$

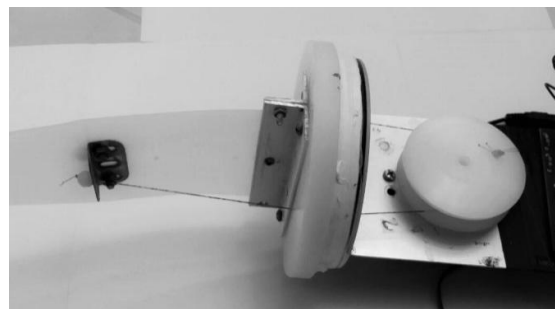


Fig. 1 The Mechanism of robotic fish actuation and mechanical parts assembly

شکل 1 مکانیزم حرکتی ربات ماهی و اتصال قطعات مکانیکی

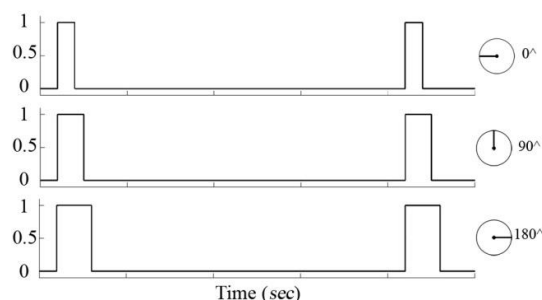


Fig. 2 Servo motor control pulses in different angles

شکل 2 پالس‌های کنترل‌کننده سروموتور در زوایای مختلف دورانی

<sup>6</sup> Pulse width modulation

مقاومت سیستم در برابر تغییرات شرایط محیطی را نیز افزایش دهد. در [24]، یک الگوریتم جدید فازی برای هدایت ربات های متحرک در یک محیط محدود معرفی شده است. در سیستم مذکور شناسایی عوامل محیطی در ربات توسط اطلاعات دریافتی از سنسورها صورت گرفته و دنبال کردن هدف یا ممانعت از برخورد آن با مانع توسط الگوریتم کنترلی صورت می‌گیرد. کنترلرهای فازی در کنترل حرکت ربات‌های متحرک و نیز انجام مانورهای خاص درارای بازدهی و عملکرد قابل قبولی می‌باشند. معمولا برای طراحی یک کنترلر کارآمد یکی از روش‌های مناسب تجزیه رفتارهای پیچیده سیستم به چند حرکت در محدوده حرکتی ربات است. پس از طراحی الگوریتم کنترلی مناسب برای هربخش اقدامات متناظر آنها را می‌توان با هم ترکیب نمود.

در این مقاله کنترلر فازی به گونه‌ای طراحی می‌شود که بتواند با تعیین مسیر مناسب حرکتی بسمت یک هدف معین حرکت نماید.

این کنترلر براساس قوانین اگر-آنگاه به فرم ذیل طراحی می‌گردد:

$$\begin{aligned} \text{اگر } u_1 \text{ هست } A_1 \text{ و } u_2 \text{ هست } A_2 \text{ و } \dots \text{ و } u_n \text{ هست } A_n \\ \text{آنگاه } y_1 \text{ هست } B_1 \text{ و } y_2 \text{ هست } B_2 \text{ و } \dots \text{ و } y_m \text{ هست } B_m \end{aligned} \quad (2)$$

با در نظر گرفتن ورودی های A و B که در فضای مشابهی تعریف می‌شوند، اپراتورهای "و" و "یا"<sup>7</sup> بصورت ذیل تعریف می‌شوند:

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A(u), \mu_B(u)) \quad (3)$$

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A(u), \mu_B(u)) \quad (4)$$

"شکل 7" ساختار یک کنترلر فازی را نشان می‌دهد. در کنترلر پیشنهادی از مدل موتور منطق فازی تاکاگی-سوگنو همراه با روش فازی زدایی مرکز ثقل استفاده شد. موتور منطق فازی را می‌توان به‌صورت ذیل بیان نمود:

Input:  $u_1$  - crisp numerical value.

Output:  $y_1$  - crisp numerical value.

BEGIN:

Step 1. Fuzzification of the input  $u_1$ .

Step 2. Application of the fuzzy operators (AND or OR) in the antecedent of the rules according to (3) and (4).

Step 3. Implication from the antecedent to the consequent using of the AND operation according to (3).

Step 4. Aggregation of the consequents across the rules using the OR operation according to (4).

Step 5. Defuzzification to output variable  $y_1$ .

END

در این موتور، ورودی و خروجی به صورت عدد حقیقی بیان می‌شود. در مرحله اول موتور فازی پس از دریافت ورودی فرایند فازی‌سازی را انجام می‌دهد. سپس براساس رابطه (3) و استلزام ممدانی با استفاده از عملگر AND فازی توابع عضویت ترکیب میگردد. در مرحله بعد، مقادیر توابع

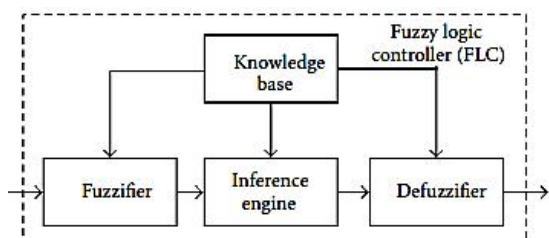


Fig. 7 Architecture of a basic fuzzy logic controller

شکل 7 ساختار یک کنترلر فازی

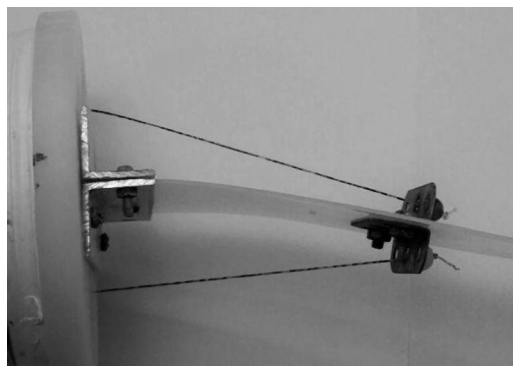


Fig. 3 Attachment of the clamp to the tail in the prototype model

شکل 3 نحوه اتصال کابل‌ها به دم ربات ماهی در نمونه ساخته شده

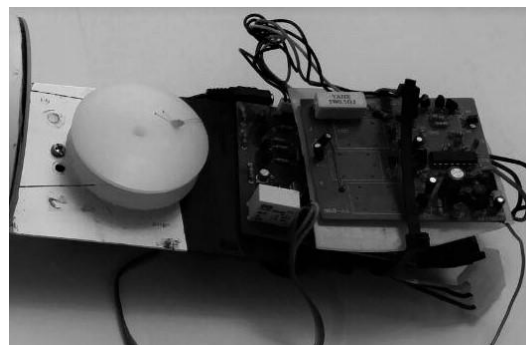


Fig. 4 Installation of electrical and control equipment on the fish robot prototype

شکل 4 آرایش قطعات داخلی و تجهیزات کنترلی ربات ماهی



Fig. 5 3D virtual model of the robotic fish in Solidworks

شکل 5 مدل سه بعدی ربات ماهی در محیط مجازی سالیدورکس



Fig. 6 Prototype model of the robotic fish in experimental environment

شکل 6 مدل واقعی ربات ماهی ساخته شده در محیط آزمایشگاهی

<sup>7</sup> AND / OR

180 درجه تعیین شده است. لازم بذکر است که مقادیر مثبت و منفی در توابع عضویت مذکور به معنای گردش ربات به چپ و راست می‌باشد.

در الگوریتم کنترلی پیشنهادی زاویه دم ماهی به عنوان متغییر کنترلی حرکت ربات در نظر گرفته شده است. تغییر زاویه دم ربات توسط هفت متغییر {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB} که به ترتیب از چپ به راست بیانگر (منفی بزرگ، منفی متوسط، منفی کوچک صفر، مثبت کوچک، مثبت متوسط و مثبت بزرگ) می‌باشد تعریف و در "شکل 11" نشان داده شده است. دامنه این تابع از 25- تا 25+ درجه تعیین شده است. مجموعه قوانین فازی برای رسیدن به هدف با کمترین مسافت طراحی و در جدول 2 نشان داده شده است. در مدل‌سازی دینامیکی پیشنهادی برای ربات ماهی، بدن ماهی به عنوان یک جسم صلب در نظر گرفته شده و برای دم از پنج المان انعطاف‌پذیر استفاده شده است.

لازم به ذکر است که مشخصه‌های این المان‌ها به صورت دقیق از مدل ساخته شده، توسط نرم‌افزار سالدورک و بر مبنای جنس و مشخصات فنی دم ربات ماهی، استخراج شده اند.

مدل ربات ماهی در سیمولینک متلب ساخته شده و پس از پیاده سازی الگوریتم کنترلی توسط جعبه ابزار فازی، سیستم حلقه بسته در "شکل 10" نشان داده شده است. الگوریتم پیشنهادی پس از دریافت مختصات نهایی هدف و مقایسه با مختصات استقرار کنونی ربات، پارامترهای کنترلی شامل زاویه دم زدن را بگونه ای تغییر می‌دهد که کوتاه ترین مسیر را برای رسیدن به هدف انتخاب نماید.

#### 6- نتایج شبیه سازی و تجزی

نتایج تجربی حرکت ربات ماهی در فرایند شنای آزاد در "شکل 12" نشان داده شده است. در این آزمایش، دامنه و فرکانس حرکت دم به گونه‌ای تنظیم شده است که ربات ماهی بتواند حرکت دایره‌ای شکل داشته باشد.

سیستم حلقه بسته در حضور کنترلر فازی برای دو حالت مختلف شبیه سازی گردید و نتایج حاصل در "شکل‌های 13 تا 16" نشان داده شده است.

در حالت اول نقطه شروع حرکت و نقطه هدف مطابق مختصات زیر تعیین گردید:

$$(x_0, y_0, \theta_0) = (0, 0, 0) \quad (11)$$

$$(x_r, y_r) = (5, 5) \quad (12)$$

نتایج حاصل از شبیه سازی حرکت برای این حالت در "شکل‌های 13 و 14" نشان داده شده است. "شکل 13" نمودار تغییرات موقعیت ربات ماهی در راستای افقی و عمودی (x, y) و "شکل 14" مسیر طی شده توسط ربات در صفحه را نشان می‌دهد.

در حالت دوم نقطه شروع حرکت و نقطه هدف مطابق مختصات زیر تعیین گردید:

$$(x_0, y_0, \theta_0) = (0, 0, -90) \quad (13)$$

$$(x_r, y_r) = (-6, 3) \quad (14)$$

نتایج حاصل از شبیه‌سازی حرکت برای این حالت در "شکل‌های 15 و 16" نشان داده شده است. "شکل 15" نمودار تغییرات موقعیت ربات ماهی در راستای افقی و عمودی (x, y) و "شکل 16" مسیر طی شده توسط ربات در صفحه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است ربات ماهی به ترتیب در بازه زمانی 50 و 60 ثانیه به هدف موردنظر می‌رسد. علاوه بر این

عضویت براساس رابطه (4) با عملگر اجتماع<sup>8</sup> ترکیب و خروجی‌ها فازی زدایی می‌شوند.

#### 5- مدل حرکتی ربات ماهی

معادلات سینماتیکی حاکم بر سیستم را می‌توان به صورت فرمول (5) بیان نمود:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_m & 0 \\ \sin\theta_m & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

ورودی‌های کنترل کننده منطق فازی شامل فاصله ربات از هدف و زاویه بین جهت‌گیری ربات و هدف می‌باشند. برای این منظور خطای موقعیت و خطای جهت‌گیری ربات را می‌توان براساس پارامترهای سینماتیکی به صورت زیر بیان نمود:

$$EP = \sqrt{D_x^2 + D_y^2} \quad (6)$$

$$EA = \theta_0 - \theta, \quad (7)$$

$$D_x = x_r - x, \quad (8)$$

$$D_y = y_r - y, \quad (9)$$

$$\theta = \arctan(D_x, D_y) \quad (10)$$

خطای موقعیت ربات ماهی توسط پنج تابع {ZE, S, M, B, VB} که به ترتیب از چپ به راست بیانگر (صفر، کوچک، متوسط، بزرگ و خیلی بزرگ) می‌باشند بیان گردید. تابع عضویت خطای موقعیت در "شکل 8" نشان داده شده است. دامنه این تابع از 0 تا 1.2 متر با فواصل 0.3 متری تعیین شده است. به همین ترتیب، خطای جهت‌گیری ربات ماهی نیز توسط پنج تابع {NM, NS, ZE, PS, PM, PB} که به ترتیب بیانگر از چپ به راست (منفی بزرگ، منفی متوسط، منفی کوچک صفر، مثبت کوچک، مثبت متوسط و مثبت بزرگ) هستند می‌باشد. تابع عضویت خطای جهت گیری ربات در "شکل 9" نشان داده شده است. دامنه این تابع از 180- تا

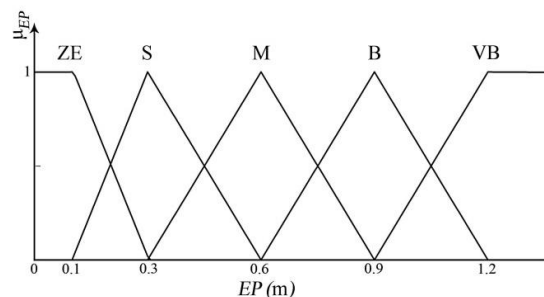


Fig. 8 Membership function for the position deviation of the robotic fish

شکل 8 تابع عضویت برای خطای موقعیت ربات ماهی

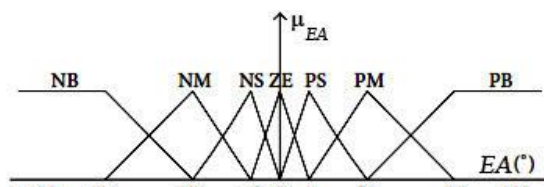


Fig. 9 Membership function for the angular deviation of the robotic fish

شکل 9 تابع عضویت برای خطای جهت گیری ربات ماهی

<sup>8</sup> Union / OR

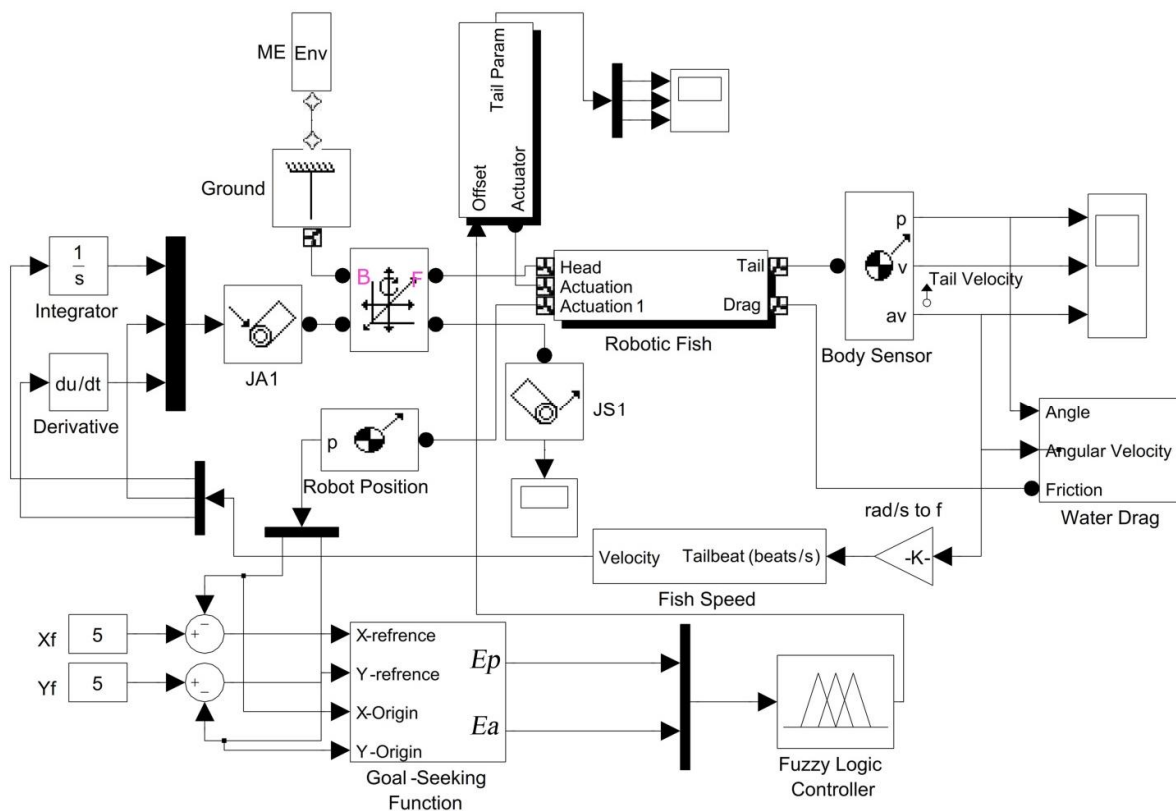


Fig. 10 Closed-loop configuration of the robotic fish in MATLAB software

شکل 10 مدل دینامیکی ربات ماهی در فرآیند حلقه بسته در محیط نرم افزار متلب

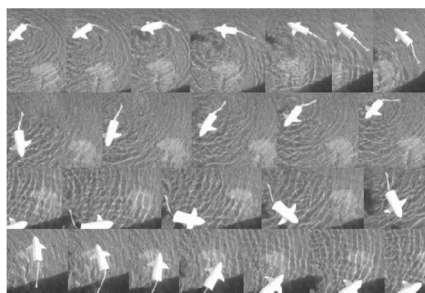


Fig. 12 The open loop experimental test of the robotic fish

شکل 12 نتایج تجربی حرکت ربات ماهی در فرآیند شنای آزاد

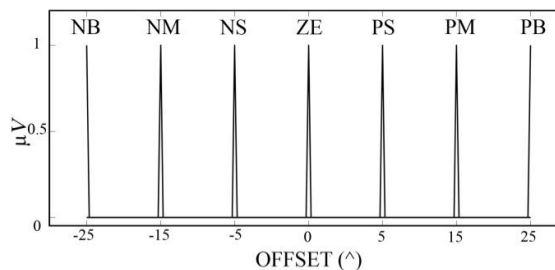


Fig. 11 Membership function for offset degree of the tail actuator

شکل 11 تابع عضویت برای تغییر زاویه حرکت دم ربات ماهی

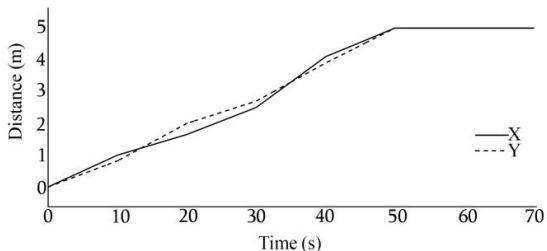


Fig. 13 Horizontal and vertical trajectories of robotic fish in closed-loop simulation for the first case.

شکل 13 مسیر افقی و عمودی ربات ماهی در شبیه سازی سیستم حلقه بسته برای حالت اول

مسیر انتخاب شده برای حرکت ربات ماهی براساس الگوریتم کنترلی پیشنهادی نیز برای دو حالت مختلف در "شکل‌های 14 و 16" نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده در "شکل 14" بیانگر این واقعیت است که با توجه به جهت‌گیری اولیه ربات قبل از شروع حرکت، مسیر انتخابی شبیه خط راست است که کوتاه‌ترین مسیر برای رسیدن به هدف موردنظر است. علاوه بر این نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده در "شکل 16" نیز مویید این واقعیت است که ربات با توجه به جهت‌گیری اولیه خود ناچار به تغییر جهت برای قرارگیری در موقعیت مناسب جهت رسیدن به موقعیت نهایی است.

نتایج تجربی حرکت ربات برای موقعیت هدفی مشابه با حالت اول در

"شکل 17" نشان داده شده است. مقایسه کمی نتایج شبیه‌سازی و تجربی حرکت ربات ماهی بیانگر تطابق بسیار خوب مدل ربات ماهی با واقعیت بوده و موید موفقیت ربات ماهی برای رسیدن به هدف مورد نظر در یک مسیر نسبتاً بهینه می‌باشد.

#### 7- مقایسه با مدل های مشابه

در این قسمت مقایسه ای بین ربات ماهی معرفی شده در این مقاله و 3 ربات ماهی مدرن ذکر شده در بخش 1 انجام شده است. همان‌طور که در جدول 3 قابل مشاهده است، در مقایسه با سایر مدل‌ها، در حالت شناور این ربات دارای عملکرد بسیار خوب و در حالت کاملاً فرورفته در آب، عملکردی متوسط دارد. نیاز به یادآوری است که سایر ربات‌های ذکر شده دارای ساختار و مکانیزم‌های بسیار پیچیده‌تری هستند. (سرعت سایر ربات‌ها برای حالت فرورفته در آب است).

#### 8- نتیجه گیری

هدف از این پژوهش طراحی و ساخت یک ربات ماهی مدل با مکانیزم انعطاف‌پذیر است که بتواند حرکاتی مشابه با یک ماهی قزل‌آلای رنگین کمان را شبیه‌سازی نماید. برای این هدف ابعاد و ساختار مکانیکی ربات براساس اندازه‌های یک ماهی واقعی در نظر گرفته شد. بخش مکانیکی ربات پس از طراحی و پیاده‌سازی مدل اولیه در محیط مجازی ساخته شد. تجهیزات الکترونیکی و برد میکروکنترلر ربات پس از نصب روی شاسی آلومینیومی بدنه درون محفظه ضدآب قرار گرفته و آب بندی گردید. حرکت نوسانی دم ربات ماهی توسط مکانیزم پولی و کابل از سروموتوری که با سیگنال مدولاسیون پهنای باند کنترل می‌شود ایجاد می‌گردد که این مکانیزم حرکتی باعث حرکت جانبی دم انعطاف‌پذیر ربات ماهی می‌گردد. برای کنترل حرکت ربات جهت رسیدن به هدف موردنظر از یک کنترلر فازی بهره گرفته شد. سیستم حلقه بسته متشکل از مدل دینامیکی ربات ماهی و کنترلر فازی در محیط نرم‌افزاری متلب شبیه‌سازی گردید. مقایسه کمی نتایج شبیه‌سازی و تجربی حرکت ربات ماهی در محیط آزمایشگاهی بیانگر دقت کافی مدل

جدول 3 مقایسه سرعت شنا

Table 3 comparing swimming speed

ربات ماهی	سرعت (طول بدن / ثانیه)	سرعت (سانتی‌متر/ثانیه)	طول ربات (سانتی‌متر)
الف [19]	0.15	10	66
ب [17]	0.44	15	33.9
ج [25]	0.1	3	30
د (شناور)	0.308	18.8	61
د (فرورفته)	0.1	5.8	61

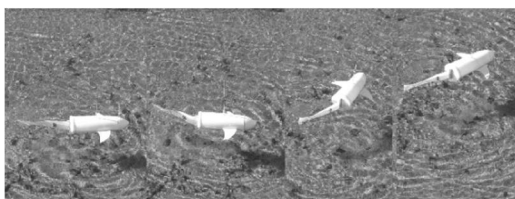


Fig. 17 Experimental result of the robotic fish swimming for goal seeking

شکل 17 نتایج تجربی حرکت ربات برای موقعیت هدفی مشابه با حالت اول

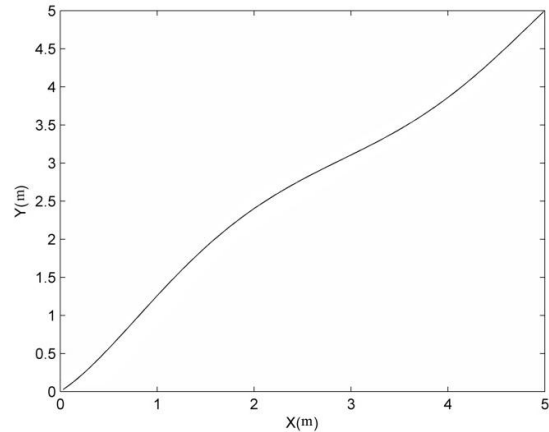


Fig. 14 Trajectory of robotic fish in closed-loop simulation for the first case.

شکل 14 مسیر حرکت ربات ماهی در شبیه‌سازی سیستم حلقه بسته برای حالت اول

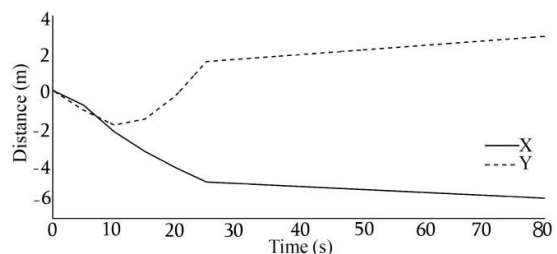


Fig. 15 Horizontal and vertical trajectories of robotic fish in closed-loop simulation for the second case

شکل 15 مسیر افقی و عمودی ربات ماهی در شبیه‌سازی سیستم حلقه بسته برای حالت دوم

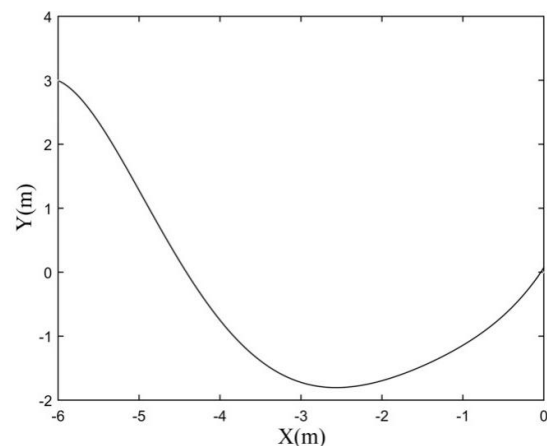


Fig.16 Trajectory of robotic fish in closed-loop simulation for the second case

شکل 16 مسیر حرکت ربات ماهی در شبیه‌سازی سیستم حلقه بسته برای حالت دوم

جدول 2 قوانین فازی برای دنبال کردن هدف

Table 2 Rule base of the goal seeking behavior

(EA)				(EP)			
NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
PM	PS	ZE	ZE	ZE	NS	NM	ZE
PM	PM	PS	PS	NM	NB	NB	S
PS	PS	PM	PM	NB	NM	NM	M
PB	PM	PB	PB	PM	PS	PS	B
PM	PM	PB	PB	PM	PS	PS	VB

- [3] G. Taylor, Analysis of the swimming of long narrow animals, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 214, pp. 158-183, 1952
- [4] T. Y. Wu, Swimming of a waving plate, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 10, No 3, pp. 321-344, 1961.
- [5] M. J. Lighthill, Note on the swimming of slender fish, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 9, pp. 305-317, 1960.
- [6] M. Siahmansouri, A. Ghanbari, MMS. Fakhrebadi, Design, implementation and control of a fish robot with undulating fins. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 8, No. 5, pp. 61-69, 2011
- [7] M. J. Lighthill, Large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion, *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, Vol. 179, pp. 125-138, 1971
- [8] J. Y. Cheng, R. Blickhan, Note on the calculation of propeller efficiency using elongated body theory, *Journal Experimental Biology*, Vol. 192, pp. 169-177, 1994
- [9] H. Hu, J. Liu, I. Dukes, G. Francis, Design of 3D swim patterns for autonomous robotic fish. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, pp. 2406-2411. 2006
- [10] K. Hirata, Development of experimental fish robot, *Proceedings of The 6th International Symposium Marine Engineering (ISME 2000)*, Tokyo, Japan, Oct, pp. 23-27. 2000.
- [11] D. Barrett, M. Triantafyllou, D. K. P. Yue, M. A. Grosenbaugh, M. J. Wolfgang, Drag reduction in fish-like locomotion, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 392, pp. 183-212, 1999.
- [12] W. K. Yen, J. Guo, Synchronizing the tail motion of a robotic fish to a periodic moving source, *IEEE Automatic Control Conference (CACs), CACS International*, Nantou, pp. 124-129. 2013
- [13] S.B. Behbahani, A dynamic model for robotic fish with flexible pectoral fins, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.1552-1557,2013
- [14] J Yu, M Wang, Z Su, M Tan, J Zhang, Dynamic modeling of a CPG-governed multijoint robotic fish, *Advanced Robotics*, Vol. 27, No. 4, pp. 275-285,2013.
- [15] V. Kopman, J. Laut, F. Acquaviva, A. Rizzo, M. Porfiri, Dynamic modeling of a robotic fish propelled by a compliant tail, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 40, No. 1, pp.1-13, 2014.
- [16] J. Yu, M. Tan, S. Wang, E. Chen, Development of a biomimetic robotic fish and its control algorithm, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, Vol. 34, No. 4, pp. 1798-1810, 2004.
- [17] AD. Marchese, CD. Onal, D. Rus. Autonomous soft robotic fish capable of escape maneuvers using fluidic elastomer actuators, *Soft Robotics*, Vol. 1, No. 1, pp. 75-87, 2014
- [18] Y. Takada, K. Koyama, T. Usami, Position estimation of small robotic fish based on camera information and gyro sensors. *Robotics*, Vol. 3, No. 2, pp. 149-162, 2014.
- [19] RK. Katschmann, AD. Marchese, D. Rus, Hydraulic autonomous soft robotic fish for 3D swimming, *Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE/RSJ International Conference* Vol. 109, pp. 405-420 - 2011
- [20] D. Chwa, Fuzzy adaptive tracking control of wheeled mobile robots with state-dependent kinematic and dynamic disturbances, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 20, No. 3, pp. 587-593, 2012
- [21] B. Ranjbarsahraei, M. Roopaei, S. Khosravi, Adaptive fuzzy formation control for a swarm of nonholonomic differentially driven vehicles, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 67, No. 4, pp. 2747-2757, 2012.
- [22] M. Hsiao, C. Chen, S. Tsai, S. Liu, Combined interval type-2 fuzzy kinematic and dynamic controls of the wheeled mobile robot with adaptive sliding-mode technique, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE*, Korea, 20-24 Aug. 2009.
- [23] A. Derdiyok, B. Soysal, F. Arslan, Y. "Ozo" glu, M. Garip, An adaptive compensator for a vehicle driven by DC motors, *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 342, pp. 273-283, 2005
- [24] O. R. E. Motlagh, T. S. Hong, N. Ismail, Development of a new minimum avoidance system for a behavior-based mobile robot, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.160, No. 13, pp. 1929-1946, 2009
- [25] C. Rossi, J. Colorado, W. Coral, A. Barrientos, Bending continuous structures with SMAs: A novel robotic fish design, *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 6, No. 4, pp. 045005, 2011

پیشنهادی برای شبیه‌سازی رفتار نزدیک به واقعیت ماهی می‌باشد. علاوه بر این نمونه آزمایشگاهی ارائه شده برای ربات ماهی امکان پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی مختلف در شرایط محیطی متنوع را فراهم می‌نماید. همان‌طور که در قسمت (7) اشاره شد، عملکرد این ربات در کنار سادگی طراحی و هزینه کم آن، در مقایسه با مدل‌های مشابه بررسی شده، قابل قبول بوده است.

## 9- فهرست علائم

فاصله افقی روبات از هدف (m)	$D_x$
فاصله عمودی روبات از هدف (m)	$D_y$
خطای موقعیت ربات	$EP$
خطای جهت گیری ربات	$EA$
فرکانس کلاک سیستم (Hz)	$f_{clk\_1/O}$
فرکانس سیگنال مدولاسیون پهنای پالس (Hz)	$f_{OC_n}$
مقسم فرکانس ( $N = 1, 8, 64, 256, 1024$ )	$N$
ورودی با ارزش $A_1$	$u_1$
سرعت خطی ربات ماهی ( $ms^{-1}$ )	$v$
مختصات افقی مرکز جرم ربات	$x_0$
مختصات افقی هدف	$x_r$
مختصات عمودی مرکز جرم ربات	$y_0$
ورودی با ارزش $B_1$	$y_1$
مختصات عمودی هدف	$y_r$

## علائم یونانی

زاویه‌ی جهت اولیه ربات ( $^\circ$ )	$\dot{\theta}_m$
زاویه هدف ( $^\circ$ )	$\theta_r$
تابع عضویت	$\mu_{A_1}(u_1)$
تابع عضویت	$\mu_{B_1}(y_1)$
سرعت زاویه‌ای ربات ماهی ( $rads^{-1}$ )	$\omega$

## زیرنویس‌ها

مدولاسیون پهنای پالس	PWM
گوسی پایدار	Quasistatic

## 10- مراجع

- [1] P. Y. Lee, S. K. Park, S. T. Kwon, S. Park, Jung, H.M.S. Park, P. M. Lee, Dynamic modeling of autonomous underwater vehicle for underwater surveillance and parameter tuning with experiments, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 29 No. 6, pp. 488-498, 2015
- [2] C. Zhou, KH Low, Design and Locomotion Control of a Biomimetic Underwater Vehicle with Fin Propulsion, *IEEE/ASME T. Mechanics*. Vol 17, No 1, pp. 25-35, 2012