توسعه یک مدل سه بعدی روبات ماهی و مقایسه آزمایشگاهی نتایج

شهناز بهمنیار[1*]، عقیل یوسفی‌کما[2] ، حسن قاسمی[3]

۱- کارشناس ارشد هیدرومکانیک، دانشکده مهندسی کشتی‌سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی کشتی‌سازی 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 می‌توان 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 رانش‌های مرسوم هستند ورتکس های کمتری تولید می‌کنند.

هدف اصلی از این تحقیق، شبیه‌سازی رفتار یک روبات ماهی با عملکرد هیدرودینامیکی مناسب می‌باشد. بدین منظور نوعی از این روبات ماهی که در آزمایشگاه سیستم‌های دینامیکی و کنترلی پیشرفته دانشگاه تهران ساخته شده است مورد شبیه‌سازی قرارگرفت. در اینجا برای شبیه‌سازی مدل از معادلات ناویر استوکس و روش شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ(LES) استفاده شده و برای تحلیل مدل در حالت دم زدن نیز از روش مش‌بندی 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 شبیه‌سازی مقایسه شده‌اند که حاکی از انطباق نسبتا مناسب نتایج می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان از مدل شبیه‌سازی شده به منظور بهینه‌سازی و بررسی پارامترهای مورد نیاز استفاده کرد. این امر باعث کاهش هزینه‌های سعی و خطا در ساخت و آزمایش خواهد شد.

کلمات کلیدی: روبات ماهی، شبیه‌سازی عددی، مش‌بندی دینامیکی، روش شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ

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

Sh. Bahmanyar[1], A. Yousefi-Koma[2], H. Ghasemmi[3]

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]

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 بهره گیری از طبیعت به عنوان روشی برای گسترش تجهیزات و تکنولوژی‌های جدید می‌باشد. این پیشرفت در زمینه‌های مختلفی از جمله صنایع دریایی و روباتیک قابل مشاهده است. بهره‌گیری از مدل‌هایی با الهام از طبیعت به عنوان روشی است برای افزایش بازده و خواص حرکت که توسط مهندسین و زیست شناسان مورد بررسی قرار می‌گیرد. این تصادفی نیست که اشکال زیردریایی‌ها با تقلید از ماهی‌ها و سایر آبزیان طراحی می‌شود. می توان 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 حباب هایی ناشی از پدیده کاویتاسیون می‌شود که سبب شناسایی آنها در سرعت‌های بالا می گردد و راه حلی که در اینجا ارائه می‌گردد، استفاده از سیستم‌های پیشرانی است که ماهی ها به منظور حرکت و مانوردهی از آنها استفاده می‌کنند. چنین قابلیت حرکتی محققان را به سمت بهتر کردن بازده سیستم‌های روباتیک آبزی 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 مطالعه‌ی 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 روبات ها متمرکز بوده است. در حال حاضر مکانیزم سینماتیک و هیدرودینامیک دقیق برای ایجاد و شبیه‌سازی این

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]

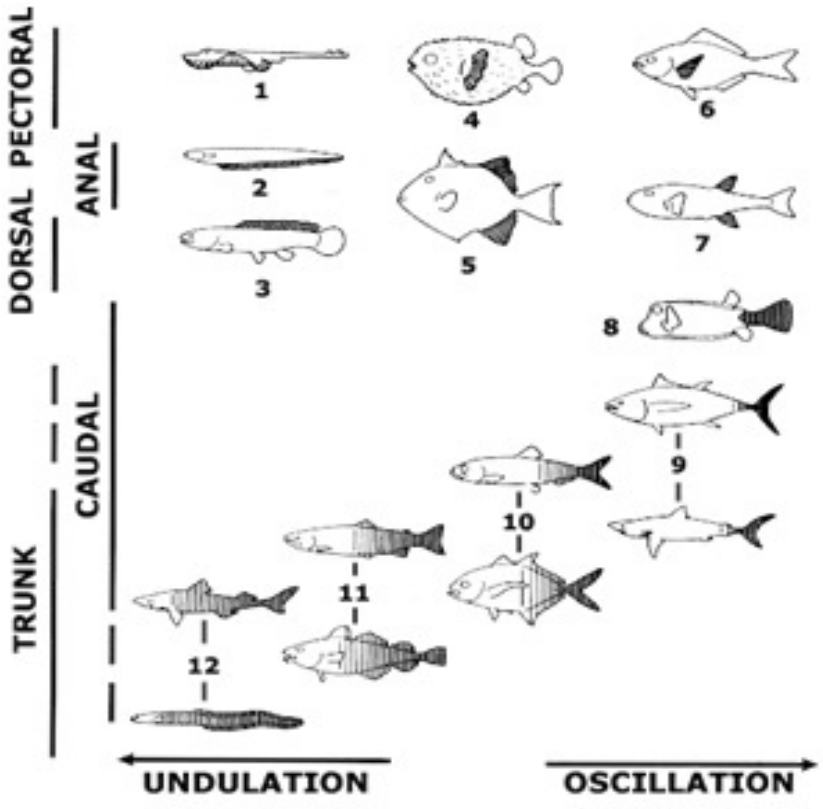
حالت‌ها موجود نیست. لذا مدل کردن رفتارهای متغیر در روبات ماهی موضوع اصلی رقابت است [۵-۲].

در همین راستا و به منظور شناخت دقیق و در دست داشتن اطلاعات مفید از نحوه حرکت ماهی‌ها، مطالعاتی پایه‌ای بر روی عملکرد آنها صورت گرفته است. می‌توان حرکت ماهی‌ها را به دو دسته مهم تقسیم کرد: ماهی‌هایی که فشار را عمدتاً به وسیله‌ی بدن و یا حرکت دم به وجود می‌آورند[۱] و دسته‌ای دیگر که برای حرکت، عمده فشار خود را به وسیله‌ی باله‌های میانی و جفت‌هایی که در قسمت سینه دارند تولید می‌کنند[۲].

با وجود اینکه دم از بهترین نیروهای پیشران (بنابر مطالعه‌های شماری از گونه‌ها) می باشد، تقریباً ۱۵٪ ماهی‌ها در دسته دوم و مابقی در دسته اول قرار دارند. در شکل ۱ می‌توان این دسته‌بندی را مشاهده کرد.

در این تحقیق هدف ارائه مدل شبیه‌سازی شده نمونه ماهی ساخته شده در آزمایشگاه سیستم‌های کنترلی و دینامیکی پیشرفته دانشگاه تهران (ADCSL) می‌باشد که به کمک نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی FLUENT در حالت سه بعدی با کمک معادلات ناویر استوکس و استفاده از روش شبیه‌سازی ادیجهای بزرگ و با تقلید از حرکت واقعی ماهی شبیه‌سازی 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 می‌باشد.



شکل ۱- دسته بندی ماهی‌ها به دو دسته اصلی

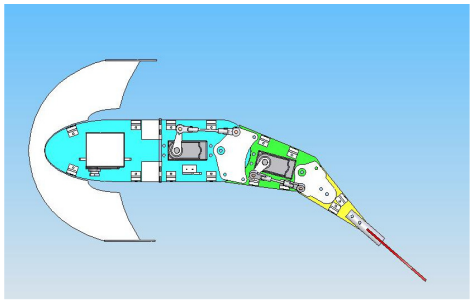
[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]

۲- مدل آزمایشگاهی روبات ماهی ADCSL

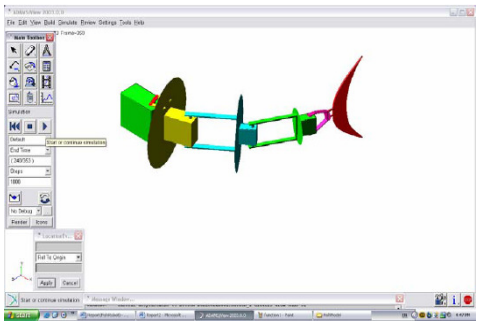
نمونه ساخته شده نوعی روبات است که با الهام از طبیعت کوسه کله چکشی طراحی وساخته شده است. حرکت نمونه فوق برپایه کرانگی فرم می باشد که در این روش حرکت، ماهی به کمک یک سوم قسمت انتهای بدن خود نیروی پیشران تولید کرده و به جلو حرکت می‌کند. این نوع حرکت را می توان به دو بخش تقسیم کرد، حالت اول به صورت شنای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

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 سروو موتور به جلو حرکت می‌کند و می‌چرخد. حرکت بالا و پایین با استفاده از حرکت سر و به کمک سروموتور موجود در این منطقه صورت می‌گیرد. با این مدل می‌توان الگوهای متنوع حرکتی را شبیه‌سازی کرد. دو سروموتور به عنوان تأمین‌کننده‌ی نیروی پیشران می‌باشند که یکی بر روی باله‌ی 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 نرم‌افزار ADAMS به منظور مدلسازی مکانیزم‌های حرکتی و اجزاء صلب و تعیین ساختار اصلی روبات استفاده شده است که نتایج نهایی مدل‌سازی در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۳- نمایی از طرح اولیه روبات در نرم‌افزار 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 می‌دهد. 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 بدنه‌ی ماهی نصب شده است صورت می‌گیرد. این دوربین یک گیرنده‌ی LCD دارد که در محیط بسته تا ۳۰ متر و در محیط باز تا ۲۰۰ متر قابلیت دریافت تصویر دارد. به منظور کنترل میکروزیردریایی از یک رادیو کنترلر ۶ کاناله با واسطه‌ی میکروکنترلر استفاده شده است. رفتارهای مشخصی همچون ایجاد اختلاف فازبه کمک حرکت سر برای

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]

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 واندازه 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 ٦- نمایی از مدل پس از ساخت و به آ ب‌اندازی

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 آودن 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 شبیه سازی 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 می پردازیم.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]

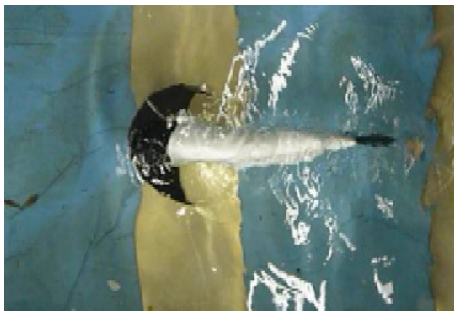
۲-۱- استفاده از گزینه دینامیک مش برای شبیه سازی

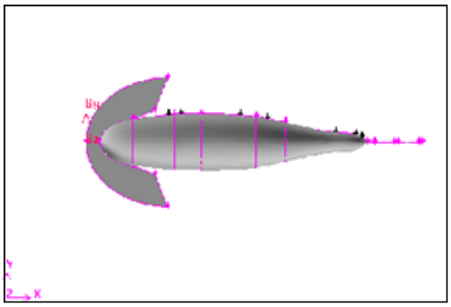
زمانی که یکی از مرزها متحرک باشد، شکل جسم نسبت به زمان تغییر می‌کند. بنابراین لازم است در هر لحظه از حل، شبکه‌بندی تغییر کند. برای حل اینگونه مسائل روش‌های متفاوتی وجود دارد از جمله روش یکنواخت‌سازی فنری[۳] و روش المان‌بندی مجدد[۴]، که در اینجا از روش المان‌بندی مجدد به منظور شبیه سازی مدل مورد نظر استفاده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

۲-۲- نتایج ناشی از شبیه‌سازی روبات ماهی

در این بخش هدف شبیه‌سازی رفتار مدل روبات ماهی موجود در آزمایشگاه می‌باشد. مدل شبیه‌سازی شده با توجه به کلیه ابعاد و اندازه‌های اصلی مدل واقعی است. برای طراحی اولیه به کمک روش ابتکاری اسکن نقطه‌یابی صورت گرفت و سپس با استفاده از نرم‌افزار Solid works طرح اولیه آن رسم شد. در شکل ۷ طرح اولیه مدل روبات ماهی در نرم‌افزار قابل مشاهده است. بعد از ایجاد طرح سه بعدی مدل ماهی در این نرم‌افزار، مهمترین و دقیق‌ترین بخش تولید مش است.

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



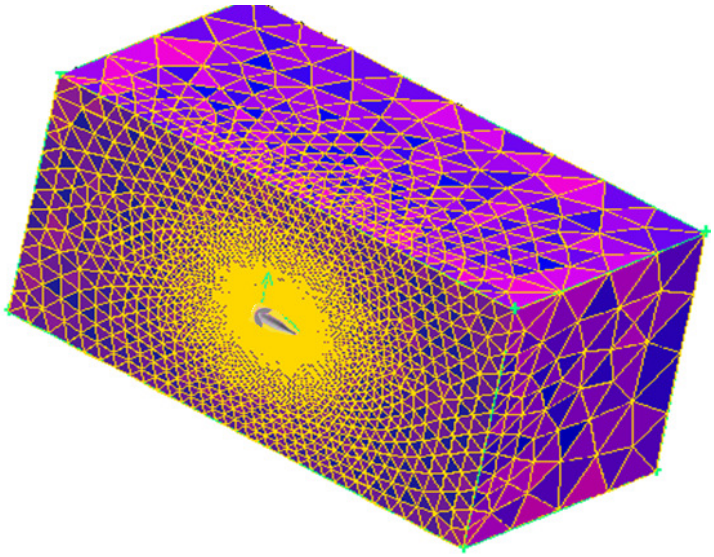


شکل ۷- مدلسازی سه بعدی اولیه روبات ماهی

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 نظرگرفتن سرعت در محدوده محاسباتی فرض شده است. هدف از انجام محاسبات بررسی پاسخ پس از رسیدن به شرایط پایدار می‌باشد. مدل سه بعدی مش بندی شده در شکل ۸ قابل مشاهده است که با توجه به این شکل می‌توان گفت مش‌های نزدیک بدنه ریزتر و به سمت دیواره مش‌ها درشت‌تر می‌شود که سبب افزایش دقت حل شده و زمان حل را کاهش می‌دهد.

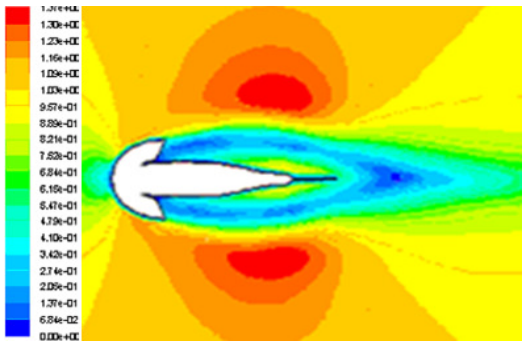
نتایج ناشی از حل مسئله هم در حالت دو بعدی و هم سه بعدی بررسی شده است اما با توجه به اینکه هدف اصلی ما شبیه‌سازی مدل روبات ماهی موجود در آزمایشگاه می‌باشد نیاز است که کلیه شرایط واقعی حاکم بر مدل اصلی و حالت سه بعدی و حرکت در حال دم زدن بررسی شود و تحلیل نتایج حرکت دوبعدی صرفا برای استخراج یکسری اطلاعات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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]

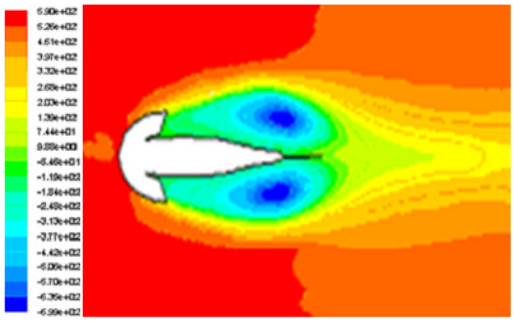


شکل ۸- مش بندی سه بعدی اطراف مدل، بطوریکه در نزدیکی مدل مش‌ها ریزتر و در فواصل دورتر مش‌ها درشتر می‌باشد

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

با توجه به شکل (a-۹) 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 کناره ها سرعت به شدت افزایش می‌یابد. این کاهش سرعت در سر در شکل شکل (b-۹) به صورت افزایش فشار نشان داده شده بطوریکه هر چه به سمت کناره‌ها می‌رویم فشار کاهش می‌یابد. با عبورسیال 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.

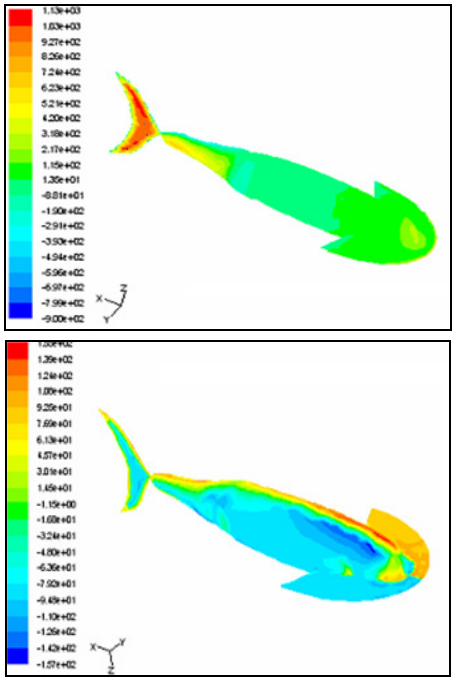
زمانیکه فشار در جهت جریان افزایش یابد نیروی مقاوم در برابر حرکت سیال در داخل لایه مرزی علاوه بر نیروی اصطکاک شامل نیروی فشار هم می‌باشد. بنابراین سرعت سیال کاهش می‌یابد و حتی ممکن است به صفر برسد و منفی شود که در این حالت لایه مرزی از مرز جدا می‌شود. در این حالت جریان سیال معکوس شده و نقطه جدایش اتفاق 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]

واقعی این مقدار ثابت نیست بلکه از مقدار صفر شروع شده و به مقدار ماکزیمم خود می رسد و دوباره صفر می گردد که تابع آن بستگی به مکانیزم های 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 برنامه ای به زبان C به هر مفصل داده شده است. بدین ترتیب می‌توان حرکت دم زدن را برای مدل شبیه‌سازی کرد. در شکل های (a-۱۰) و (b-۱۰) 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 می کند 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

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 محیط های آبی ایفا می کند. بطور کلی دانشمندان با اندازه گیری‌های 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 ماهی ها اثر هیدرودینامیکی به خصوصی بر روی رانش دارد که سبب کاهش دراگ نیز می گردد.

۳-۱- سینماتیک حرکت روبات ماهی

بستر آزمایشگاهی مورداستفاده 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.

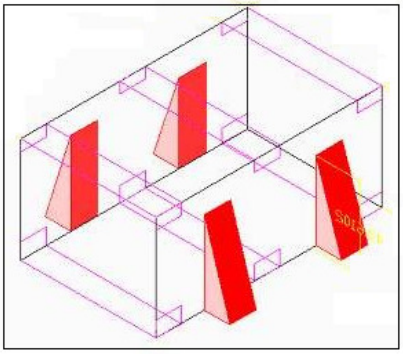
۳-۱-۱- معرفی تجهیزات مربوط به تست و اندازه‌گیری پارامترهای اولیه

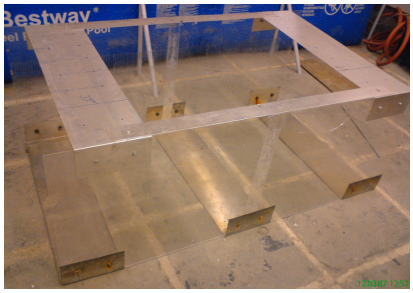
این سیستم شامل کانالی با ابعاد ۶۰ ×۸۰ ×۱۳۵ سانتی مترمکعب می باشد که از جنس ورقه‌های آلومینیومی بوده، به همین علت سبک و حمل و نقل آن آسان می باشد. کانال موجود در استخری به حجم ۱۰۰×۲۰۰×۳۰۰ سانتی متر مکعب قرار گرفته است. موقعیت کانال در استخر بگونه‌ای در نظر گرفته شده است که ماهی قبل از کانال در استخر شروع 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]

جدول ۲- مشخصات هندسی کانال

ارتفاع	عرض	طول	هندسه کانال
۶۰	۸۰	۱۳۵	(cm)





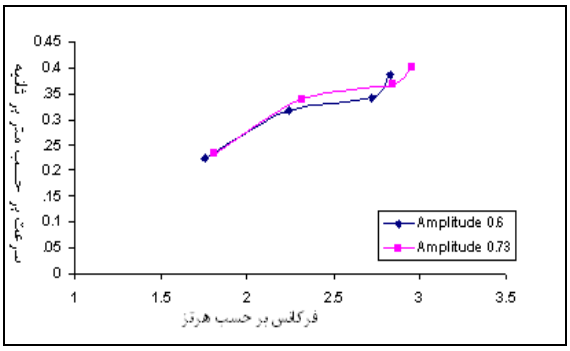
شکل ۱۱- نمایی از کانال بستر آزمایشگاهی

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

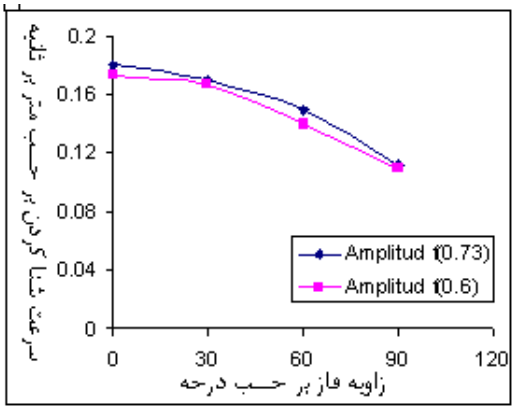
به منظور تحلیل نتایج استخراج شده از تست‌ها از برنامه مطلب جهت پردازش استفاده شده است.

با توجه به اطلاعات استخراجی می‌توان گفت در هر فرکانس مشخص مدل تقریبا فواصل یکسانی توسط مدل در زمان‌های یکسان طی شده است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت سرعت مدل در هر فرکانس تقریبا ثابت است . نمودارهای سرعت برحسب فرکانس در دو دامنه مشخص در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.



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 بازه های دیگر کاهش نرخ سرعت را به همراه دارد. به منظور شناسایی بهترین محدوده برای سرعت، فرکانس بهینه ای[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 دامنه های 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]

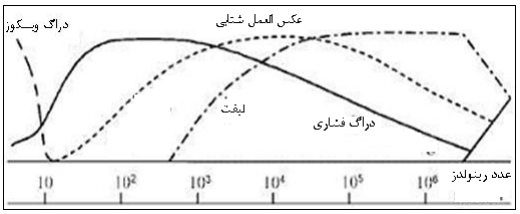
جدول۳- معرفی پارامترهای مهم در حرکت ماهی

نتایج و مقادیر اندازه گیری 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 استروهال
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.

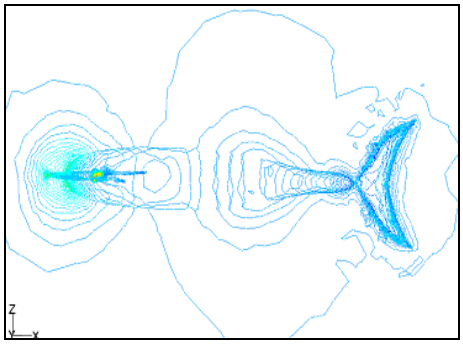
۳-۲- انجام تست به منظور اندازه گیری پارامتر نیرو

زمانیکه ماهی در آب حرکت می‌کند نیروهای مختلفی ناشی از دم زدن بر آن اثر می‌کند که شامل دراگ، وزن، بویانسی و لیفت هیدرودینامیکی می باشد که در جهت عمودی وارد می شود. نیروی دراگ شامل دراگ ویسکوزیته و دراگ فشاری است. دراگ ویسکوزیته همان نیروی اصطحکاکی است که بین ماهی و لایه مرزی آب اثر می کند 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 می یابد [۴] . در اینجا با توجه به رینولدز محاسبه شده برای مدل موردنظر می‌توان گفت نیروی لیفت بیشتری بر مدل وارد می‌شود.



شکل ۱۴- نیروهای وارده بر مدل ماهی

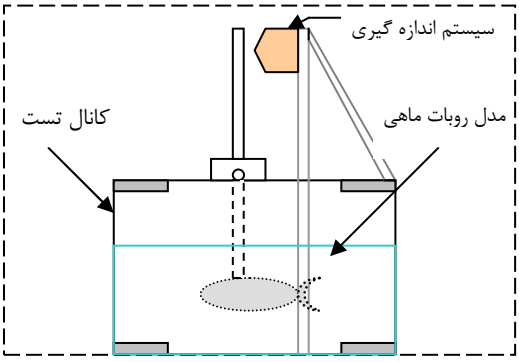
علاوه بر نیروهایی که در صفحه x-y تولید می‌شود به علت پروفیل‌های فشار در دو طرف بدنه در صفحه x-z نیروهای دیگر نیز خواهیم داشت که سبب مومنتوم در جهت Z و یا به عبارتی حرکت یاو می شود. اما به علت اینکه این توزیع فشار در دو طرف تقریبا یکسان است پس مومنتوم تولیدی ناشی از نیروهای عرضی در این جهت برابر است و باعث حذف مومنتوم در جهت Z شده پس بدنه ماهی و در کل پایداری مناسبی در جهت Z خواهیم داشت (شکل۱۵).



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 جریان های 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 می باشد. سیستمی که به این منظور طراحی شد در شکل زیر قابل مشاهده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]



شکل ١٦- 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 بگونه ای 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 ١٧- وزنه‌های مورد استفاده برای تست

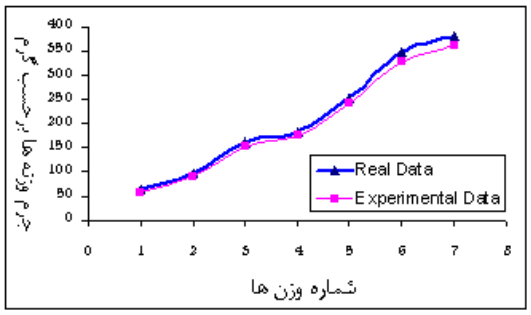
قبل از نصب مدل ابتدا سیستم را به روش ساده‌ای تست کرده تا دقت آنرا بسنجیم.

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. جدول۴ لیستی از نیروهای اعمال شده را نشان می‌دهد. نتایج حاصله نشان می داد که سیستم از خطای کمی (در حدود ۱-۶ گرم و خطایی کمتر از ۵٪) برخوردار است. نتایج ناشی از تست در نمودار زیر قابل مشاهده است (شکل ۱۸).

جدول ٤- مشخصات وزنه‌های بکار گرفته شده

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



شکل ١٨- نمودار داده‌ها و نتایج تست عملکرد

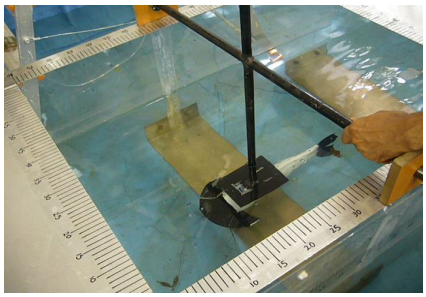
جدول ٥- مقایسه مقادیر واقعی و اندازه گیری شده

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

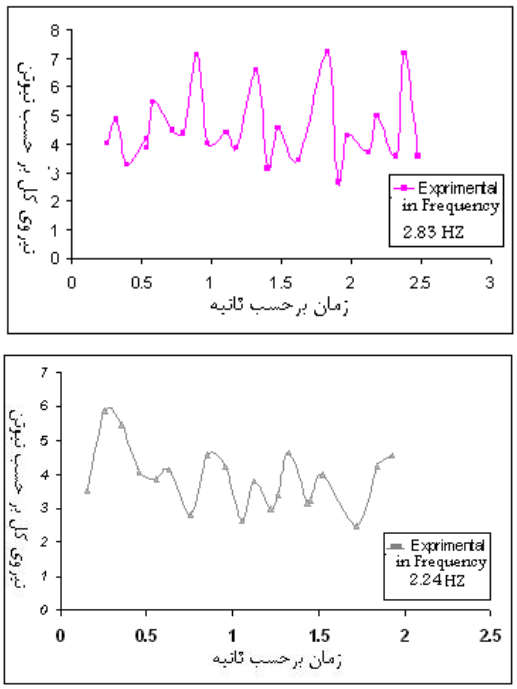
[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]

۳-۲-۲- اندازه گیری پارامتر نیرو

پس از اطمینان از صحت سیستم اندازه‌گیری، مدل روبات ماهی را نصب کرده و تست‌های مورد نظر در فرکانس‌های از پیش تعیین شده انجام می شود. پس از اتمام تست نتایج به صورت نمودار نیرو در جهت X برحسب زمان در فرکانس های ذکر شده استخراج می‌گردد (شکل ۲۰). با توجه به اینکه حرکت ماهی ماهیت سینوسی دارد و دستگاه هم در حین حرکت ارتعاش خواهد داشت بنابراین نیرو اندازه‌گیری شده توسط ترازو هم متغیر و تقریبا 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 ۲/۲٤ و ۲/۸۳ هرتز

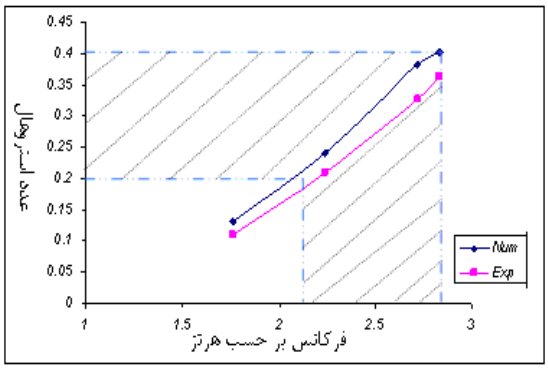
۴- مقایسه نتایج حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی مدل میکروزیردریایی

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

$$St = \frac{f.d}{U} \qquad (۱)$$

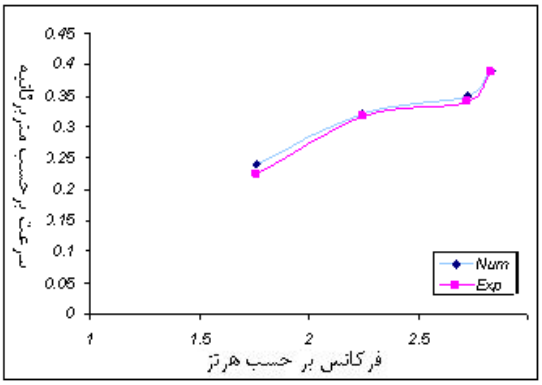
بطوریکه f فرکانس دم زدن بر حسب هرتز(Hz) و d دامنه دم زدن بر حسب (m) و U سرعت پیشروی ماهی بر حسب (m/s) می‌باشد. تحقیقات مختلف انجام شده در رابطه با این عدد نشان می‌دهد که در محدوده (۰/۲-۰/۴) بازده عملکردی روبات ماهی بهینه می‌باشد [۵].

در نمودار مربوطه این محدوده مشخص شده است و با استفاده از آن می‌توان فرکانس‌های مناسب برای بازده بهینه را مشخص کرد.

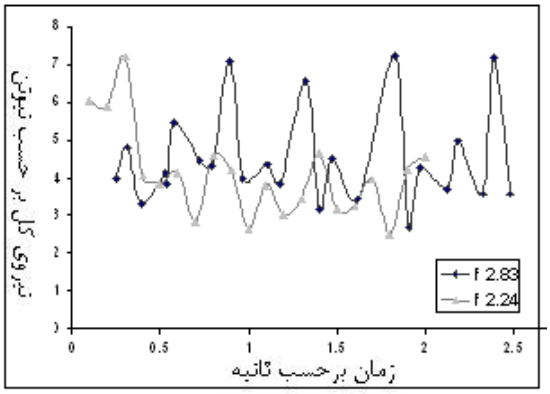


شکل ۲۱- نمودار عدد استروهال برحسب فرکانس دم زدن

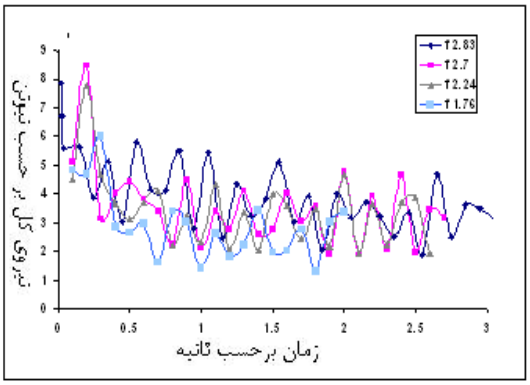
[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]



شکل ۲۲- نمودار سرعت بر حسب فرکانس دم زدن



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

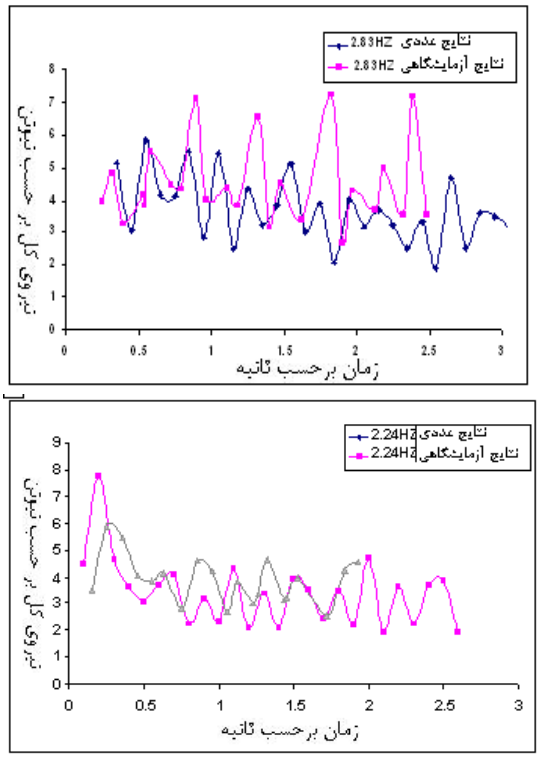


شکل ۲٤- نمودار نیرو برایند در جهت x بر حسب زمان حاصل ازنتایج عددی در دو فرکانس تست شده

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 می یاشد 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 برایند 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 برایند در جهت x در فرکانس ۲/۸۳ (HZ) بیشترین مقدار و در فرکانس ۱/۷۶ (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 ۲/۲۴ و ۲/۸۳ (HZ) می‌باشد.

در شکل۲۴ این مقایسه قابل مشاهده است که میانگین خطا در شکل (۲۴-الف) حدود ۱۵٪ و در شکل (۲۴-ب) حدود ۱۰ ٪ می باشد.



شکل ۲۵- مقایسه نیرو برایند در جهت x در دو حالت عددی و تجربی
(الف) فرکانس ۲.۸۳ هرتز ب) فرکانس ۲.۲٤ هرتز

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]

جدول ٦ - جدول مقایسه‌ای بین پارامترهای اندازه گیری شده در حالت عددی وتجربی

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

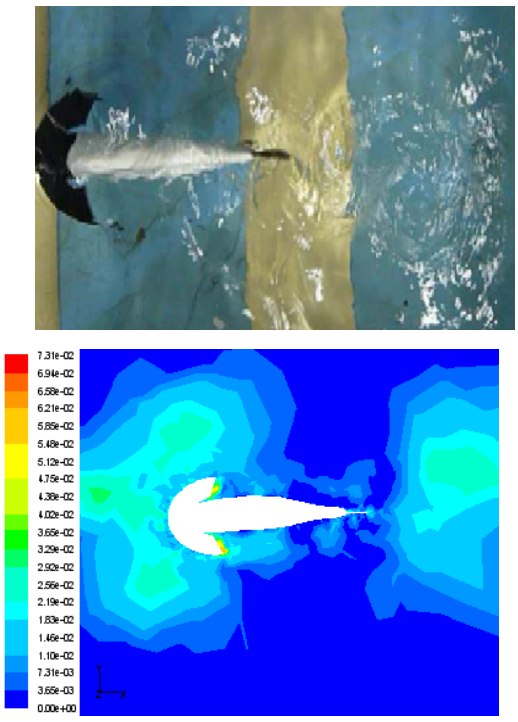
با بررسی نمودارهای فوق می توان نتیجه گرفت نتایج حل نرم افزاری با خطای قابل قبولی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک می باشد و در این صورت می توان گفت روش نرم‌افزاری به عنوان روشی معتبر برای تحلیل پارامترهای دیگر ناشی از رفتارهای هیدرودینامیکی مدل روبات ماهی که امکان انجام تست برای آن مهیا نیست قابل استفاده می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

۵- نتایج استخراجی از شبیه‌سازی سه‌بعدی در حالت دم زدن ماهی

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

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 می‌شود این پدیده در موجودات دم زن به علت تولید نیروی تراست از اهمیت زیادی برخوردار است. هرچه فاصله بین گردابه‌ها کمتر باشد جت تولیدی نیروی تراست بیشتری تولید می کند. در شکل ۲۵ ورتکس‌های تولیدی در دو حالت واقعی و شبیه‌سازی شده قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ٢٦- ورتکس های تولید شده در اطراف مدل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]

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 :

$$\eta = \frac{P_E}{P_P} \qquad (۲)$$

در رابطه فوق P_E توان مفید یا توان رانشی ماهی می‌باشد.

$$(P_E = U \times T_A) \qquad (۳)$$

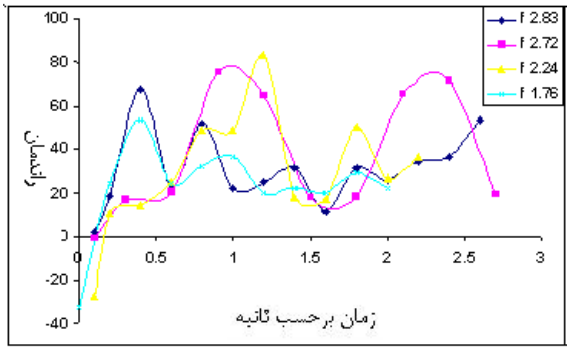
بطوریکه T_A تراست میانگین[۸] و U سرعت ثابت رو به جلو در نظر گرفته می‌شود[۹].

$$P_P \equiv P_I + P_E + P_W \qquad (۴)$$

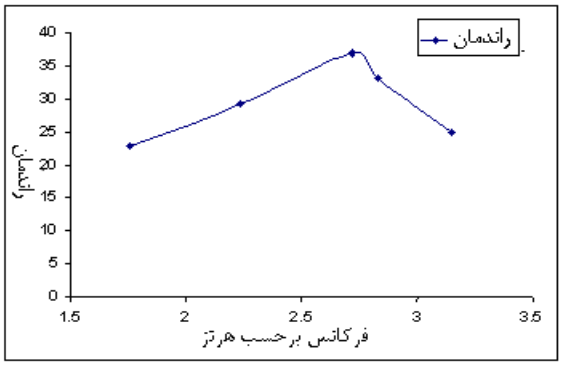
که در این رابطه P_P توان خالص تولیدی توسط موتور[۱۰]، P_L تلفات مکانیکی[۱۱]، P_W توان تلف شده ناشی از ورتکس‌های تولیدی[۱۲] می‌باشد.

شکل ۲۶ مربوط است به نمودار یازده موثر برحسب فرکانس‌های مختلف می‌باشد که با توجه به این نمودار می‌توان گفت در بازده زمانی ۰تا۳۰ ثانیه بیشترین مقدار بازده مربوط به فرکانس‌های ۲.۲۴ و ۲.۷۲ هرتز می‌باشد.

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 می‌باشد و همانطور که انتظار می‌رود قبل از فرکانس ۲ و بعد از فرکانس ۳ هرتز بازده کاهش می‌یابد.



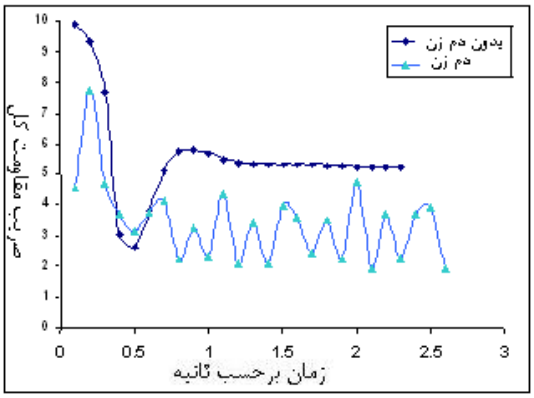
شکل ۲۷- نمودار بازده بر حسب زمان در فرکانس‌های محاسبه شده



شکل ۲۸- نمودار بازده بر حسب فرکانس

۵-۳- 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 می‌توان نتیجه گرفت که ضریب دراگ 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 می‌باشد. نتیجه‌ای که می‌توان از این نمودار استخراج کرد آن است که به طور کلی زمانیکه مدل از سیستم رانش دم خود استفاده می‌کند 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 پیک‌های مثبت به صورت نیروی مفید یعنی تراست و پیک‌های منفی به صورت نیروی غیر مفید یعنی درگ اثر می‌کنند.



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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]

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 نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است. مقایسه مدل شبیه‌سازی 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 پیش‌بینی کرد و علاوه بر آن می توان پارامترهای موردنظر هیدرودینایکی و کنترلی را بر روی مدل تست کرد و عکس العمل روبات را نسبت به آن مشاهده نمود. به کمک این مدل شبیه‌سازی حوزه فرکانس حرکت ماهی که در آن حداکثر نیروی فشار بر روی بدنه ماهی وارد می شود قابل شناسایی می‌باشد. 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 اندازه‌گیری 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 می‌باشد که از طریق تعیین فرکانس مربوط به بیشینه بازده می‌توان رفتار روبات ماهی را بهینه کرد. همچنین با اندازه‌گیری 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
6-Stream line
7-Optimize Frequency
8-Time-averaged thrust8
9-Constant forward velocity
10-The net power supplied by motor
11-Transmission losses
12-Power wasted in the 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]

Robot Fish, Internationa Journa of Mechanics.
12-Bahmanyar, SH., (2009),Hydrodynamic Analysis of a Biomimetic robot fish", Msc Thesis submitted to the School of Mrine 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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1390.7.13.5.5]