

توسعه یک مدل سه بعدی روبات ماهی و مقایسه آزمایشگاهی نتایج

شهناز بهمنیار^{۱*}، عقیل یوسفی کما^۲، حسن قاسمی^۳

۱- کارشناس ارشد هیدرومکانیک، دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

چکیده

طراحی وسایل نقلیه زیر آبی با الهام از طبیعت توجه خیلی از محققین را به دلایل مختلفی از جمله جستجو در اقیانوس و حفاظت محیط زیست به خود جلب کرده است. از مزایای اینگونه وسایل زیر آبی می توان به مانورپذیری بالا و توانایی تعقیب مسیر و پایداری در جریانات دریایی اشاره کرد، همچنین نسبت به دیگر وسایل زیر آبی متداول که مجهز به پیش رانش های مرسوم هستند ورتکس های کمتری تولید می کنند.

هدف اصلی از این تحقیق، شبیه سازی رفتار یک روبات ماهی با عملکرد هیدرودینامیکی مناسب می باشد. بدین منظور نوعی از این روبات ماهی که در آزمایشگاه سیستم های دینامیکی و کنترلی پیشرفته دانشگاه تهران ساخته شده است مورد شبیه سازی قرار گرفت. در اینجا برای شبیه سازی مدل از معادلات ناویر استوکس و روش شبیه سازی ادی های بزرگ (LES) استفاده شده و برای تحلیل مدل در حالت دم زدن نیز از روش مش بندی دینامیکی بهره گرفته شده است.

به منظور بررسی صحت مدل شبیه سازی شده، یک بستر آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است. پارامترهای مهم هیدرودینامیکی استخراج و با نتایج شبیه سازی مقایسه شده اند که حاکی از انطباق نسبتا مناسب نتایج می باشد. بدین ترتیب می توان از مدل شبیه سازی شده به منظور بهینه سازی و بررسی پارامترهای مورد نیاز استفاده کرد. این امر باعث کاهش هزینه های سعی و خطا در ساخت و آزمایش خواهد شد.

کلمات کلیدی: روبات ماهی، شبیه سازی عددی، مش بندی دینامیکی، روش شبیه سازی ادی های بزرگ

DEVELOPMENT OF A 3D MODEL OF A ROBOT FISH WITH EXPERIMENTAL ANALYSIS

Sh. Bahmanyar¹, A. Yousefi-Koma², H. Ghasemmi³

1- M.Sc. in Hydromechanics, School of Marine Engineering, Amir Kabir University of Technology.

2- Associate Professor, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran.

3- Associate Professor, School of Marine Engineering, Amir Kabir University of Technology.

Abstract

Biomimetic underwater vehicle design has attracted the attention of researchers for various reasons such as ocean investigation, marine environmental protection, exploring fish behaviors and detecting the leakage of oil pipe lines. Fish and other aquatic animals have good maneuverability and trajectory following capability. They also efficiently stabilize themselves

* نویسنده مسوول مقاله Bahmanyar@aut.ac.ir

in currents and surges leave less noticeable wake than conventional underwater vehicles equipped with thrusters.

This paper presents the hydrodynamic simulation of a biomimetic robot fish that is fabricated at the Advanced Dynamic and Control Systems Laboratory (ADCSL), University of Tehran. In order to simulate a fish-like swimming robot, a comprehensive hydrodynamic analysis was performed. Extensive study of the biology of fish particularly their motion was performed. Carangiform swimming mode, which is the swimming mode of fish that use their tail and peduncle for propulsion was chosen.

A hydrodynamic simulation is performed using computational fluid dynamics. In simulation Reynolds averaged Navier-Stokes equations (RANS) and Large Eddy Simulation (LES) method were employed to solve turbulence conditions. In this analysis the fluid was supposed to be single phased and the flow to be distributed and incompressible. The presence of a complex shaped moving boundary makes a difficult proposition for the computational fluid dynamics. Dynamic mesh method is employed to simulate moving boundaries. A hydrodynamic model of a robot fish permits us to determine the properties of the robot fish and facilitates the development of control algorithms.

In order to verify these numerical models, an experimental test bed is fabricated at ADCSL. Experimental results show a smooth, repeatable and controllable motion of the robot fish. Data gathered through this method demonstrated reasonable agreement with simulation results. Consequently, the numerical model maybe utilized for further analysis and optimization process to reduce the experimental trail and error process cost.

Keywords: Biomimetic underwater vehicles, Robot Fish, Numerical simulation, Dynamic mesh method, Large Eddy Simulation

۱- مقدمه

امروزه ایده جدید در کلیه جوامع، شناسایی و بهره‌گیری از طبیعت به عنوان روشی برای گسترش تجهیزات و تکنولوژی‌های جدید می‌باشد. این پیشرفت در زمینه‌های مختلفی از جمله صنایع دریایی و رباتیک قابل مشاهده است. بهره‌گیری از مدل‌هایی با الهام از طبیعت به عنوان روشی است برای افزایش بازده و خواص حرکت که توسط مهندسين و زیست‌شناسان مورد بررسی قرار می‌گیرد. این تصادفی نیست که اشکال زیردریایی‌ها با تقلید از ماهی‌ها و سایر آبزیان طراحی می‌شود. می‌توان طراحی مهندسی و علم زیست‌شناسی را به موازات هم در نظر گرفت و این به علت آن است که هر دو در یک محدوده عملیاتی در معرض نیروهای فیزیکی مشابه قرار دارند. می‌دانیم بیشتر شناورها و سازه‌های دریایی برای سیستم رانش خود از پروانه استفاده می‌کنند. این وسایل نقلیه زیرآبی به واسطه استفاده از پروانه هم بازده کمتری خواهند داشت و هم فرکانس منتشره حاصله از چرخش پیشران آنها سبب تشکیل حباب‌هایی ناشی از پدیده کاویتاسیون می‌شود که سبب شناسایی آنها در

سرعت‌های بالا می‌گردد و راه حلی که در اینجا ارائه می‌گردد، استفاده از سیستم‌های پیشرانی است که ماهی‌ها به منظور حرکت و مانوردهی از آنها استفاده می‌کنند. چنین قابلیت حرکتی محققان را به سمت بهتر کردن بازده سیستم‌های رباتیک آبی سوق می‌دهد. به جای پروانه و مبدل‌های پیشران چرخان، که در کشتی و زیردریایی به کار می‌رود، در روبات ماهی، حرکت نوسانی و موج‌گونه، انرژی اصلی پیشروی را ایجاد می‌کند [۱]. تحقیقات روی ماهی‌های واقعی نشان می‌دهد که این نوع نیروی محرکه، سروصدای کمتر، تأثیر بیشتر در ایجاد نیروی پیشران و قابلیت مانور بالاتری نسبت به نوع پروانه ای دارا می‌باشد. لذا روبات ماهی می‌تواند در بسیاری از کاربردها از جمله مطالعه رفتارهای ماهی‌ها، ردیابی مکان نشت لوله‌های نفت و اکتشاف در کف آب استفاده شود. در گذشته اکثر پروژه‌های روبات ماهی در زمینه بررسی حرکت ماهی بخصوص مطالعه‌ی شنای مستقیم، جنس خاص پوست آن و ساختار مکانیکی اینگونه روبات‌ها متمرکز بوده است. در حال حاضر مکانیزم سینماتیک و هیدرودینامیک دقیق برای ایجاد و شبیه‌سازی این

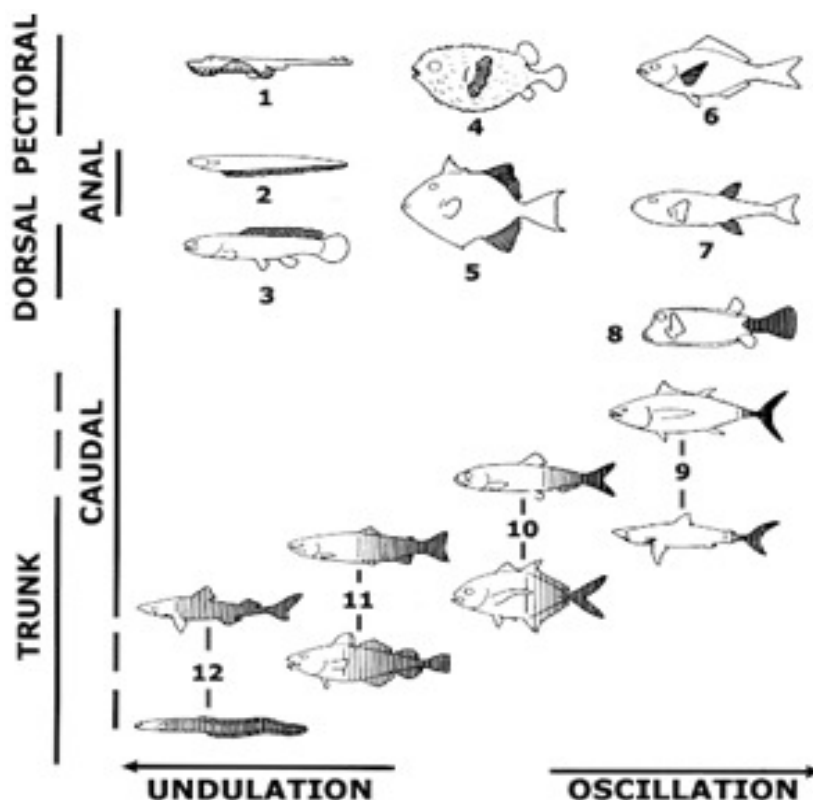
در این تحقیق هدف ارائه مدل شبیه سازی شده نمونه ماهی ساخته شده در آزمایشگاه سیستم های کنترلی و دینامیکی پیشرفته دانشگاه تهران (ADCSL) می باشد که به کمک نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی FLUENT در حالت سه بعدی با کمک معادلات ناویر استوکس و استفاده از روش شبیه سازی ادیجهای بزرگ و با تقلید از حرکت واقعی ماهی شبیه سازی و به منظور بررسی صحت مدل ارائه شده از روش آزمایشگاهی بهره گرفته شده است.

در این روش با استفاده از سیستمی جدید و ساده یک سری پارامترهای هیدرودینامیکی مورد نیاز استخراج شده است که این پارامترها شامل نمودارهای سرعت برحسب فرکانس و نیرو در جهت X برحسب زمان می باشد.

حالت ها موجود نیست. لذا مدل کردن رفتارهای متغیر در روبات ماهی موضوع اصلی رقابت است [۵-۲].

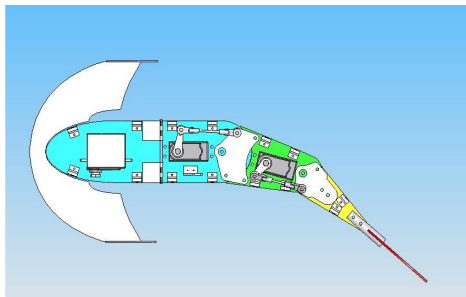
در همین راستا و به منظور شناخت دقیق و در دست داشتن اطلاعات مفید از نحوه حرکت ماهی ها، مطالعاتی پایه ای بر روی عملکرد آنها صورت گرفته است. می توان حرکت ماهی ها را به دو دسته مهم تقسیم کرد: ماهی هایی که فشار را عمدتاً به وسیله بدن و یا حرکت دم به وجود می آورند^۱ و دسته ای دیگر که برای حرکت، عمده فشار خود را به وسیله باله های میانی و جفت هایی که در قسمت سینه دارند تولید می کنند^۲.

با وجود اینکه دم از بهترین نیروهای پیشران (بنابر مطالعه های شماری از گونه ها) می باشد، تقریباً ۱۵٪ ماهی ها در دسته دوم و مابقی در دسته اول قرار دارند. در شکل ۱ می توان این دسته بندی را مشاهده کرد.

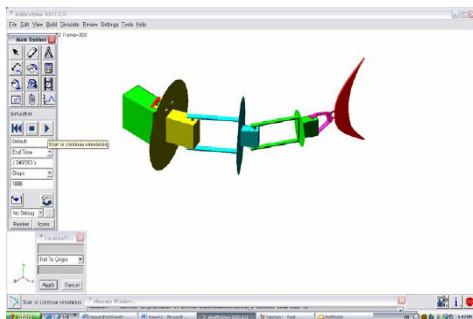


شکل ۱- دسته بندی ماهی ها به دو دسته اصلی

ساختار اصلی روبات استفاده شده است که نتایج نهایی مدل سازی در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۳- نمایی از طرح اولیه روبات در نرم افزار Solid works



شکل ۴- مدلسازی روبات ماهی به کمک نرم افزار ADAMS

برای ساخت نمونه، بدنه از جنس فایبرگلاس انتخاب شده است. این نوع پوشش، بسیار سبک و در عین حال از مقاومت بالایی برخوردار است. شکل ۵ نمایی از بدنه ساخته شده را نمایش می دهد. تمامی اجزاء بدنه توسط دستگاه LASER CUT برش داده شده است، بنابراین ساختار بدنه از دقت بالایی برخوردار است. به منظور آب بندی مدل از یک پوشش لاستیکی و از جنس Latex استفاده شده است. فیلم برداری از محیط از طریق دوربین Wireless cam 220V/50Hz 2.4G که بر روی بدنه ماهی نصب شده است صورت می گیرد. این دوربین یک گیرنده ی LCD دارد که در محیط بسته تا ۳۰ متر و در محیط باز تا ۲۰۰ متر قابلیت دریافت تصویر دارد. به منظور کنترل میکروپردازشی از یک رادیو کنترلر ۶ کاناله با واسطه ی میکروکنترلر استفاده شده است. رفتارهای مشخصی همچون ایجاد اختلاف فاز به کمک حرکت سر برای

۲- مدل آزمایشگاهی روبات ماهی ADCSL

نمونه ساخته شده نوعی روبات است که با الهام از طبیعت کوسه کله چکشی طراحی و ساخته شده است. حرکت نمونه فوق برپایه کرانگی فرم می باشد که در این روش حرکت، ماهی به کمک یک سوم قسمت انتهایی بدن خود نیروی پیشران تولید کرده و به جلو حرکت می کند. این نوع حرکت را می توان به دو بخش تقسیم کرد، حالت اول به صورت شنای یکنواخت یا دوره ای می باشد که با حرکتی رو به جلو و سرعت متغیر شنا می کند و در حالت دیگر شنای غیریکنواخت که شامل شروع سریع، چرخش تند و دیگر مانورهایی که توسط ماهی تولید می شود. در این میان شنای دوره ای همیشه مورد توجه زیست شناسان، ریاضی دانان و دانشمندان روباتیک بوده است، در اینجا نیز این حرکت مد نظر می باشد.



شکل ۲- نمایی از کوسه ماهی کله چکشی

نمونه مذکور حدود ۶۰۰ میلیمتر طول دارد که از پنج قسمت شامل سر، دم و سه قسمت میانی تشکیل شده است و با چهار سرو موتور به جلو حرکت می کند و می چرخد. حرکت بالا و پایین با استفاده از حرکت سر و به کمک سروموتور موجود در این منطقه صورت می گیرد. با این مدل می توان الگوهای متنوع حرکتی را شبیه سازی کرد. دو سروموتور به عنوان تأمین کننده ی نیروی پیشران می باشند که یکی بر روی باله ی دمی و دیگری بر روی مفصل تعبیه شده بر روی کمر روبات متصل شده است. طراحی اولیه توسط نرم افزار Solid works صورت گرفته است که در شکل ۳ قابل مشاهده است. از نرم افزار ADAMS به منظور مدلسازی مکانیزم های حرکتی و اجزاء صلب و تعیین

۳- شبیه سازی روبات ماهی آزمایشگاهی

مطالعه حرکت ماهی‌ها به عنوان اطلاعات خیلی مفید برای شناسایی مکانیسم کنترل جریانهای ناپایدار به شمار می‌آید. در بیشتر این مطالعات برای درک بهتر رفتار حرکت ماهی‌ها از حرکت فویلها و یا شبیه‌سازی حرکت ماهی استفاده می‌شود بطوریکه در تحقیقات پیشین نشان داده شده است که حرکت فویل به روش حرکت ماهی تولید جتی در پشت ماهی می‌کند که سبب تولید نیروی تراست می‌شود. در تحقیقات گذشته برای تحلیل عملکرد ماهی از روشهای عددی استفاده می‌گردید ولی با توجه به پیچیدگی حرکت ماهی و جریانهای ناپایدار تولیدی در اطراف بدنه و دم ماهی در صورت استفاده از روشهای عددی محاسبه بسیار پیچیده و زمانگیر می‌شد در نتیجه در روش فوق از بسیاری از پارامترها برای ساده سازی معادلات صرفنظر شده و یا آنها را ثابت فرض کرده‌اند.

روشی که در اینجا ارائه شده است حرکت شبیه‌سازی شده ماهی بر پایه دم زدن می‌باشد. به‌طوریکه این حرکت سبب تولید نیروی تراست می‌شود و مقدار آن بستگی به اندازه دم، زاویه، سرعت، جنس و ... دارد. بنابراین شبیه‌سازی آن برای بدست آوردن نیرویهای لیفت، درگ و تراست در هر لحظه لازم به نظر می‌رسد. در واقع همین امر یکی از پیچیدگیهای روبات ماهی‌ها است چرا که نیروی دراگ و تراست برخلاف دیگر اجسام متحرک از قبیل انواع زیر سطحی‌ها مانند AUV و یا ROV ثابت نیست و شدت، راستا و مقدار آن تغییر می‌کند. این موضوع پایداری و کنترل این اجسام را بسیار سخت می‌کند.

در این جا به روش دینامیک سیالات محاسباتی و با کمک نرم‌افزار محاسباتی FLUENT و با حل معادلات ناپایدار ناویراستوکس در حالت آرام با استفاده از روش شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ و با در نظر گرفتن شرایط اولیه و شرایط مرزی مسئله را حل کرده و توانستیم مدلی مشابه همراه با کلیه شرایط اعمال شده بر روی نمونه واقعی شبیه‌سازی کنیم که در این میان به نتایج قابل توجهی دست یافتیم که در این مقاله به آن می‌پردازیم.

تغییر عمق، چرخش حول محور عرضی و تغییر میدان دید دوربین در میکروکنترلر تعریف شده است که این رفتارها به وسیله‌ی رادیو کنترلر اعمال می‌شود.



شکل ۵- نمایی از بدنه و پوشش آب بندی شده

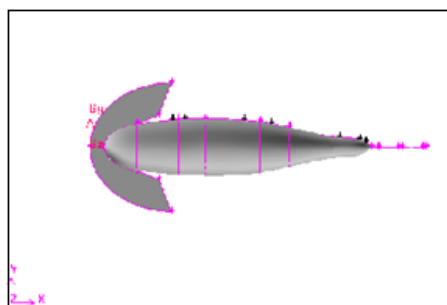
مشخصات اصلی مدل در جدول ۱ و نمونه نهایی بعد از ساخت و به آب‌اندازی در شکل ۶ قابل مشاهده است.

جدول ۱- مشخصات کلی مدل ساخته شده

ابعاد و اندازه ها	مشخصات
۱۴۰۰ (gr)	وزن
۶۰ (cm)	طول
۱۲ (cm)	عرض
۲۰ (m)	برد عملیاتی
۷۰ (cm/sec)	سرعت
۲۰ (min)	زمان عملیاتی
Battery Li-Po	منبع تغذیه



شکل ۶- نمایی از مدل پس از ساخت و به آب‌اندازی



شکل ۷- مدل سازی سه بعدی اولیه روبات ماهی

در دمای ۲۵ درجه و سرعت حرکت ماهی دلخواه در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی دیواره ها و بدنه در حالت بدون لغزش و شرط اولیه نیز با در نظر گرفتن سرعت در محدوده محاسباتی فرض شده است. هدف از انجام محاسبات بررسی پاسخ پس از رسیدن به شرایط پایدار می باشد. مدل سه بعدی مش بندی شده در شکل ۸ قابل مشاهده است که با توجه به این شکل می توان گفت مش های نزدیک بدنه ریزتر و به سمت دیواره مش ها درشت تر می شود که سبب افزایش دقت حل شده و زمان حل را کاهش می دهد.

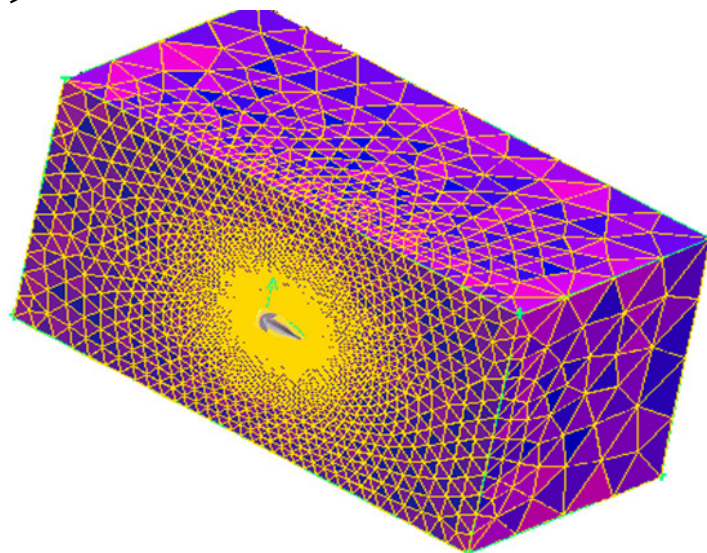
نتایج ناشی از حل مسئله هم در حالت دو بعدی و هم سه بعدی بررسی شده است اما با توجه به اینکه هدف اصلی ما شبیه سازی مدل روبات ماهی موجود در آزمایشگاه می باشد نیاز است که کلیه شرایط واقعی حاکم بر مدل اصلی و حالت سه بعدی و حرکت در حال دم زدن بررسی شود و تحلیل نتایج حرکت دوبعدی صرفا برای استخراج یکسری اطلاعات اولیه از مدل می باشد.

۲-۱- استفاده از گزینه دینامیک مش برای شبیه سازی زمانی که یکی از مرزها متحرک باشد، شکل جسم نسبت به زمان تغییر می کند. بنابراین لازم است در هر لحظه از حل، شبکه بندی تغییر کند. برای حل اینگونه مسائل روش های متفاوتی وجود دارد از جمله روش یکنواخت سازی فتری^۳ و روش المان بندی مجدد^۴، که در اینجا از روش المان بندی مجدد به منظور شبیه سازی مدل مورد نظر استفاده شده است. این روش معمولا برای نواحی با المانهای مثلثی و هرمی استفاده می گردد. هنگامی که جابجایی مرز در مقایسه با اندازه المان ها زیاد باشد امکان دارد المان بندی از حالت مطبوع خود خارج گردد. برای جلوگیری از این امر از روش شبکه بندی مجدد استفاده می شود یعنی اگر اندازه المان ها یا کجی آن از حدی که معین است تجاوز کند آن المان ها حذف و آن ناحیه دوباره المان بندی می شود. گزینه مش بندی دینامیکی به عنوان مهمترین بخش در شبیه سازی مدل های متحرک است و نتایج حاصله از شبیه سازی ارتباط مستقیم با نوع این مش بندی دارد زیرا هر چقدر این مش بندی بهتر صورت گیرد دینامیک مدل بهتر شبیه سازی شده و نتایج بهتری حاصل می شود.

۲-۲- نتایج ناشی از شبیه سازی روبات ماهی

در این بخش هدف شبیه سازی رفتار مدل روبات ماهی موجود در آزمایشگاه می باشد. مدل شبیه سازی شده با توجه به کلیه ابعاد و اندازه های اصلی مدل واقعی است. برای طراحی اولیه به کمک روش ابتکاری اسکن نقطه یابی صورت گرفت و سپس با استفاده از نرم افزار Solid works طرح اولیه آن رسم شد. در شکل ۷ طرح اولیه مدل روبات ماهی در نرم افزار قابل مشاهده است. بعد از ایجاد طرح سه بعدی مدل ماهی در این نرم افزار، مهمترین و دقیق ترین بخش تولید مش است.

زیرا دقت حل مسئله به انتخاب و نوع مش بندی بستگی دارد. در اینجا محیط سیال اطراف مدل به صورت استوانه ای در نظر گرفته شده است. سیال عبوری آب



شکل ۸- مش بندی سه بعدی اطراف مدل، بطوریکه در نزدیکی مدل مش‌ها ریزتر و در فواصل دورتر مش‌ها درشت‌تر می‌باشد

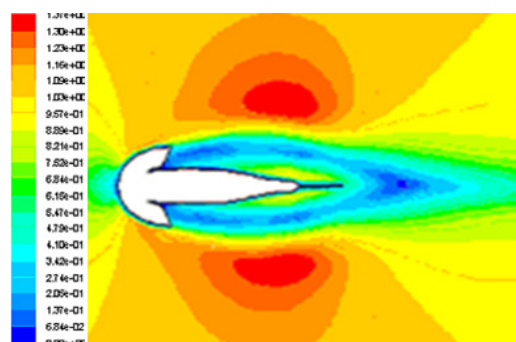
با توجه به شکل (۹-ا) جریان در نزدیکی سر ماهی به گونه‌ای است که کاهش سرعت را در این ناحیه داشته و با گذشت جریان از سر و رسیدن به کناره‌ها سرعت به شدت افزایش می‌یابد. این کاهش سرعت در سر در شکل (۹-ب) به صورت افزایش فشار نشان داده شده بطوریکه هر چه به سمت کناره‌ها می‌رویم فشار کاهش می‌یابد. با عبور سیال از روی پروفیل بدنه ماهی، سرعت افزایش یافته و به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد و در نتیجه آن نیز فشار ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

زمانیکه فشار در جهت جریان افزایش یابد نیروی مقاوم در برابر حرکت سیال در داخل لایه مرزی علاوه بر نیروی اصطکاک شامل نیروی فشار هم می‌باشد. بنابراین سرعت سیال کاهش می‌یابد و حتی ممکن است به صفر برسد و منفی شود که در این حالت لایه مرزی از مرز جدا می‌شود. در این حالت جریان سیال معکوس شده و نقطه جدایش اتفاق می‌افتد. ناحیه پائین دست خط جریان جدا شده را دنباله^۵ می‌نامند که با در نظر گرفتن این حالت می‌توان گفت مدل فوق فرم بدنه‌ای از نوع هموار^۶ را دارا می‌باشد.

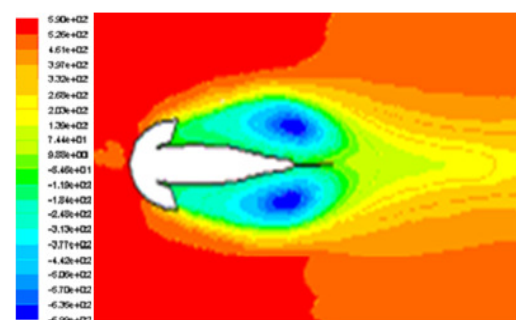
به منظور شبیه‌سازی حرکت واقعی مدل نیاز است که از روش مش‌بندی دینامیکی استفاده شود. در این مرحله به دلیل حرکت دم دیگر شرایط در بالا و پایین جسم یکنواخت نمی‌باشد.

در کد مربوط به مرز متحرک سرعت زاویه‌ای با توجه به فرکانس‌های مختلف در نظر گرفته شده است. در حالت

نتایج در حالت بدون دم زدن در اشکال زیر قابل مشاهده است. شکل ۹ توزیع سرعت جریان، نوریع فشار و توزیع ورتکس در اطراف مدل ماهی دوبعدی را نمایش می‌دهد.



a



b

شکل ۹- دو نوع کانتور حاصله از نتایج شبیه‌سازی دوبعدی (a) کانتور سرعت در اطراف بدنه ماهی (b) کانتور فشار کل در اطراف بدنه ماهی

۳- مطالعات آزمایشگاهی بر روی حرکت مدل ماهی

تحقیقات آزمایشگاهی بر روی عملکرد شنای ماهیان نقش مهمی را به منظور اکتشاف راه حلی برای سیستم‌های مکانیکی در محیط‌های آبی ایفا می‌کند. بطور کلی دانشمندان با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بر روی ماهی‌ها به این نتیجه رسیده‌اند.

که تراست ایجاد شده برای حرکت آنها بیشتر از نیروی تراستی است که در بین دیگر وسایل زیر آبی موجود است. این نتیجه نشان می‌دهد که حرکت ماهی‌ها اثر هیدرودینامیکی به خصوصی بر روی رانش دارد که سبب کاهش دراگ نیز می‌گردد.

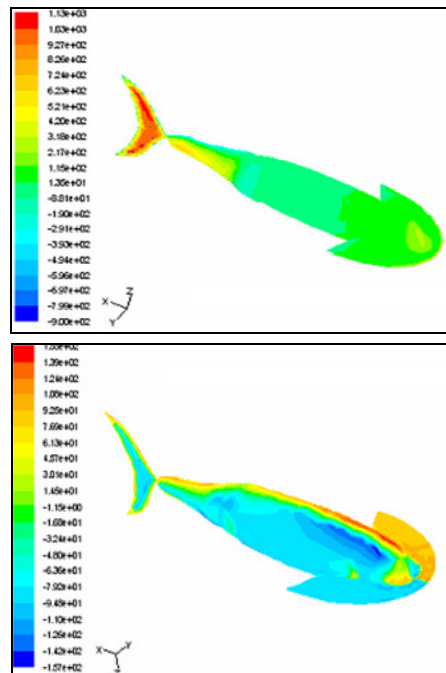
۳-۱- سینماتیک حرکت روبات ماهی

بستر آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق سیستمی است که در موقعیت‌های مختلف سینماتیک روبات ماهی را توصیف می‌کند. نوع و ابعاد هندسی سیستم فوق با توجه به فضای مورد نیاز برای عملکرد بهینه ماهی طراحی و ساخته شده است.

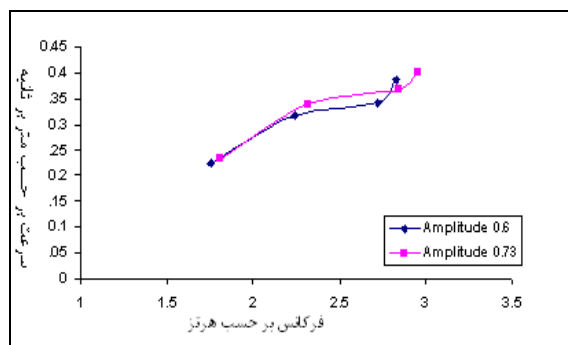
۳-۱-۱- معرفی تجهیزات مربوط به تست و اندازه‌گیری پارامترهای اولیه

این سیستم شامل کانالی با ابعاد $60 \times 80 \times 135$ سانتی مترمکعب می‌باشد که از جنس ورقه‌های آلومینیومی بوده، به همین علت سبک و حمل و نقل آن آسان می‌باشد. کانال موجود در استخری به حجم $100 \times 200 \times 300$ سانتی متر مکعب قرار گرفته است. موقعیت کانال در استخر بگونه‌ای در نظر گرفته شده است که ماهی قبل از کانال در استخر شروع به حرکت کرده تا حرکت آن پایدار شود سپس وارد کانال اندازه‌گیری می‌شود. طراحی اولیه کانال در نرم‌افزار Auto CAD صورت گرفته است. مشخصات هندسی کانال در جدول ۲ قابل مشاهده است. در شکل ۱۱ نمایی از طرح اولیه کانال و نمونه ساخته شده ارائه شده است.

واقعی این مقدار ثابت نیست بلکه از مقدار صفر شروع شده و به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد و دوباره صفر می‌گردد که تابع آن بستگی به مکانیزم‌های مربوط به حرکت دم زدن دارد که در اینجا دم زدن همراه با حرکت مستقیم‌الخط فرض شده است. برای شبیه‌سازی حرکت دم زن معادلات هارمونیک مربوط به حرکت دم به صورت برنامه‌ای به زبان C به هر مفصل داده شده است. بدین ترتیب می‌توان حرکت دم زدن را برای مدل شبیه‌سازی کرد. در شکل‌های (a-10) و (b-10) کانتور فشار در حالت سه‌بعدی رسم شده است. همانگونه که انتظار می‌رود بیشترین مقدار فشار بر روی ناحیه دم می‌باشد و در ابتدای دم زدن است چرا که در سطح دم در حین حرکت سرعت خطی بیشتر است بنابراین فشار دینامیکی وارد بر دم بیشتر خواهد بود و هرچه به سمت بدنه پیش می‌رویم فشار به صورت سهموی کاهش می‌یابد. علاوه بر ناحیه متحرک، مدل فشاری را در ناحیه سر خود حس می‌کند که ناشی از موقعیت نقطه سکون می‌باشد که در شکل زیر قابل مشاهده است.

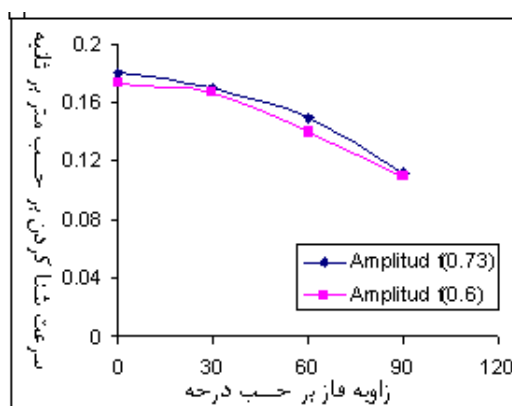


شکل ۱۰- (a) کانتور فشار بر روی سطح بدنه و مشاهده بیشترین مقدار فشار در یک سمت دم در ثانیه ۰/۵ (b) کانتور فشار بر روی سطح بدنه و مشاهده بیشترین مقدار فشار در یک سمت دم در ۱ ثانیه



شکل ۱۲- نمودار سرعت بر حسب فرکانس در دامنه‌های مختلف

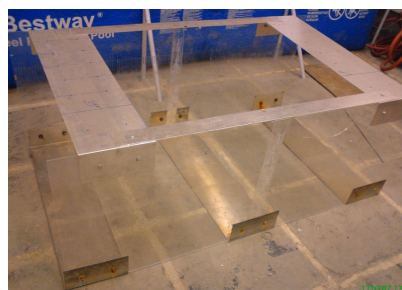
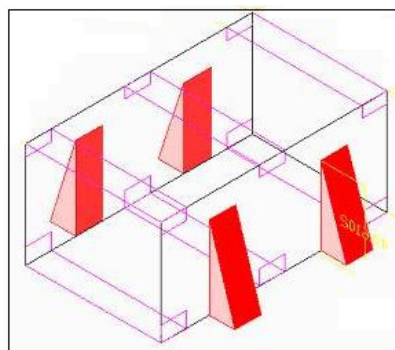
با توجه به این نتایج می‌توان گفت افزایش فرکانس و دامنه سبب افزایش سرعت می‌شود اما این افزایش تنها در بازه‌ای سبب افزایش سرعت می‌شود و در بازه‌های دیگر کاهش نرخ سرعت را به همراه دارد. به منظور شناسایی بهترین محدوده برای سرعت، فرکانس بهینه‌ای^۷ در نظر گرفته شده است. این محدوده فرکانس، حرکت بهینه مدل را نشان می‌دهد و خارج از این محدوده سبب تلفات مکانیکی مدل شده و دراگ را افزایش و نیروی تراست مدل را کاهش می‌دهد. از دیگر نتایج به دست آمده از ثبت حرکت مدل روبات، نمودار سرعت بر حسب زاویه فاز است که در فاکتور دامنه‌های مختلف صورت گرفته است از این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که زاویه فاز حدود ۰ ~ ۶۰ برای داشتن سرعت بهینه مناسب می‌باشد. نمودار فوق در شکل ۱۳ قابل مشاهده است.



شکل ۱۳- نمودار سرعت بر حسب زاویه فاز در دامنه‌های مختلف

جدول ۲- مشخصات هندسی کانال

ارتفاع	عرض	طول	هندسه کانال
۶۰	۸۰	۱۳۵	(cm)

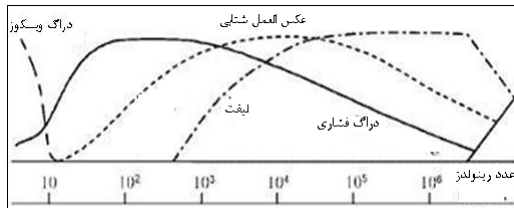


شکل ۱۱- نمایی از کانال بستر آزمایشگاهی

دوربین دیجیتالی که برای ثبت نتایج حرکت ماهی در این تست مورد استفاده قرار می‌گیرد با قابلیت ۳۰ فریم در ثانیه و دقت ۱۰ مگاپیکسل می‌باشد که به کمک آن کلیه حرکات ماهی در فرکانسهای مختلف ثبت می‌شود.

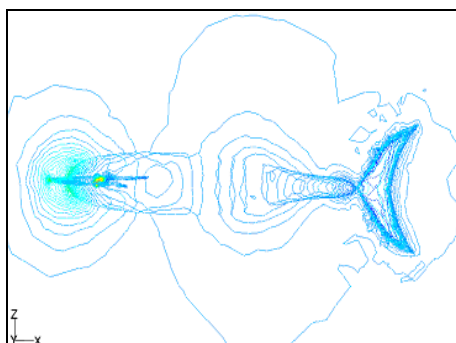
۳-۱-۲- تحلیل پارامترهای اولیه سینماتیکی

به منظور تحلیل نتایج استخراج شده از تست‌ها از برنامه مطلب جهت پردازش استفاده شده است. با توجه به اطلاعات استخراجی می‌توان گفت در هر فرکانس مشخص مدل تقریباً فواصل یکسانی توسط مدل در زمان‌های یکسان طی شده است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت سرعت مدل در هر فرکانس تقریباً ثابت است. نمودارهای سرعت بر حسب فرکانس در دو دامنه مشخص در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱۴- نیروهای وارده بر مدل ماهی

علاوه بر نیروهایی که در صفحه X-Y تولید می‌شود به علت پروفیل‌های فشار در دو طرف بدنه در صفحه X-Z نیروهای دیگر نیز خواهیم داشت که سبب مومنوم در جهت Z و یا به عبارتی حرکت یابو می‌شود. اما به علت اینکه این توزیع فشار در دو طرف تقریباً یکسان است پس مومنوم تولیدی ناشی از نیروهای عرضی در این جهت برابر است و باعث حذف مومنوم در جهت Z شده پس بدنه ماهی و در کل پایداری مناسبی در جهت Z خواهیم داشت (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- توزیع فشار در صفحه XZ

در این تست هدف تحلیل عملکرد روبات ماهی است که منظور از عملکرد روبات، اندازه‌گیری نیروی کل در صفحه X-Z در فرکانسهای مختلف و تحلیل آن به کمک جریان‌های اطراف و پشت بدنه ماهی می‌باشد. در حقیقت محاسبه مقدار دقیق نیروهای تراست و دراگ بسیار دشوار می‌باشد. با توجه به نتایج حاصله از بخش قبل مبنی بر ثابت بودن سرعت در فرکانسهای مختلف، می‌توان گفت نیروی کل مجموعه‌ای از نیروی دراگ و تراست می‌باشد. سیستمی که به این منظور طراحی شد در شکل زیر قابل مشاهده است.

جدول ۳- معرفی پارامترهای مهم در حرکت ماهی

نتایج و مقادیر اندازه‌گیری شده	
مقادیر	پارامترهای مورد تحلیل
1.76 ~ 2.23	فرکانس بهینه (HZ)
0.11 ~ 0.15	دامنه دم زدن (m)
0 ~ 60	دامنه فاز بهینه (degree)
0.396	عدد استروهاال
0.02 ~ 0.06	فاصله ویک تولیدی (m)
0.24 ~ 0.39	سرعت شنا کردن (m/s)

در جدول ۳ پارامترهای مهم و کاربردی در حرکت ماهی قابل مشاهده است که این نتایج از طریق تست‌های انجام شده بر روی مدل روبات ماهی حاصل شده است.

۳-۲- انجام تست به منظور اندازه‌گیری پارامتر نیرو

زمانیکه ماهی در آب حرکت می‌کند نیروهای مختلفی ناشی از دم زدن بر آن اثر می‌کند که شامل دراگ، وزن، بویانسی و لیفت هیدرودینامیکی می‌باشد که در جهت عمودی وارد می‌شود. نیروی دراگ شامل دراگ ویسکوزیته و دراگ فشاری است. دراگ ویسکوزیته همان نیروی اصطحاکاکی است که بین ماهی و لایه مرزی آب اثر می‌کند و این نیرو به سطح خیس شده و سرعت شنا کردن ماهی و خواص سیال احاطه کننده بستگی دارد. دراگ فشاری هم از اعوجاج سیال اطراف ماهی و انرژی از دست رفته ناشی از ورتکسهای پشت ماهی ناشی می‌شود که این ورتکسها سبب تولید نیروی تراست می‌شود. با توجه به شکل ۱۴ می‌توان گفت در رینولدزهای بالا دراگ فشاری کاهش و لیفت و شتاب افزایش می‌یابد [۴]. در اینجا با توجه به رینولدز محاسبه شده برای مدل موردنظر می‌توان گفت نیروی لیفت بیشتری بر مدل وارد می‌شود.

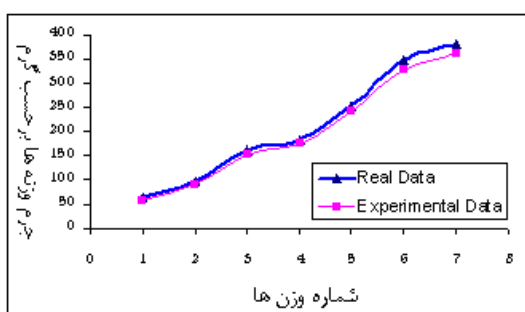
قبل از نصب مدل ابتدا سیستم را به روش ساده‌ای تست کرده تا دقت آنرا بسنجیم.

۳-۲-۱- بررسی دقت بستر آزمایشگاهی

برای اطمینان حاصل کردن از عملکرد صحیح سیستم، کالیبراسیون بستر آزمایشگاهی انجام گرفت. در این مرحله وزنه‌هایی مشخص به محل اثر نیرو وارد و در هر مرحله نتایج توسط سیستم اندازه‌گیری ثبت گردید. در نهایت نتایج ثبت شده توسط ترازو با نیروهای وارده مقایسه شد. جدول ۴ لیستی از نیروهای اعمال شده را نشان می‌دهد. نتایج حاصله نشان می‌داد که سیستم از خطای کمی (در حدود ۱-۶ گرم و خطایی کمتر از ۰.۵٪) برخوردار است. نتایج ناشی از تست در نمودار زیر قابل مشاهده است (شکل ۱۸).

جدول ۴- مشخصات وزنه‌های بکار گرفته شده

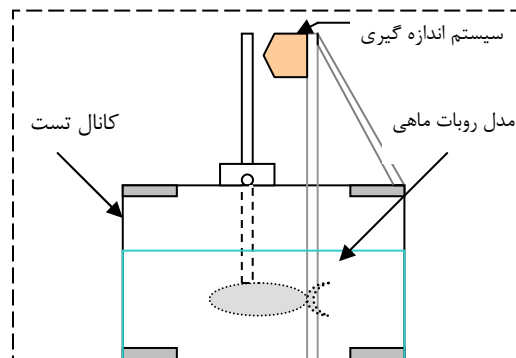
تعداد وزنه‌ها	7	6	5	4	3	2	1
مقادیر وزنه‌ها	380	346	254	184	162	98	64



شکل ۱۸- نمودار داده‌ها و نتایج تست عملکرد

جدول ۵- مقایسه مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شده

نیرو ثبت شده توسط ترازو (گرم)	نیروی اعمال شده به ترازو (گرم)	مقادیر وزنه‌ها (گرم)	تعداد وزنه‌ها
۵۶	۵۸	۶۴	۱
۹۲	۹۳	۹۸	۲
۱۵۴	۱۵۳/۷۹	۱۶۲	۳
۱۸۰	۱۷۴	۱۸۴	۴
۲۴۰	۲۴۱	۲۵۴	۵
۳۳۲	۳۲۸	۳۴۶	۶
۳۶۲	۳۶۰	۳۸۰	۷



شکل ۱۶- نمای ترسیمی سیستم

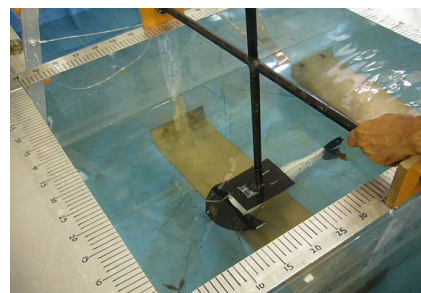
این سیستم تشکیل شده است از یک بخش صلیبی که با استفاده از سیستم بلبرینگ آزادانه بر روی کانال حرکت می‌کند و مدل به گونه‌ای به آن متصل می‌شود که تنها توانایی حرکت در راستای افقی را داشته باشد. بخش بعدی آن دستگاه اندازه‌گیری نیرو بوده که در راستای حرکت ماهی نصب می‌شود.



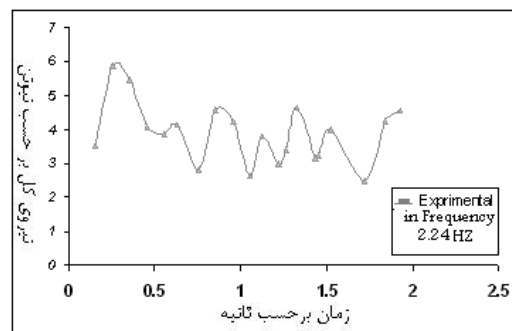
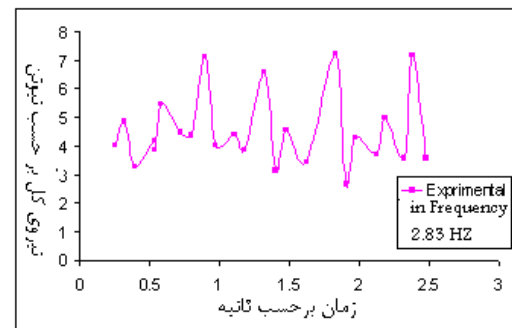
شکل ۱۷- وزنه‌های مورد استفاده برای تست

۳-۲-۲- اندازه گیری پارامتر نیرو

پس از اطمینان از صحت سیستم اندازه گیری، مدل روبات ماهی را نصب کرده و تست های مورد نظر در فرکانس های از پیش تعیین شده انجام می شود. پس از اتمام تست نتایج به صورت نمودار نیرو در جهت X بر حسب زمان در فرکانس های ذکر شده استخراج می گردد (شکل ۲۰). با توجه به اینکه حرکت ماهی ماهیت سینوسی دارد و دستگاه هم در حین حرکت ارتعاش خواهد داشت بنابراین نیرو اندازه گیری شده توسط ترازو هم متغیر و تقریباً سینوسی خواهد بود.



شکل ۱۹- نصب مدل به همراه سیستم در کانال



شکل ۲۰- نمودار نیرو بر حسب نیوتن در واحد زمان در دو فرکانس مختلف ۲/۲۴ و ۲/۸۳ هرتز

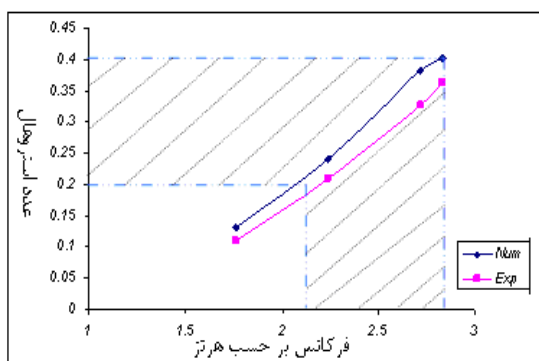
۴- مقایسه نتایج حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی مدل میکرو روبات دریایی

هدف در این بخش مقایسه نتایج شبیه سازی رفتار ماهی با نتایج تجربی و همچنین بررسی نتایج بدست آمده از روش های فوق می باشد. این مقایسه در قالب بررسی پارامترهای موثر در رفتارهای هیدرودینامیکی ماهی می باشد. پارامترهای قابل قیاس شامل عدد استروهل و ضریب نیروی کل در جهت X می باشد که در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. عدد استروهل به عنوان پارامتری مهم در ارزیابی میزان دنباله تولیدی در انتهای ماهی و اثر آن در تولید دراگ و کنترل آن باشد. عدد استروهل به صورت زیر قابل تعریف است:

$$St = \frac{f \cdot d}{U} \quad (1)$$

بطوریکه f فرکانس دم زدن بر حسب هرتز (Hz) و d دامنه دم زدن بر حسب (m) و U سرعت پیشروی ماهی بر حسب (m/s) می باشد. تحقیقات مختلف انجام شده در رابطه با این عدد نشان می دهد که در محدوده (۰/۴-۰/۲) بازده عملکردی روبات ماهی بهینه می باشد [۵].

در نمودار مربوطه این محدوده مشخص شده است و با استفاده از آن می توان فرکانس های مناسب برای بازده بهینه را مشخص کرد.

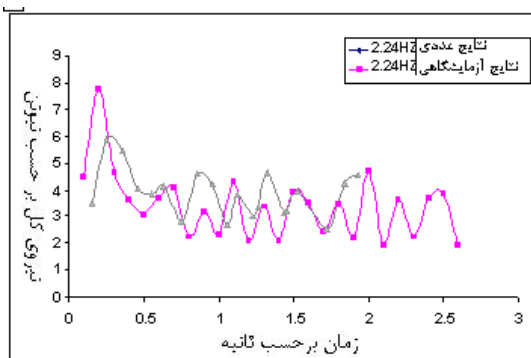
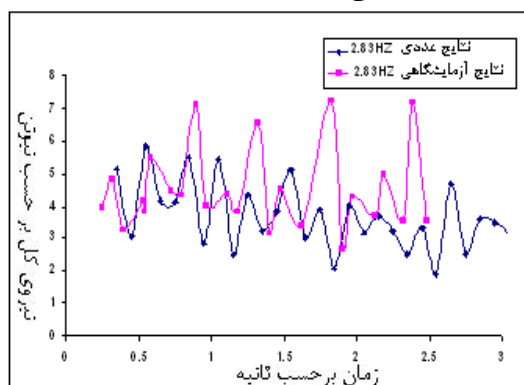


شکل ۲۱- نمودار عدد استروهل بر حسب فرکانس دم زدن

می باشد که با استفاده از نتایج حاصل از تست در دو فرکانس مشخص در نظر گرفتن رابطه کلی نیرو در جهت X ، محاسبه می شود. نیروی برآیند در جهت X در دو فرکانس مختلف بر حسب زمان رسم و با نتایج عددی مقایسه گردیده است (شکل ۲۳).

با توجه به نمودار فوق می توان نتیجه گرفت که نیرو برآیند در جهت X در فرکانس $2/83$ (HZ) بیشترین مقدار و در فرکانس $1/76$ (HZ) کمترین مقدار را داراست که نتایج ناشی از نمودار فوق شبیه نمودار قبل است با این تفاوت که نتایج از خطا کمتری برخوردار بوده و همخوانی بیشتری بین نتایج برقرار است. نموداری که در اینجا می توان برای معتبر سازی ارائه داد مقایسه نمودار های نیروی برآیند در جهت X بر حسب زمان در فرکانس $2/24$ و $2/83$ (HZ) می باشد.

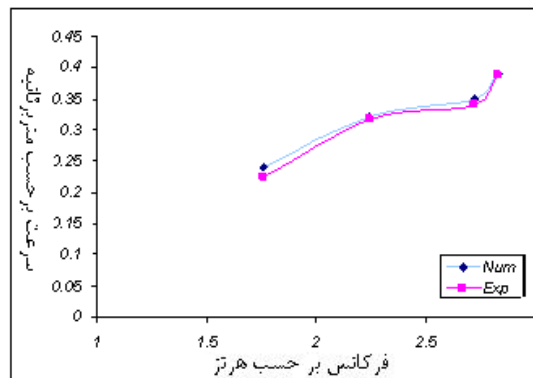
در شکل ۲۴ این مقایسه قابل مشاهده است که میانگین خطا در شکل (۲۴-الف) حدود 15% و در شکل (۲۴-ب) حدود 10% می باشد.



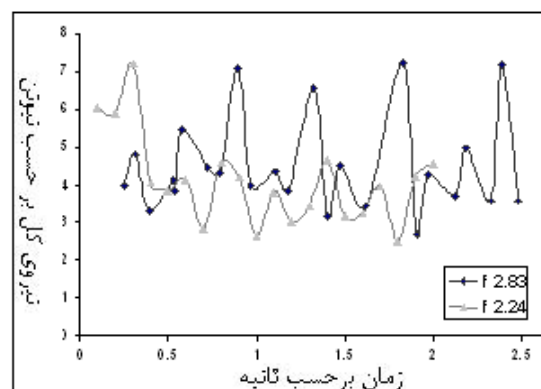
شکل ۲۵- مقایسه نیرو برآیند در جهت X در دو حالت

عددی و تجربی

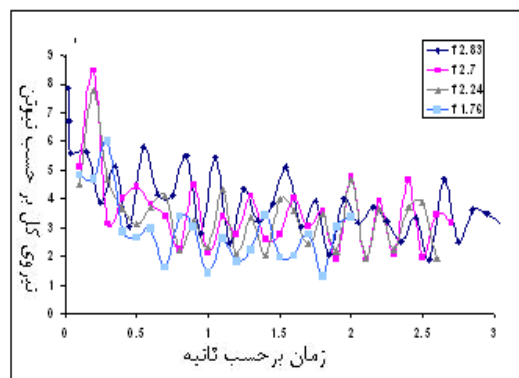
(الف) فرکانس $2/83$ هرتز (ب) فرکانس $2/24$ هرتز



شکل ۲۲- نمودار سرعت بر حسب فرکانس دم زدن



شکل ۲۳- نمودار نیرو برآیند در جهت X بر حسب زمان حاصل از آزمایش در دو فرکانس تست شده



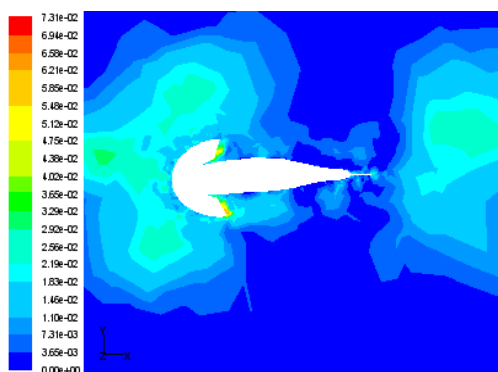
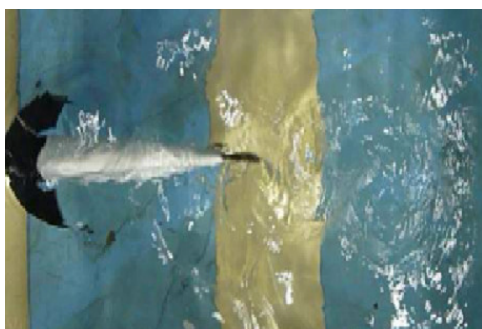
شکل ۲۴- نمودار نیرو برآیند در جهت X بر حسب زمان حاصل از نتایج عددی در دو فرکانس تست شده

در جدول ۵ پارامترهای سرعت و عدد استروهال در فرکانس های تست شده به همراه میزان خطا گزارش شده است. پارامتر بعدی نیروی برآیند در جهت X

جدول ۶ - جدول مقایسه‌ای بین پارامترهای اندازه گیری شده در حالت عددی و تجربی

مرحله چهارم	مرحله سوم	مرحله دوم	مرحله اول		
۲.۸۳	۲.۷۲	۲.۲۴	۱.۷۶	(HZ)	فرکانس
۰.۳۶۲	۰.۳۲۶	۰.۲۱	۰.۱۱	(-)	عدد استروهاال (نتایج آزمایشگاهی)
۰.۴۰۲	۰.۳۸۲	۰.۲۳۹	۰.۱۳۰۶	(-)	عدد استروهاال (حل عددی)
۹.۷۹۰	۱۴.۷۵	۱۲.۸۶	۱۵.۷۹۳	(-)	درصد خطا(%)
۰.۳۹	۰.۳۵	۰.۳۲۲	۰.۲۴	(Ls ⁻¹)	سرعت شنا کردن (نتایج آزمایشگاهی)
۰.۳۸۷	۰.۳۴۱	۰.۳۱۸	۰.۲۲۵	(Ls ⁻¹)	سرعت شنا کردن (حل عددی)
۰.۷۶۹	۲.۵۷۲	۱.۲۴۲	۶.۲۵	(-)	درصد خطا(%)

نیروی تراست بیشتری تولید می کند. در شکل ۲۵ ورتکس‌های تولیدی در دو حالت واقعی و شبیه‌سازی شده قابل مشاهده می باشد.



شکل ۲۶- ورتکس‌های تولید شده در اطراف مدل

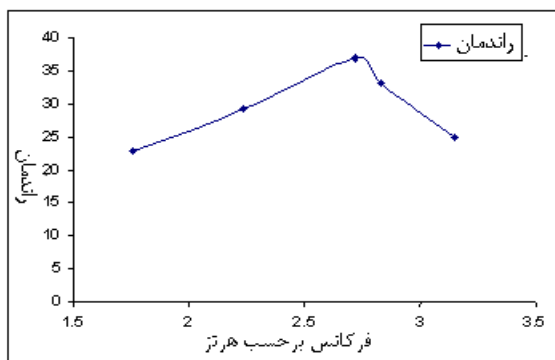
با بررسی نمودارهای فوق می توان نتیجه گرفت نتایج حل نرم افزاری با خطای قابل قبولی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک می باشد و در این صورت می توان گفت روش نرم‌افزاری به عنوان روشی معتبر برای تحلیل پارامترهای دیگر ناشی از رفتارهای هیدرودینامیکی مدل روبات ماهی که امکان انجام تست برای آن مهیا نیست قابل استفاده می باشد.

۵- نتایج استخراجی از شبیه‌سازی سه بعدی در حالت دم زدن ماهی

پارامترهای قابل بررسی به کمک مدل شبیه سازی شده به شرح زیر می باشد :

۵-۱- مشاهده ورتکس‌های تولید شده در پشت ماهی و توزیع فشار ناشی از آن بر روی دم

در این مرحله برای شبیه‌سازی ورتکس در انتهای روبات از حل معادله ناویر استوکس و مدل Eddy simulation استفاده شده است. به علت حرکت هماهنگ سر و دم در این دو ناحیه ورتکس تولید می شود این پدیده در موجودات دم زن به علت تولید نیروی تراست از اهمیت زیادی برخوردار است. هرچه فاصله بین گردابه‌ها کمتر باشد جت تولیدی

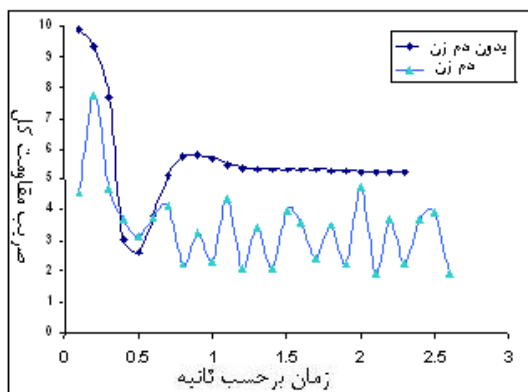


شکل ۲۸- نمودار بازده بر حسب فرکانس

۳-۵- مقایسه ضریب درگ در حالت بدون دم زدن و

دم زدن

یکی دیگر از نتایج قابل استخراج از نمودارها ضریب درگ بر حسب زمان در حالت سه بعدی بدون دم زدن و در حالت دم زدن می باشد. با توجه به این نمودار می توان نتیجه گرفت که ضریب درگ در حالت بدون دم زدن پیک بزرگی دارد و پس از آن مقدار ثابت و برابر ۵ نیوتن خواهد داشت. در حالیکه در هنگام دم زدن مقدار ضریب درگ کمتر و به صورت نوسانی می باشد. نتیجه ای که می توان از این نمودار استخراج کرد آن است که به طور کلی زمانیکه مدل از سیستم رانش دم خود استفاده می کند درگ کمتر و در حالتیکه به صورت مستقیم و بدون دم زدن حرکت می کند درگ بیشتری تولید می شود. حالت نوسانی نمودار نیز این مفهوم را بیان می کند که پیک های مثبت به صورت نیروی مفید یعنی تراست و پیک های منفی به صورت نیروی غیر مفید یعنی درگ اثر می کنند.



شکل ۲۹- مقایسه نمودار ضریب درگ در دو حالت بدون دم زن و دم زن در حالت سه بعدی

۵-۲- اثر رفتار ماهی بر روی بازده آن

یکی دیگر از پارامترهای مهم و قابل بحث برای مدل روبات ماهی بازده موثر آن می باشد. بازده برای مدل ماهی را می توان به صورت رابطه زیر در نظر گرفت:

$$\eta = \frac{P_E}{P_P} \quad (2)$$

در رابطه فوق P_E توان مفید یا توان رانشی ماهی می باشد.

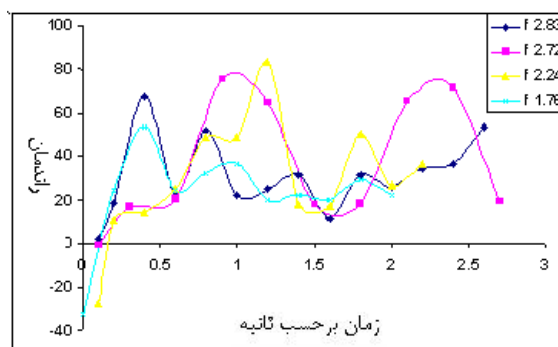
$$(P_E = U \times T_A) \quad (3)$$

بطوریکه T_A تراست میانگین^۸ و U سرعت ثابت رو به جلو در نظر گرفته می شود.^۹

$$P_P \equiv P_I + P_E + P_W \quad (4)$$

که در این رابطه P_P توان خالص تولیدی توسط موتور^{۱۰}، P_L تلفات مکانیکی^{۱۱}، P_W توان تلف شده ناشی از ورتکس های تولیدی^{۱۲} می باشد.

شکل ۲۶ مربوط است به نمودار بازده موثر بر حسب فرکانس های مختلف می باشد که با توجه به این نمودار می توان گفت در بازده زمانی ۳۰ تا ۳۰ ثانیه بیشترین مقدار بازده مربوط به فرکانس های ۲.۲۴ و ۲.۷۲ هرتز می باشد. برای بررسی بیشتر تاثیر حرکت بر روی بازده، نمودار بازده بر حسب فرکانس در شکل ۲۷ ارائه شده است. در این نمودار پیک بازده در فرکانس ۲.۷۲ هرتز می باشد و همانطور که انتظار می رود قبل از فرکانس ۲ و بعد از فرکانس ۳ هرتز بازده کاهش می یابد.



شکل ۲۷- نمودار بازده بر حسب زمان در فرکانس های محاسبه شده

۶- نتیجه گیری

هدف اصلی این تحقیق آنالیز هیدرودینامیکی یک روبات ماهی و مقایسه نتایج با تست های آزمایشگاهی می باشد.

در این مطالعه، حرکات و رفتارهای مدل روبات ماهی موجود در آزمایشگاه سیستم های دینامیکی و کنترلی دانشگاه تهران به کمک نرم افزار شبیه سازی شده است. مقایسه مدل شبیه سازی شده با مدل آزمایشگاهی نتایج قابل قبولی را ارائه نمود. به کمک این مدل شبیه سازی شده می توان عکس العمل روبات ماهی را در شرایط مختلف پیش بینی کرد و علاوه بر آن می توان پارامترهای مورد نظر هیدرودینامیکی و کنترلی را بر روی مدل تست کرد و عکس العمل روبات را نسبت به آن مشاهده نمود. به کمک این مدل شبیه سازی حوزه فرکانس حرکت ماهی که در آن حداکثر نیروی فشار بر روی بدنه ماهی وارد می شود قابل شناسایی می باشد. علاوه بر آن رسم توزیع فشار بر روی بدنه روبات ماهی در جهت صفحات X-Y و X-Z رسم موقعیت ماکزیمم فشار وارده بر روی بدنه اندازه گیری شد.

همچنین از طریق تحلیل حرکت زاویه دم زدن مدل توانستیم زاویه استال در یک دوره تناوب را تعیین و ماکزیمم نیروی لیفت موثر بر روی دم را استخراج نماییم.

از دیگر نتایج مهم قابل بحث رسم نمودار بازده بر حسب فرکانس می باشد که از طریق تعیین فرکانس مربوط به بیشینه بازده می توان رفتار روبات ماهی را بهینه کرد. همچنین با اندازه گیری ضرایب درگ در دو حالت بدون دم زدن و حالت دم زدن نشان دادیم زمانیکه مدل از سیستم رانش دم زدن استفاده می کند نیروی درگ کمتری نسبت به حالت حرکت ساده خود تولید می کند.

کلید واژگان

1-BCF
2-MPF
3-Smoothing
4-Remeshing
5-Wake

۷- مراجع

- 1-Shadwick, R.E., Lauder, G. V., Fish Biomechanics.
- 2-Listak, M., Martin, G., (2003), Design of a Semiautonomous Biomimetic Underwater Vehicle for Environmental Monitoring.
- 3-Colgate, E., Kevin, J., (2004), Mechanics and Control of Swimming, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol 29.
- 4-Mittal, R., (2004), Computational modeling in biohydrodynamics: Trends, challenges, and recent advances, IEEE J. Oceanic Engineering, Vol 29, pp.595-604.
- 5-Triantafyllou, M. S., Techet, A. H and Hover, F. S., (2004), Review of experimental work biomimetic foils, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 29, pp. 585-594.
- 6-Long, J. H., Joseph, S., Nicholas, L., K. Mathieu, (2006), Four Flippers Tetrapodal Swimming with an Aquatic Robot, Bioinspiration & Biomimetics, vol. 1, pp. 20-29.
- 7-Hoar, W. S., Randall, D. J., Farrell, A. P., (2006), Fish Physiology, Academic Press, San Diego, vol. 23.
- 8-Tytell, D., (2004), The Hydrodynamics of Eel Swimming II, Journal of Experimental Biology, vol. 207, no. 19, pp. 3265-3279.
- 9-Yu, J., Wang, SH and Tan, M., (2005), A simplified propulsive model of bio-mimetic robot fish and its realization, Robotica Cambridge university, vol.23, pp.101-107.
- 10-Coombs, S.A., Van, S., Netten, M., Shadwick, R. and Lauder, G., (2006), The Hydrodynamics and Structural Mechanics of the Lateral Line System, Fish Physiology, Academic Press, San Diego, vol. 23, pp. 103-139.
- 11-Mohammadshahi, D., Yousefi-Koma, A., Bahmanyar, SH., Ghasemi, H., (2007), Design, Fabrication and Hydrodynamic Analysis of a Biomimetic

Robot Fish, International Journal of Mechanics.

12-Bahmanyar, SH., (2009), Hydrodynamic Analysis of a Biomimetic robot fish", Msc Thesis submitted to the School of Marine Engineering, Amir Kabir university of Technology, Iran, Tehran,.

13-Bahmanyar, SH., Yousefi-Koma, A., Ghasemi, H., Sheikhjafari, A., (2009), Investigation of flow mechanism of a robotic fish swimming with hydrodynamic force measurement, International Conference of Fluid Dynamics, Iran.

14-Mayahi, Yousefi-Koma, A., Maleki, H., (2007), Modeling of a Carangiform Robo-Fish Simulation and Experiment, Conference on Mechanical Engineering- ISME.