بررسی عددی تأثیر دامنه و فرکانس باله بر نیروی پیشران یک نمونه زیرسطحی با الگوگیری از سفره ماهی

رامین حاجی هاشمی[۱]، امین نجفی[۲]، هادی صفری[۳]، محمدرضا نگهداری[۴*]

[۱] دانش آموخته/ کارشناسی ارشد، دانشگاه امام حسین (ع)
[۲] استادیار/ عضو هیئت علمی، دانشگاه امام حسین (ع)
[۳] دانش آموخته/ دکتری، دانشگاه صنعتی شریف
[۴] استادیار/ عضو هیئت علمی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲

کلمات کلیدی:
سفره ماهی مانتاری
شبیه‌سازی
ضرایب هیدرودینامیک

چکیده

در چند دهه‌ی گذشته ایده استفاده از وسایل نقلیه‌ی زیر آبی با الهام‌گیری از طبیعت، توجه قابل توجهی در این حوزه‌ها ایجاد نموده است. این جذابیت ها ناشی از مزایای بالقوه‌ی شیوه‌ی حرکتی آنها نسبت به روش‌های مرسوم است. این مزایا شامل افزایش سرعت، بهبود مصرف انرژی، بازده بالای سیستم رانش، افزایش مانورپذیری، پایداری بیشتر، عملکرد هیدرودینامیکی مناسب و بهینه در راستای افزایش بازده وآشفتگی حداقل آب اطراف آن می باشد. امروزه ربات‌های زیرسطحی که از سفره‌ماهی الگوگیری می-شوند، شهپاد نامیده می‌شوند که به عنوان ربات‌های نظامی برای شناسایی و خنثی کردن مین‌های دریایی استفاده می‌شوند. استفاده از این ربات‌ها صرفه‌ی اقتصادی خیلی زیادی نسبت به زیردریایی‌ها دارد.
هدف از این تحقیق، ارائه‌ی مدلی با الهام از نمونه واقعی یک سفره‌ماهی مانتاری و بررسی دینامیکی آن می‌باشد. در این تحقیق ابتدا مدلسازی حرکت باله‌ی نوسانی سفره‌ماهی به کمک روش عددی براساس مدل اولیه و معادلات حرکت استخراجی، بررسی شده است. پس از آن نمونه‌ی آزمایشگاهی ربات ماهی ساخته شده و نتایج شبیه سازی عددی با نتایج تجربی مقایسه شده است.

Numerical Study Of The Effect Of Amplitude And Frequency Of Flap On The Submerged Sample Propulsion Force With The Pattern Of Flounder

Ramin Haji hashemi [1], Amin Najafi [2], Hadi Safari [3], Mohammadreza Negahdari [4*]

[1] M.Sc. Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran
[2] Ph.D. Assistant Professor, Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran
[3] Ph.D. Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
[4] Ph.D.AssistantProfessor, Marine Engineering, Chabahar Maritime University, Chabahar , Iran

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 02 Jun 2023
Accepted: 03 Sep 2023

Keywords:
Mantaray flounder
Simulation
Hydrodynamic coefficients

ABSTRACT

Over the past few decades, the idea of using underwater vehicles with inspiration from nature has created a significant interest in these areas. This interest is due to the potential benefits of swimming as compared to conventional methods.
Advantages include increased speed, improved energy consumption, high efficiency of the driveline system, increased maneuverability, greater stability, optimized hydrodynamic performance in order to increase the efficiency and dispersion of the surrounding water. Today, subsurface robots modeled from the aquarium are called Shahbad, which are used as military robots to identify and neutralize offshore mines. The use of these robots has a lot of economic savings over submarines.
The purpose of this research is to first provide a model inspired by the actual sample

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.7.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.97]

of a mantle clay and its hydrodynamic survey. In this research, the hydrodynamic dynamics of the fluctuating fin flange with the help of computational fluid dynamics (Anise Fluent, in 3D) based on the initial model and extraction motion equations are investigated. After that, a laboratory robot model is made and the numerical simulation results are compared with experimental results.

۱-مقدمه

در چند دهه‌ی گذشته و توسعه‌ی بسیاری از ربات‌های شبیه‌سازی شده با سیستم‌های رانش الهام گرفته از ماهی‌ها، علاقه‌مندی قابل توجهی در این حوزه ها ایجاد نموده است. این علاقه‌مندی ناشی از مزایای بالقوه‌ی شیوه‌ی شنای آنها نسبت به روش‌های مرسوم است. مزایا شامل بهبود مصرف انرژی، بازده بالای سیستم رانش، افزایش مانورپذیری، و آشفتگی حداقل آب اطراف آن می باشد. انواع موجودات در صنعت رباتیک از ابتدای پیدایش این صنعت تا کنون همیشه در طراحی ربات ها الهام بخش بوده اند؛ به عنوان مثال در سال ۱۷۳۹ رباتی به شکل اردک طراحی و ساخته شد که غلات را وارد آن می کردند و از سویی دیگر آن ها را آسیاب شده بیرون می داد. الهام گیری از حیوانات و طبیعت نقش مهمی در صنعت رباتیک دارد و در سال های اخیر توجه زیادی به این موضوع شده است؛ زیرا این موضوع باعث مطابقت و تعامل هر چه بیشتر ربات ها با محیط پیرامونی خود می شود. ربات های زیادی با الهام از طبیعت ساخته شده اند؛ از خفاش گرفته تا ماهی، سگ و نرم تنانی همچون ماهیان مرکب و هشت پا.

امروزه شناسایی و بهره‌گیری از طبیعت به‌عنوان روشی نوین در جهت گسترش تکنولوژی می‌باشد و این پیشرفت‌ها در زمینه‌های مختلفی همچون صنایع دریایی، اقیانوس شناسی و رباتیک در راستای افزایش بهره‌وری و ویژگی‌های حرکتی خاصشان نمود پیدا کرده است. سیستم‌های رانش پروانه‌های مرسوم، معایبی همچون بازده کم و شناسایی آن‌ها در سرعت‌های بالا به‌دلیل ایجاد کاویتاسیون و نویز را داشته و برای رفع این موارد می‌توان به توسعه‌ی سیستم‌های پیشران، بر مبنای حرکات نوسانی و موج-گونه ماهیان، با دستیابی به حرکتی با بازدهی و مانور بیشتر پرداخت. تحقیقات نیز حاکی از آن است که این نوع سیستم رانش، نسبت به نوع پروانه‌ها از سروصدای کمتر به همراه قابلیت-های حرکتی ارزان‌تر برخوردار است. از جمله کاربردهای این الهام‌گیری می‌توان در توسعه‌ی ربات‌های زیرآبی در جهت مقاصدی چون جستجو در اقیانوس‌ها، اکتشاف در کف آب، همچنین ردیابی مکان‌های نشت نفت و مطالعه‌ی رفتارهای حرکتی ماهیان به منظور حفاظت از محیط زیست نام برد[۱, ۲].

در این بخش با توجه به اهمیت موضوع، به بررسی دلایل رویکرد به الهام‌گیری از آبزیان و اینکه آیا سیستم‌های رانش الهام گرفته از حرکت ماهی مناسب سیستم های رانش وسایل نقلیه زیرآبی می باشند، پرداخته شده است.

با ارائه نتایج تجربی حاصل از نمونه ساخته شده‌ی ربات باله نوسانی نوعی سفره‌ماهی و ربات قزل‌آلا به مقایسه آنها با سیستم پروانه و سکان پرداخته شده است. در چندین مطالعه گذشته روی شکل باله‌ها برای کاربردهای سیستم رانش زیرآبی، نشان می‌دهد که شکل‌های نزدیک به ماهی واقعی، برای داشتن تراست ماکزیمم مطلوبتر است.

در ادامه‌ی الهام‌گیری زیستی، مروری بر ساختارهای فرم بدنه شناگرهای پر بازده (شیارهای طولی بدن) و اثراتی که بر کاهش مقاومت اصطکاکی دارند، بررسی شده اند، تا بتوان با بکارگیری مکمل روش‌های مذکور بر روی مدل‌های پربازده آبزیان، بخش قابل ملاحظه‌ای درکاهش مقاومت و مصرف انرژی لحاظ کرد.

در چندین مطالعه گذشته روی شکل باله‌ها برای کاربردهای سیستم رانش زیرآبی، نشان می‌دهد که شکل‌های نزدیک به ماهی واقعی برای ماکزیمم تراست مطلوبتر است. ماهیان شناگرهای استثنایی و پربازده در محیط زیر آب هستند. در برخی موارد می توانند آنقدرسریع حرکت کنند که به شتاب‌های بیشتر از ۲۵ در پریودهای کم برسند (ویدلر[1]،۱۹۹۳) . همچنین می‌توانند آنقدر مانور پذیر باشند که بهمراه تعدادی از ماهیان در کمتر از چند ده میلی ثانیه، ۱۸۰ درجه تغییرسرعت دهند (ولفگانگ[2]،۱۹۹۹).

بطورمقایسه، تکنولوژی زیردریایی موجود در تطبیق با مشخصات برخی ماهیان با سرعت کمتر و سنگین‌تر ظاهر گردیده‌اند. در دهه‌ی گذشته و یا نزدیکتر، توسعه‌ی بسیاری از ربات‌های شبیه ماهی با سیستم‌های رانش الهام گرفته، علاقه‌مندی قابل توجهی در حوزه شناورهای زیرسطحی خودکار[3] ایجاد نموده است (بارت[4]،۱۹۹۶) (لیو[5]،۲۰۰۵). این علاقه‌مندی ناشی از مزایای بالقوه‌ی شیوه‌ی شنای آنها نسبت به روش‌های مرسوم است. مزایا شامل بهبود بازده سیستم رانش(تریانتافلو،۱۹۹۵) ،افزایش مانورپذیری(ولفگانگ،۱۹۹۹)، و آشفتگی حداقل آب اطراف آن می باشد(اسفاکیوتاکیس ،۱۹۹۹).

بازده رانش بهینه یکی از مهمترین مزایای حرکت فویل نوسانی است. پروانه‌های مورد استفاده برای حرکت شناورهای دریایی بازده شان معمولاً بیشتر از ۴۰درصد

[1] Videler
[2] Wolfgang
[3] AUV
[4] Barrett
[5] Liu

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.7.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.97]

نیست، در حالیکه تست‌های انجام شده در سال۱۹۹۵ دانشگاه MITبر روی باله‌های نوسانی، نشان از دستیابی به بازده‌های بالای ۸۰ درصد می باشد. و از لحاظ تئوری اثبات شده بود که اگر حرکت در مسیر گردابی فون کارمن معکوس به طور ثابت امکان‌پذیر باشد، بازده حدود ۱۰۰درصد را می توان به‌دست آورد[۳].

پدیده‌ی فون‌کارمن بدلیل رهایش متناوب گردابه‌های اطراف جسم ناشی از جدایش ناپایدار لایه مرزی رخ می‌دهد. طبق نتایج تست آندرسون و همکارانش، اثرات هیو (حرکات جانبی)، طول فویل، زاویه حمله و زاویه فاز بین هیو و پیچ فویل، بر روی بازده اندازه-گیری شده است. هشت تست لحاظ شده بود و بازدهای بین ۶ تا ۸۷ درصد بدست آمده است[۴].

مطالعه‌ی هوور و همکاران به اثبات تأثیر زوایای گوناگون حمله بر روی بازده رانش و ضریب تراست پرداختند. حرکات هارمونیک، امواج چهارگوش، امواج دندانه دندانه و سینوسی با یکدیگر مقایسه شده و نشان داده شده است که حرکت سینوسی بازده بیشتری را فراهم می‌کند[۵].

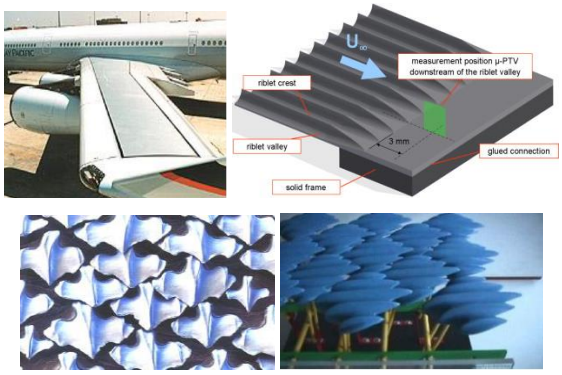
ریبلت‌ها برآمدگی‌های کوچکی اند که در یک ردیف در امتداد جریان قرار داشته و زبری‌های ناهمسانگرد[۲]نسبت به سطح دارند. این شیارها یکی از معدود تکنیک‌هایی است که در جهت کاهش مقاومت اصطکاکی پوسته در لایه مرزی آشفته- هم در آزمایشگاه و هم درآیرودینامیک هندسه‌های واقعی- با موفقیت بکار گرفته می‌شود (شکل ۱) .کاهش مقاومت اصطکاکی حرکت حیوانات (ماهی) و وسایل نقلیه می‌تواند از طریق کاهش تنشهای برشی دیواره به‌دست آید. طی دهه های اخیر کاملا" آشکار شده است که لایه مرزی آشفته روی یک سطح با دندانه‌های طولی تنش‌های برشی کمتری نسبت به سطوح صاف ایجاد می‌کند.

برای یک مکانیزم قابل امکان کاهش مقاومت اصطکاکی با ریبلت ، چندین مفهوم پیشنهاد می شود. در مرجع [۲] به اثرات متقابل تعداد چرخش گردابه‌های طولی با ادی‌های کوچک تولید شده از آنها درنزدیک نوک ریبلت، اثر گردابه‌ی ثانویه (نوک ریبلت) در تقلیل گردابه‌های طولی پرداخته شده است.

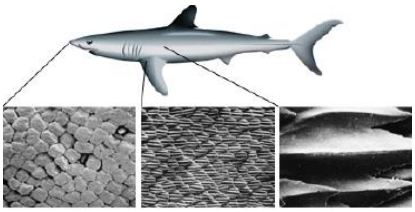
ریبلت‌های با هندسه های متفاوتی در تونل باد تست شده‌اند و به اثبات رسیده است که کاهش۱۰ درصدی مقاومت بر روی سطوح صاف را در پی داشته است. والش و لیندمن[۱] با تست گرفتن از چندین نمونه از ریبلت‌ها شامل: مثلثی، فرورفتگی و برآمدگی‌های سینوسی و U شکل‌ها، ماکزیمم کاهش مقاومت اصطکاکی ۷-۸٪ برای واحد طول ۱۵ (نسبت به عرض واحد) در طول دیوار به‌دست آوردند.

مکانیزم کلی آن اینگونه حدس زده شده است که گردابه‌های ثانویه در نوک ریبلت‌ها، گردابه‌های در امتداد جریان را ضعیف نموده، و به توسعه‌ی نزدیک سطح زیرین لایه مرزی آشفته پرداخته و با ممانعت کردن از حرکت جریان‌های ثانویه عرضی و اجبار به جایگزین نمودن سیال نزدیک جداره، که در اثر تولید آشفتگی پس زده شده است، موجب محدود کردن تبادل مومنتوم در جهت عرضی -به‌دلیل گردابه‌های درامتداد جریان می شوند. به عبارت دیگر گردابه‌های در امتداد جریان، از دیواره جابجا شده و مومنتوم اختلاط آشفتگی جریان کاهش می‌یابد. نظر به اینکه اختلاط، عهده‌دار تنش‌های موضعی بزرگی در نزدیکی دیواره می-باشد، کاهش آن موجب مقاومت پوسته‌ای کمتر می‌شود.

ریبلت‌های کوچک که بدنه‌ی کوسه‌های شناگر سریع را پوشش می‌دهد، مقاومت افزوده شده درجریان آشفته را به دو طریق کاهش می دهد: با ممانعت از انتقال در مقطع عرضی و از این سو به آن سو رفتن[۳] گردابه‌های در راستای جریان در زیر لایه لزج، و بلند کردن گردابه‌های با سرعت زیاد از بالای سطح، تنش‌های برشی و انتقال مومنتوم کاهش می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۱- الف) طرح هندسه ریبلت (شیارهای طولی) ب) ساختار شیارهای طولی و تفاوت آن در قسمت‌های مختلف بدنه یک کوسه ماهی[۲]

جیمزگری(گری،۱۹۳۳) بر مبنای مشاهدات خود بیان کرد که حرکت ماهی‌ها درآب، به صورت ترکیبی از دو پدیده‌ی مربوط به حرکات موجی شکل می‌باشد. اول اینکه نوسان بدن ماهی‌ها ایجاد

[1] Walsh,Lindemann
[2] anisotropic
[3] Cross stream

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.7.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.97]

یک حرکت جانبی می‌کند که درطول بدن با دامنه‌های متفاوت به سمت دم افزایش می‌یابد. به واسطه‌ی حرکات جانبی، موجی ایجاد می‌شود وسپس نقاط مختلف بدن درحرکت این موج جانبی، به صورت انتشار یک موج سینوسی در صفحه‌ی افقی، تأثیر می-گذارند.

در مقایسه با فویل‌های با ضریب منظری بالا که فقط تولید گردابه در دهانه بال دارند، فویل‌های با ضریب منظری پایین دنباله‌هایی در راستای پهنای بال و جریان تولید می کنند. طبق نتایج، اختلافات شاخصی نیز اتفاق می افتد. بطور مثال، دونگ و همکارانش(۲۰۰۵) با شبیه سازی‌های روی فویل‌های با ضریب منظری محدود در اعداد رینولدز بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ نشان داد که عدد استروهال در بازده ماکزیمم بین۰/۴۵و ۰/۸ متغیر بود، که با افزایش ضریب منظری افزایش می‌یافت. اگرچه بازده با افزایش ضریب منظری افزایش می‌یافت، بیشینه در حدود۳۰ درصد بوده و این مقدار نسبتا کم احتمالا نشان دهنده‌ی تأثیر قوی ویسکوزیته در اعداد رینولدز پایین است. ساختارهای ویک در زمینه رانش ماهی و شنای پنگوئن و پرواز پرندگان مطالعه شده است (لوودر و دروکر[1]، ۲۰۰۴) (بناش[2]، ۱۹۹۵) (لایتهیل[3]، ۱۹۶۰) و اغلب بصورت حلقه‌های ورتکس متصل بهم توصیف کردند.

برای ضریب منظری محدود حرکات هیو و پیچ ایرفویل، پارکر و سوریا [4](۲۰۰۳) مدلی پیشنهاد دادند که شامل جفت حلقه‌های ورتکس در هم فرورفته، ناشی از هر دولبه انتهایی و جلویی بال که فرم یک زنجیر به یکدیگر متصل می‌شوند. جهت مقایسه کیفی با مدل پیشنهادی لودر و دروکر(۲۰۰۴) برای نیروی محرک باله‌ی سینه ماهی، شبیه سازی‌های عددی در اعداد رینولدز پایین هیو و پیچ فویل که توسط گاگلیل مینی [5]و همکارانش(۲۰۰۴) انجام شد، ساختارهای دنباله تولیدی بصورت زنجیری از حلقه‌های ورتکس و شاخصه تناوبی بودن تشکیل شده بود. همچنین وی تغییری در ساختار ویک یافت که در اعداد استروهال بزرگ ویک جدا از هم (دوبخشی) تشکیل شدند. شکل ویک‌های مشابه توسط دونگ و همکارانش (۲۰۰۵) برای فرم بیضوی با ضرائب منظری $8/\pi$, $4/\pi$ مشاهده شد (پایین‌ترین عدداستروهال مورد مطالعه آن‌ها ۰/۳ بود)[۱۴, ۱۵].

در جزئیات مطالعه‌ی تجربی بر روی پنل مستطیلی زاویه دار و ضریب منظری۰/۵۴ ، اسمیت[6](۲۰۰۶) نتایج مدل ورتکس دنباله برای عدد استروهال بین ۰/۲ و۰/۲۵ کاملا مشابه گاگلیل مینی و همکارانش بود. دنباله پایین‌دست پنل زاویه‌دار از اندرکنش گردابه‌های خط جریانی که در لبه خط جریانی پنل تشکیل شده تولید شده و گردابه‌های در امتداد پهنای بال از طریق تغییرات متناوب در نیروی بالابری حاصل می‌شود. سرعت القایی ناشی از گردابه‌های خط جریانی منجر به تراکم دنباله در امتداد پهنای بال به همراه انتشار دنباله در جهت عرضی در نتیجه خواهد داشت[۱۶].

۲- تئوری حاکم بر مسأله

بر اساس مطالعات موجود بر روی رانش ماهی، روش تئوری دقیق و قطعی برای محاسبه آسان تراست تولیدی بر اساس حرکت موجی دم و حرکت باله ماهی در خلال شنا کردن، به نظر نمی رسد وجود داشته باشد. برخی منابع پیشنهاد حل معادله ناویر استوکس و پیش‌بینی دقیق تراست را ارائه نموده اند، اما این روش نیازمند استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و صرف زمان قابل توجهی برای حل و پیچیدگی‌های مسأله می باشد.

طی بررسی‌های مطالعاتی دو روش اصلی برای تخمین نیروی تراست وجود دارد: روش گردابه‌ای (استریتلین و تریانتافلو، ۱۹۹۸) و روش جسم کشیده و مشتقاتش.[8] هر دو روش دارای مزایا و معایبی هستند. روش گردابه‌ای بر اساس آنالیز گردابه‌های موجود در دنباله شنای ماهی به تخمین تراست می‌پردازد. این روش پارامترهای گردابه نظیر سیرکولاسیون، اندازه، موقعیت و تعداد گردابه‌های دنباله را مورد استفاده قرار می دهد. با این وجود، محدودیت استفاده برای مدل سازی و شبیه سازی سیستم رانش وجود دارد. در حال حاضر به نظر نمی‌رسد روش ساده‌ای برای پیش‌بینی فرم گردابه و پارامترهای گردابه ناشی از حرکت ماهی بدون استفاده از روش‌های پیچیده دینامیک سیالات محاسباتی و یا مشاهدات مستقیم و اندازه‌گیری گردابه‌های تولیدی خلال شنا کردن، وجود داشته باشد. استفاده از این روش در حال حاضر به‌دلیل عملکرد وسائط نقلیه و سرعت و استخراج و تحلیل اطلاعات ورتکس پیچیده می‌باشد.

روش دیگر که برای تخمین تراست تولیدی سیستم‌های رانش شبیه ماهی بکار می‌رود، تئوری جسم کشیده با دامنه بزرگ لایتهیل می باشد. ایده این تئوری بر اساس انتقال مومنتوم بین ماهی و آب در نظر گرفته شده است که قسمت عمده این انتقال در باله قسمت دم اتفاق می افتد (ویدلر،۱۹۹۳).

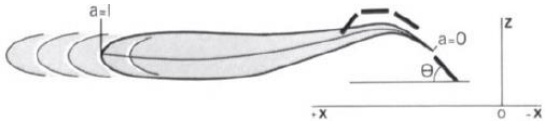
در شکل ۲ تولید تراست ماهی توسط دم آن و حرکت در طول بدن آن نشان داده شده است. در قسمت الف) موقعیت سر و دم و

[1] Lauder & Drucker
[2] Bannasch
[3] Lighthill
[4] Parker & Soria
[5] Guglielmini
[6] Smits

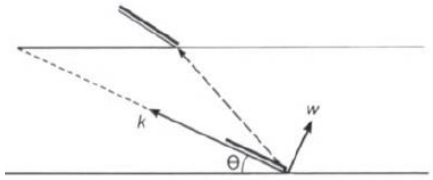
[7] vortex theory
[8] elongated body theory

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.7.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.97]

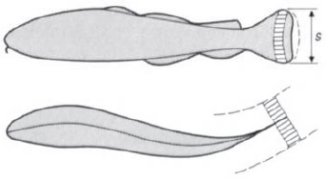
سه بعدی ماهی نشان دهنده‌ی جابه‌جایی ماهی در زمان است، جهت شنا کردن در طول محور مثبت x می‌باشد وz محور عمودی بر سطح افق و Θ زاویه‌ی بین انتهای دم و محورx می باشد. در قسمت ب) موقعیت بعد از لبه‌ی دم شکل الف با مقیاس بزرگتری بازتاب شده است که فلش شکسته در نوک آن نمایانگر سرعت لحظه‌ای نوک دم که آن به دو جز k درراستای دم و w عمود بر راستای دم تجزیه شده است. در قسمت ج) تصاویر جانبی و بالای حرکت ماهی و تصویری از جرم مجازی آب که در طول واحد در انتهای تیغه دم دیده می‌شود را نشان می‌دهد. طول اسپن دم برابر s و شعاع فضای دایره‌ای متأثر از حرکت دم ۰/۵s می‌باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲- تولید تراست ماهی توسط دم آن و حرکت در طول بدن آن[۳۸]

بنابراین فقط حرکات هیو و پیچ باله دم در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مفاهیم این تئوری، حرکت هیو جابجایی عرضی باله دم نسبت به خط مرکزی ماهی اطلاق می شود (تریانتیفلو[1] و وو،۲۰۰۰) و با پارامترهای استاندارد هیو و پیچ توصیف شناورهای دریایی تفاوت دارد.

هر دو حرکت هیو و پیچ به‌صورت توابع سینوسی در نظر گرفته می‌شود(هوور[2]،۲۰۰۴) و بر اساس مشاهدات ماهی واقعی و شبیه‌سازی‌ها، هیو و پیچ تقریبا ۹۰ درجه اختلاف فاز با یکدیگر دارند.

رژیم‌های جریان اطراف آبزیان را می‌توان با استفاده از معادلات ناویر – استوکس تحلیل و یا شبیه‌سازی نمود. مشخصه اصلی جریان‌های اطراف آن‌ها جریان آشفته به همراه میدان جریان نوسانی می‌باشد که خود باعث نوسان کمیت‌های انتقالی مومنتم و انرژی می‌شود. با توجه به مشخصه این نوسانات از جمله اندازه کوچک و فرکانس بالا، مدل‌سازی مستقیم آن‌ها در طراحی‌های مهندسی هزینه محاسباتی بسیار زیادی نیاز خواهد داشت. ولیکن می‌توان با متوسط گیری زمانی از معادلات حاکم لحظه‌ای و حذف مقیاس‌های ریز هزینه‌های محاسباتی را کاهش داد. اما معادلات تغییر یافته شامل متغیرهای مجهول اضافی می‌باشند که برای تعیین مقادیر آن‌ها بر حسب مقادیر معلوم جریان، مدل‌های آشفتگی مورد نیاز خواهد بود. برای این منظور باید معادلات ناویر –استوکس را به روش RANS بسط داد. در این حالت معادلات نهایی حاکم بر جریان آشفته بدست می‌آید. جهت مدل‌سازی جریان سیال اطراف سفره‌ماهی باید معادلات ناویر - استوکس برای مدل سه‌بعدی حل شوند. معادلات ناویر- استوکس شامل سه معادله بقای مومنتوم، بقای جرم و انرژی می‌باشد:

۲-۱ معادله بقای جرم

اولین قانون حاکم بر ذره‌ی سیال، قانون بقای جرم می‌باشد. این قانون را با در نظر گرفتن تعادل جرم برای یک المان سیال می‌توان بدین صورت بیان کرد که بایستی نرخ خالص جریان جرم ورودی به المان سیال برابر نرخ افزایش جرم در المان سیال باشد. یعنی با در نظر گرفتن یک المان سیال می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+div(\rho U)=0 \qquad (۲)$$

در رابطه بالا، U بردار سرعت، u، v و w اجزاء بردار سرعت و ρ چگالی سیال می‌باشد.

۲-۲ معادله‌ی اندازه حرکت سیال

قانون دوم نیوتن بیان می‌کند که نرخ تغییر اندازه حرکت یک ذره‌ی سیال برابر با برآیند نیروهای وارد شده بر ذره است. با در نظر گرفتن یک المان سیال می‌توان معادلات اندازه حرکت را به صورت زیر بیان نمود:

$$\rho\frac{Du}{Dt}=\frac{\partial(-P+\tau_{xx})}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}+S_{Mx} \qquad (۳)$$

[1] Triantafyllou
[2] Hoar

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.7.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.97]

$$\rho\frac{Dv}{Dt}=\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial(-P+\tau_{yy})}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z}+S_{My}$$

$$\rho\frac{Dw}{Dt}=\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial(-P+\tau_{zz})}{\partial z}+S_{Mz}$$

P فشار استاتیک وارد بر سیال است. بدون در نظر گرفتن جزئیات دقیق نیروهای بدنه، تأثیر کلی این نیروها را می‌توان به صورت یک چشمه S_{Mi} برای اندازه حرکت در راستای i در واحد حجم و در واحد زمان در نظر گرفت که i شامل جهت‌های x، y و یا z می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نرخ اندازه حرکت، با مساوی قرار دادن نرخ تغییرات اندازه حرکت ذره سیال با نیروی کلی ناشی از تنش سطحی در راستای مورد نظر به‌علاوه نرخ افزایش اندازه حرکت ناشی از چشمه‌ها بدست می‌آید. علامت فشار مخالف علامت تنش نرمال لزج می‌باشد، زیرا طبق قرارداد برای تنش نرمال کششی علامت مثبت در نظر می‌گیرند و در نتیجه فشار ناشی از تنش نرمال تراکمی علامت منفی خواهد داشت. اگر نیروهای بدنه فقط شامل گرانش باشند:

$$\begin{aligned}S_{Mx}&=0\\S_{My}&=0\\S_{Mz}&=-\rho g\end{aligned}\qquad(۴)$$

در معادلات فوق الذکر نیروهای سطحی می‌توانند شامل فشار و لزجت و نیروهای بدنه شامل گرانش، گریز از مرکز و ... باشند. در بسیاری از جریان‌های سیال، تنش‌های لزج ممکن است بصورت توابعی از نرخ تغییر شکل محلی یا نرخ کرنش بیان شوند. در جریان‌های سه بعدی، نرخ محلی تغییر شکل‌ها بصورت ترکیبی از نرخ تغییرات خطی و نرخ تغییرات حجمی خواهد بود. از آنجایی‌که مایعات، تراکم‌ناپذیر هستند، معادله‌ی بقاء جرم عبارت است از $div\,U=0$ و تنش‌های لزجی دو برابر نرخ محلی تغییر شکل خطی ضربدر لزجت دینامیکی می‌باشند. معادلات اندازه حرکت را می‌توان به صورت زیر نوشت که به معالات ناویر- استوکس معروف است:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+div(\rho uU)=-\frac{\partial P}{\partial x}+div(\mu.grad(u))+S_{Mx}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+div(\rho vU)=-\frac{\partial P}{\partial y}+div(\mu.grad(v))+S_{My}\qquad(۵)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+div(\rho wU)=-\frac{\partial P}{\partial z}+div(\mu.grad(w))+S_{Mz}$$

برای حل مجموع معادلات ناویر- استوکس و پیوستگی دو روش وجود دارد که عبارتند از:

الف- حل همزمان

ب- حل غیر همزمان

در روش اولیه تمام متغیرهای جریان (سرعت‌ها و فشار) در یک دستگاه معادلات جبری قرار گرفته و محاسبه می‌شوند. این کار هزینه‌ی محاسباتی بسیار بالایی داشته، امکان سخت‌افزاری مناسب خود را می‌طلبد. بر این اساس در تحقیق حاضر حل غیر همزمان معادلات انتخاب شده است. در این روش میدان سرعت حل شده و در ادامه میدان فشار محاسبه می‌شود [۶۵].

در حل مسائل دینامیک سیال پشت جریان یک مدل محاسباتی قابل انعطاف کاربرد دارند، بصورت زیر خواهد بود[۹]:

$$U_c(\psi)=U_f(\psi)\qquad(۶)$$

که u بردار سرعت،ρ چگالی جریان وϑ ویسکوزیته سینماتیکی می‌باشد. در حالیکه چگالی جسم قابل انعطاف در جریان فرض شود که مشابه متوسط جریان باشد یعنی، $\rho_{body}=\rho_{fluid}$.

باز خورد بین جسم قابل انعطاف و سیال با فرض شرایط مرزی بدون لغزش روی سطح حرکتی ماهی قابل درک بوده، بنابراین سرعت سیال در مرز U_f برابر سرعت سطح مدل محاسباتی U_c می‌باشد. که ψ مرز وسط مدل می‌باشد.

معادلات ناویر استوکس (سه معادله) و پیوستگی برای سیال غیر قابل تراکم، در حالت سه بعدی چهار مجهول را دربردارند (سه مؤلفه سرعت و یک مؤلفه فشار) حل این معادلات به دو روش همزمان و غیرهمزمان امکان پذیر است. در حل همزمان معادلات حاکم، یک دستگاه معادلات جبری برای چهار متغیر بدست آمده و با حل آن تمامی مجهولات محاسبه می‌شوند[۱۷]. استفاده از این روش زمان بالایی نیاز خواهد داشت. در مقابل، در روش‌های حل غیرهمزمان به دو دسته روش‌های تخمین – اصلاح [1]مثل سیمپل[2] و پیزو [3]روش‌های گام جزئی[4]تقسیم می‌شوند. با توجه به اینکه روش‌های گام جزئی در مقایسه با روش‌های تخمین-اصلاح، در هرگام زمانی با یک بار حل معادلات، میدان سرعت و فشار دقیق را محاسبه می‌نماید، انتخاب مناسب‌تری در حل عددی مسائل گذرا هستند.

در مدل محاسباتی، امواج پیش رونده در امتداد باله‌ی سینه از طریق کنترل نوسان باله‌های ری انجام می‌شود. بنابراین سینماتیک باله‌های سینه ممکن است بصورت عبارت‌های نوسان به سمت بالا و پایین باله‌های ری توصیف شود. علاوه بر این می-

[1] Prediction-Correction
[2] SIMPLE
[3] PISO
[4] Fractional step

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.7.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.97]

توان فرض کرد که صفحه از طریق نوسان باله‌های ری عمود بر محور اصلی بدنه در خلال شنا کردن تغییر شکل می‌دهد. جهت مثبت محور z در خلاف راستای حرکت قرار دارد.

با توجه به وجود مرز متحرک و قابل انعطاف نسبت به زمان، نیاز به تغییر شبکه حل و کنترل کیفیت مش نسبت به حالت مبنا می‌باشد. در این تحقیق از روش‌های مش‌بندی مجدد[1] و یکنواخت سازی فنری[2] مورد استفاده شده است. مبنای روش مش‌بندی مجدد بر اساس انحراف از اندازه‌ی المان‌های اولیه و حداقل کیفیت تعیین شده است و با انحراف از این مقادیر کنترلی، مش‌ها حذف گردیده و ناحیه حل مجدداً مش‌بندی می‌شود. حرکت جسم در توابع تعریف شده توسط کاربر (UDF)[3] در شبیه‌سازی هیدرودینامیکی مرتبط با فلوئنت مشخص شده است. تمامی شبیه‌سازی‌ها از حالت سکون جسم با سرعت جریان ورودی مشخص شروع شده و سپس دامنه بتدریج افزایش یافته تا به مقدار نرمال برسد.

منبع نیروی محرکه در همه ماهیان شامل موارد زیر می‌باشد:

- حرکت موجی شکل در بدن

– باله های زوج (سینه ای و شکمی)

– باله های فرد (دمی، پشتی وخروجی)

یا ترکیبی از موارد بالا.

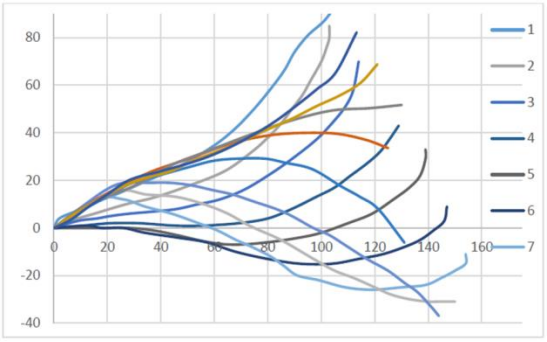
هر کدام از این روش ها برای حرکت نیاز به توانایی‌های فیزیولوژی و تغییرات حرکتی ماهیان است. حرکات موجی سفره ماهی از ترکیب دو نوع حرکت می‌باشد : حرکت موج عرضی در خلاف حرکت و حرکت بال زدن. به عبارت دیگر سفره ماهیان از هر دو قسمت بدنه و باله‌های سینه در خلال حرکت استفاده می‌کند. در این تحقیق حرکت رو به جلو فقط با حرکات موجی باله‌ی سینه انجام و قسمت میانی در حالت مستقیم باقی می‌ماند. برای دستیابی به شنای خطی رو به جلو، حرکات متقارن برروی باله‌های سینه در هر دو طرف بدنه، برای بی اثر کردن نیروهای جانبی اعمال می‌شود. بنابراین نیرو در جهت جانبی در محاسبات بعدی نادیده گرفته شده است. به علاوه برای کاهش جابجایی در جهت y (درجهت عمق)، حرکت در آن جهت بصورت نوسانی در نظر گرفته و بصورت زیر بیان می‌شود.

$$y(x,t)= A \sin(kz-\omega t) \qquad (۷)$$

A دامنه، k عدد موج روی باله‌ی سینه، $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ و λ طول موج جسم، $\omega=2\pi f$، f فرکانس نوسانی حرکت.

حرکت باله‌ی سینه بر اساس انتشار موج سینوسی ساده در راستای محور z (خلاف راستای حرکت) بوده و دامنه‌ی حرکت در قسمت بالای محور شکم جسم بزرگتر از قسمت پایین می باشد. شکل ۳ حرکت لبه‌ی حمله‌ی سفره‌ماهی، براساس سیکل حرکتی نمونه‌ی واقعی را نشان می‌دهد.

در فصل بعدی بررسی های رفتاری حرکت سفره‌ماهی و شبیه‌سازی‌های مرتبط پرداخته خواهد شد.



محور تغییر شکل باله در جهت عرض باله(میلیمتر)

شکل ۳- نحوه‌ی حرکت لبه‌ی حمله سفره‌ماهی بر اساس سیکل حرکتی نمونه‌ی واقعی

۳- شبیه‌سازی سفره ماهی

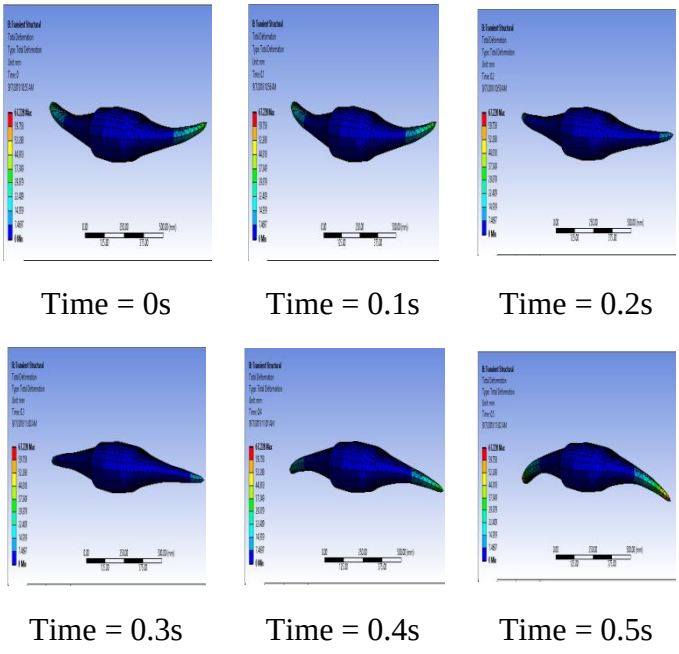
شبیه سازی بال زدن سفره ماهی به صورت کوپل FSI در نرم افزار انسیس و با استفاده از کوپل کردن دو ماژول حل گذرای سازه ای[5] و حل جریان سیال[6] صورت می گیرد که مراحل آن از اضافه کردن جنس سیلیکون تا گرفتن کنتورهای نهایی در زیر آمده است.

برای مشاهده جابجایی‌ها، کرنش‌ها، تنش‌ها و... به صورت کانتور و یا به‌وسیله‌ی probe برای هر نقطه دلخواه به حل اضافه می‌شود. به عنوان مثال تغییر شکل بال‌ها در جهت z به صورت نمودار براساس زمان در شکل ۴ نشان داده شده است.

[1] Remeshing
[2] Smoothing
[3] User-Defined Functions

[4] Fluid-Solid Interaction
[5] Transient Structural
[6] Fluid Flow (Fluent)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.7.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.97]

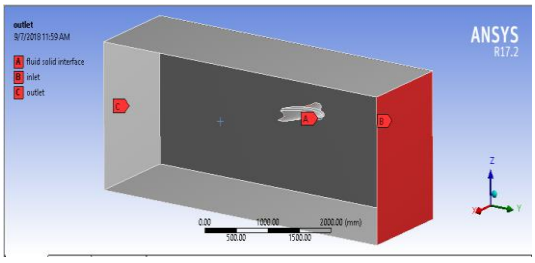


شکل ۴: کانتور تغییر شکل کلی بال‌ها در یک دوره‌ی تناوب

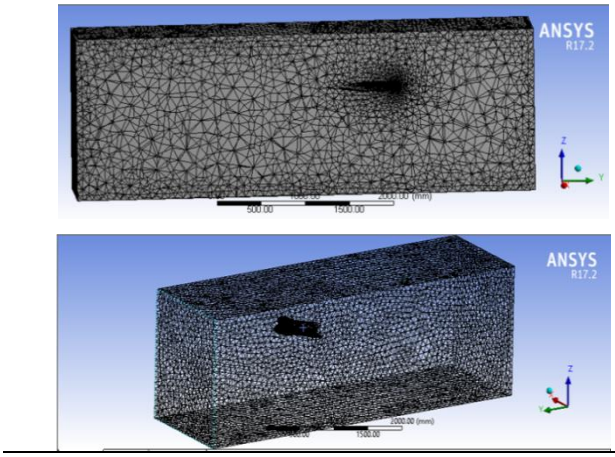
۴- شرایط مرزی و شبکه بندی

این بخش با مراجعه به محیط تنظیمات حل برای جریان سیال در نرم افزار انجام داده می‌شود. در این قسمت زمان بر پایه حل گذرا (transient) تنظیم شده و در قسمت مدل جریان توربولانس انتخاب شده و نوع معادلات حل کننده آن k-ε گرفته می‌شود. نوع سیال آب انتخاب شده و سپس در قسمت شرایط مرزی[1] شرط مرزی ورودی از نوع velocity inlet و با سرعت ورودی (شکل ۵) و شرط مرزی خروجی از نوع pressure outlet و شرط مرزی fluid solid interface از نوع wall قرار داده می‌شود. همچنین دیگر دیواره‌های مکعب مستطیل (محیط سیال) می‌باشد که آن به صورت پیشفرض به عنوان دیوار رها و یا برای آن در قسمت مش بندی نام‌گذاری می‌شود.

در قسمت مش فلوئنت برای زدن مش ناحیه سیال اطراف سفره ماهی ابتدا مطاب شکل ۶ قسمت‌های بال و بدنه سفره ماهی غیرفعال[2]شده تا تنظیمات مش و مش زنی فقط برای ناحیه سیال اطراف آن اتفاق بیفتد. ناحیه سیال اطراف سفره‌ماهی یعنی ناحیه-ای که هندسه سفره‌ماهی از آن حذف شده به‌عنوان fluid solid interface نامگذاری، سپس صفحه‌ی ورودی جریان به نام ورودی[3] صفحه‌ی خروجی آن به نام خروجی[4]نامگذاری می‌شود.



شکل ۵- نامگذاری شرایط مرزی



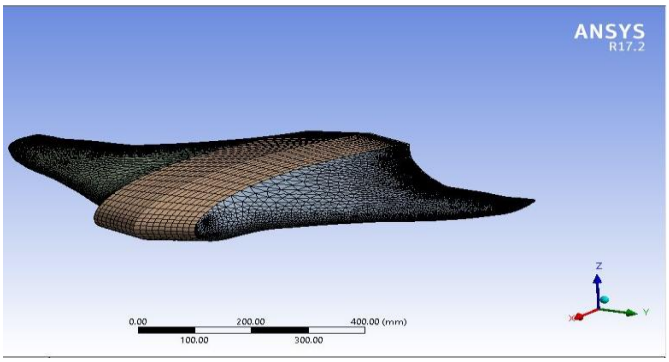
(الف)

شکل ۶- الف) نمایی از مش زده شده ، ب)کیفیت مش زده شده

برای شبکه بندی بدنه‌ی سفره‌ماهی به قسمت مدلسازی نرم افزار می‌رویم. با باز کردن قسمت مربوطه، سایر تنظیمات حل و حلگر نیز فعال می‌شوند. برای مش زدن بدنه‌ی سفره‌ماهی به تنهایی قسمت دامنه سیال را از نمودار درختی جدا کرده و بدنه مش زده می‌شود. برای مش زدن بدنه به این گونه عمل می‌شود که ابتدا قسمت بدنه وسط سفره‌ماهی که حرکت نداشته و خاصیت الاستیکی نیز ندارد مش زده می‌شود، سپس هردو بال سفره ماهی را به دلیل داشتن حرکت و جنس الاستیک با اندازه یک مش کوچکتر در نزدیکی شکستگی و انحناها مش زده می‌شود (شکل ۷) تعداد المان های مش برابر ۵۴۰۹۲۲ و دارای میانگین کیفیت متعامد ۰/۸۵۹ است.

[1] boundary conditions
[2] suppress
[3] inlet
[4] outlet

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.7.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.97]



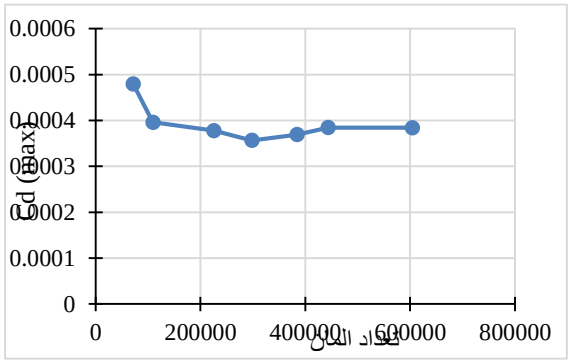
شکل۷- نمایی از مش و کیفیت آن

۵- بررسی نتایج

در این تحقیق هیدوردینامیک حرکت باله سفره‌ماهی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی براساس مدل اولیه الهام گرفته از نمونه واقعی بررسی شده است. در این فصل به بررسی نتایج حاصل از حرکت سفره ماهی و شبیه سازی‌های انجام گرفته برروی آن خواهیم پرداخت، حرکت باله سفره ماهی به صورت نوسانی و نتایج آن برای فرکانس ها و دامنه‌های مختلف انجام شده است.

۵-۱ استقلال از شبکه

به منظور اعتبار سنجی شبیه سازی انجام شده، بر اساس کیفیت-ها و اندازه‌های مختلف از مش شبیه‌سازی را انجام می‌دهیم تا ماکزیمم ضریب درگ نسبت به تغییر مش زده تغییر نکند(مستقل از مش شود). و این نشان دهنده صحیح بودن نتایج محاسبات می باشد. نمودار شکل ۸ به بررسی این موضوع می پردازد.



شکل ۸- استقلال از مش بر حسب ضریب درگ ماکزیمم

۵-۲ نتایج مربوط به فرکانس ها و دامنه های مختلف

روش کار حل عددی تحقیق حاضر به این صورت است که بر حسب فرکانس ها و دامنه‌های مختلف حل انجام می‌شود و آنقدر سرعت ورودی تغییر می کند تا میانگین ضریب درگ عددی نزدیک با صفر شود در مقیاس10^{-6}. در جدول ۱ تغییرات ماکزیمم ضرایب درگ و لیفت بر حسب فرکانس ها و دامنه های مختلف بال زدن مشخص شده است. در طراحی و انتخاب ربات سفره‌ماهی باید ماکزیمم ضریب درگ را در نظر گرفت و به ازای ضریب اطمینانی خاص گشتاور مورد نیاز را محاسبه کرد. به همین دلیل نمودارهای ماکزیمم ضریب درگ در ادامه آورده شده است. در بسیاری از موارد سرعت صعود و نزول سفره‌ماهی نیز حائز اهمیت است، به همین جهت نمودارهای ماکزیمم ضریب لیفت نیز آورده شده است.

جدول ۱- تغییرات ماکزیمم ضرایب درگ و لیفت بر حسب فرکانس‌ها و دامنه‌های مختلف بال زدن

فرکانس = ۰/۶ هرتز				
Displacement (cm)	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶
C_D (max)	۰/۰۰۰۳۰۲	۰/۰۰۱۶۸	۰/۰۰۲۱۷	۰/۰۰۲۳۹
C_L (max)	۰/۰۴۵۸۷	۰/۱۰۳۹	۰/۱۱۹۶	۰/۱۳۶۶

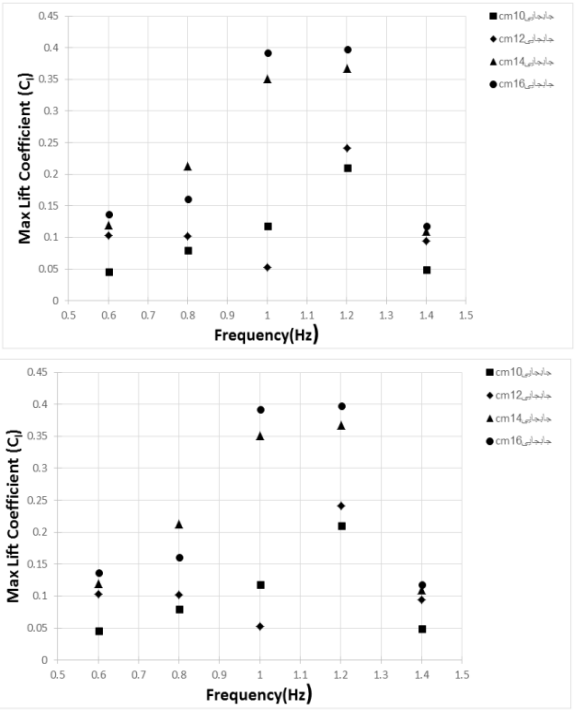
فرکانس = ۰/۸ هرتز				
Displacement (cm)	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶
C_D(max)	۰/۰۰۰۵۵	۰/۰۰۱۰۳	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۲۳
C_L (max)	۰/۰۸۰۰۱	۰/۱۰۱۵۶	۰/۲۱۲۹	۰/۱۶۰۷

فرکانس = ۱ هرتز				
Displacement (cm)	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶
C_D (max)	۰/۰۰۰۳۵	۰/۰۰۰۵۵۵	۰/۰۰۵۸۱	۰/۰۰۷۹۵
C_L (max)	۰/۱۱۸۵	۰/۰۵۲۷۳	۰/۳۵۰۷	۰/۳۹۱۹۸

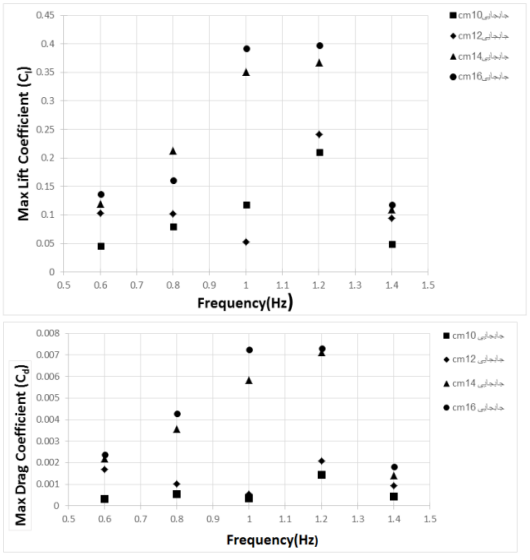
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.7.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.97]

فرکانس = ۱/۲ هرتز				
Displacement (cm)	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶
C_D (max)	۰/۰۰۱۴۳	۰/۰۰۲۰۸۹	۰/۰۰۷۱۳	۰/۰۰۷۳
C_L (max)	۰/۲۰۹۶۲	۰/۲۴۰۸۶	۰/۳۶۷۸	۰/۳۹۸۲

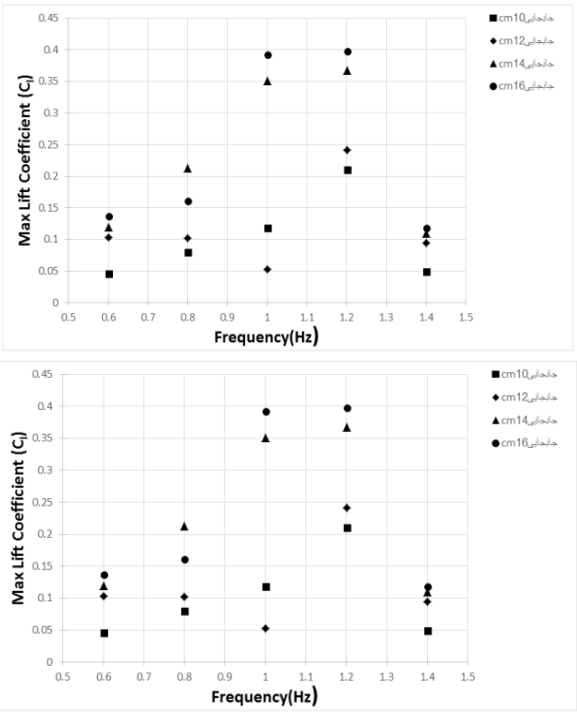
فرکانس = ۱/۴ هرتز				
Displacement (cm)	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶
C_D (max)	۰/۰۰۰۴۳۴	۰/۰۰۰۹۴	۰/۰۰۱۵۲	۰/۰۰۱۸۷
C_L (max)	۰/۰۵۰۲	۰/۰۹۴۲۱	۰/۱۰۹۳	۰/۱۱۹۷۶



شکل ۹ و ۱۰ به مقایسه ضرایب لیفت و درگ در فرکانس‌ها و جابجایی های مختلف می پردازد.



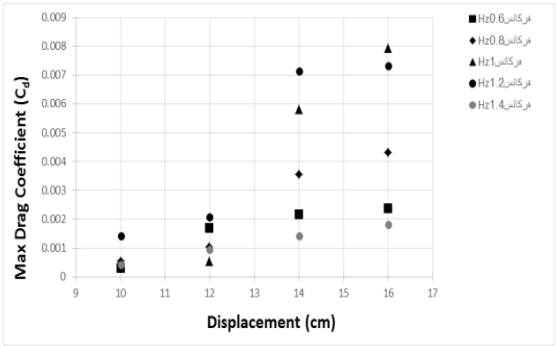
شکل ۹- نمودار تغییرات ضریب درگ ماکزیمم براساس فرکانس‌های مختلف در جابجایی ثابت



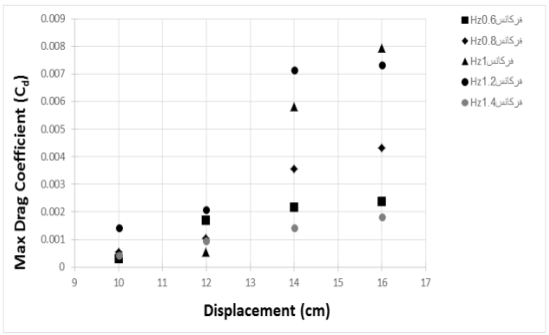
شکل ۱۰- نمودار تغییرات ضریب لیفت ماکزیمم براساس فرکانس‌های مختلف در جابجایی ثابت

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌کنید به ازای بال زدن در دامنه‌ی ثابت و در فرکانس‌های مختلف، در فرکانس ۱/۲ هرتز ضریب درگ ماکزیمم از تمامی فرکانس‌های دیگر بیشتر بوده و سپس در فرکانس۱/۴ هرتز کاهش چشمگیری دارد.

همچنین به ازای دامنه‌های ثابت بال زدن و در فرکانس مینیمم۰/۶ هرتز و فرکانس ماکزیمم ۱/۴ هرتز، ضریب درگ ماکزیمم، در حالت کمینه قرار دارد (شکل ۱۱).

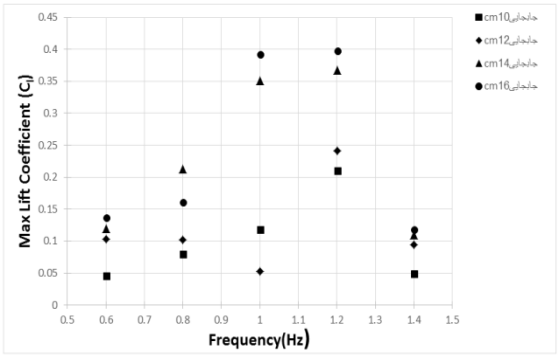


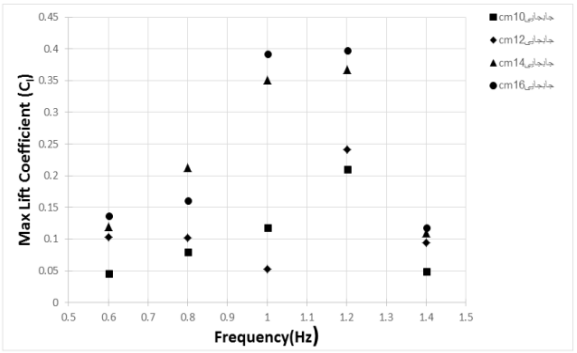
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.7.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.97]

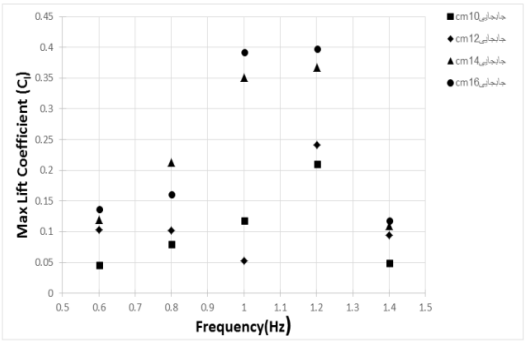


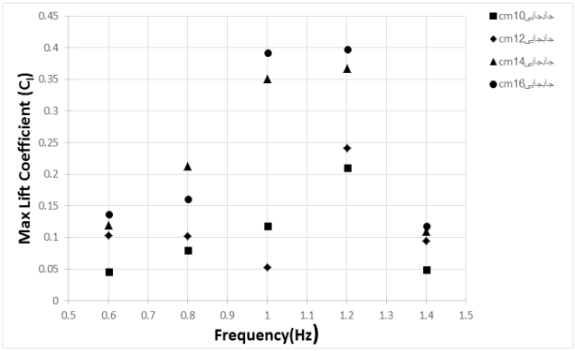
شکل ۱۱- نمودار تغییرات ضریب درگ ماکزیمم براساس جابه‌جایی‌های مختلف در فرکانس ثابت

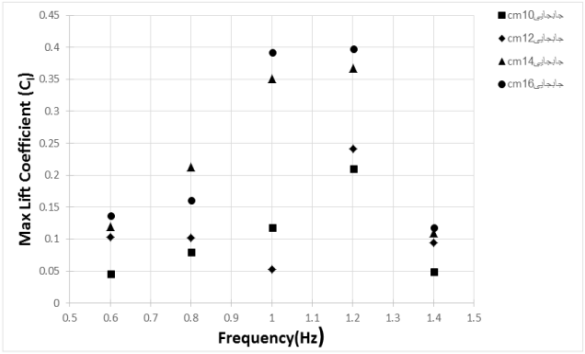
سانتیمتر در تمامی فرکانس‌ها ماکزیمم ضریب درگ در حالت بیشینه قرار داشته و به ازای جابجایی۱۰ سانتیمتر به ازای تمامی فرکانس‌ها ماکزیمم ضریب درگ در حالت کمینه قرار دارد (به ازای دامنه‌های ماکزیمم بال زدن سطح تصویرشده در برابر جریان بزرگتر از سطح تصویری بال زدن به ازای دامنه-های کمتر می باشد، بنابراین با افزایش دامنه‌ی بال زدن و سطح تصویری ماکزیمم ضریب درگ افزایش می‌یابد). در ادامه نمودارهای نیروهای درگ و لیفت برحسب فرکانس به ازای دامنه‌های ثابت رسم شده است. همانطور که در نمودارها نمایان است نمودارها از نظر کیفی مانند نمودارهای ضرایب درگ و لیفت می‌باشند.



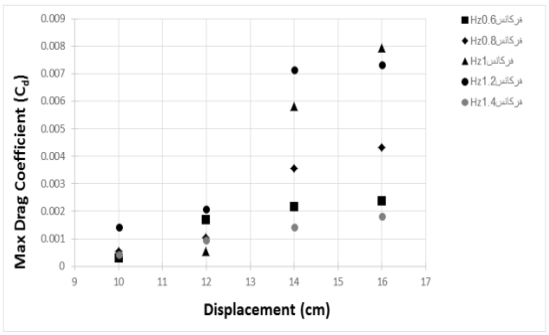






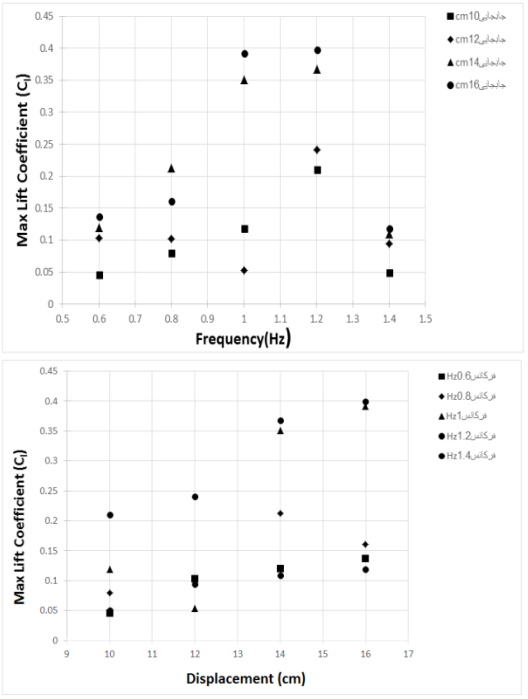


شکل ۱۲ ضریب لیفت برحسب فرکانس نیز به ازای تمامی دامنه‌های ثابت بال زدن در فرکانس۱/۲ هرتز ماکزیمم ضریب لیفت از همگی بیشتر بوده و به ازای فرکانس کمینه ۰/۶ هرتز و فرکانس بیشینه ۱/۴ هرتز ضریب لیفت افت شدیدی داشته است.

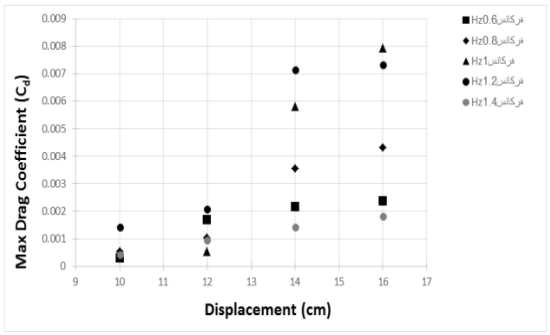


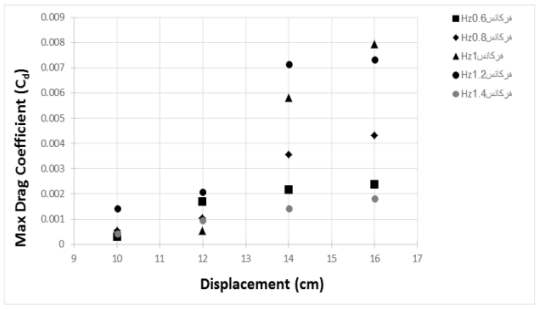
شکل ۱۳ ضریب درگ بر حسب دامنه بال زدن در فرکانس-های مختلف نیز مشاهده می‌شود که به ازای جابجایی۱۶

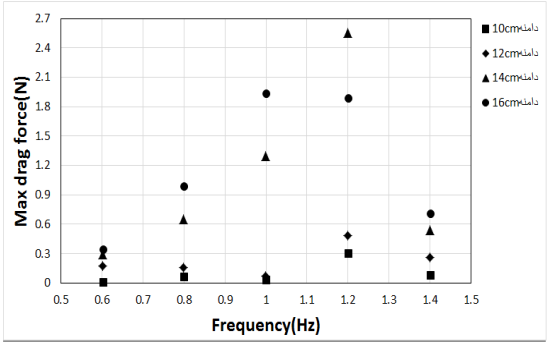
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.7.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.97]



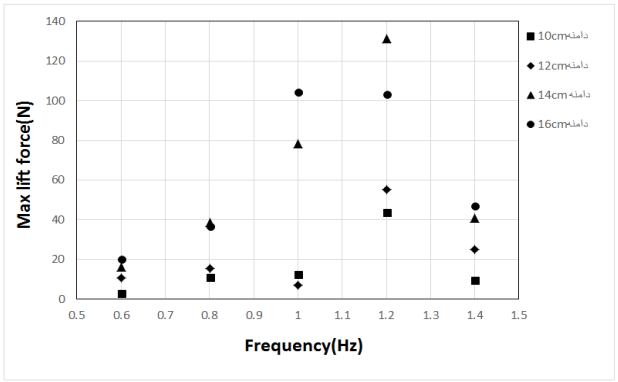
شکل ۱۲- نمودار تغییرات ضریب لیفت ماکزیمم براساس جابه‌جایی-های مختلف در فرکانس ثابت





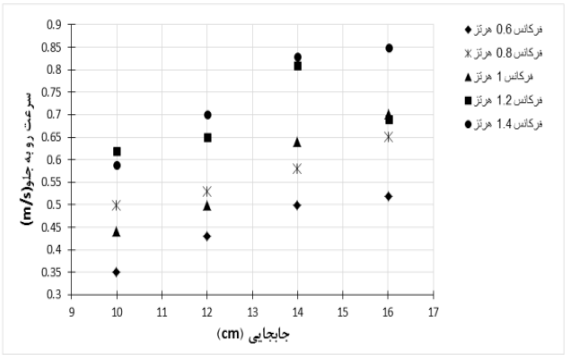


شکل ۱۳- نمودار تغییرات نیروی درگ براساس فرکانس‌های مختلف در دامنه‌های ثابت

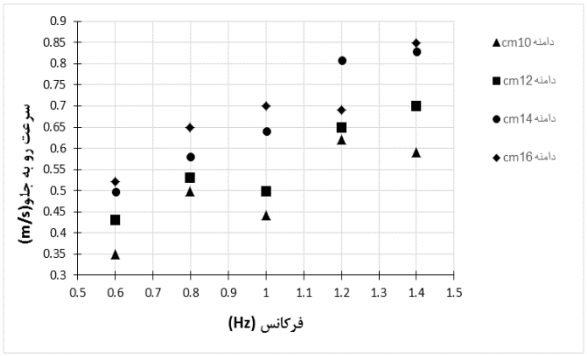


شکل ۱۴- نمودار تغییرات نیروی درگ براساس دامنه‌های مختلف در فرکانس‌های ثابت

در شکل ۱۵ سرعت روبه جلو بر حسب دامنه‌ی بال زدن و در شکل ۱۶ نمودار سرعت روبه جلو بر حسب فرکانس بال زدن ترسیم شده است، همانطور که مشاهده می‌شود تقریباً به ازای همگی فرکانس‌ها با افزایش دامنه بال زدن سرعت روبه جلو افزایش یافته است. در جدول ۲ نیز سرعت حرکت رو به جلو مدل سفره‌ماهی براساس فرکانس ها و دامنه‌های بال زدن مشخص شده است.



شکل ۱۵- نمودار سرعت حرکت روبه جلو برحسب دامنه بال زدن به ازای فرکانس ثابت



شکل ۱۶- نمودار سرعت حرکت روبه جلو برحسب فرکانس بال زدن به ازای دامنه ثابت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.7.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.97]

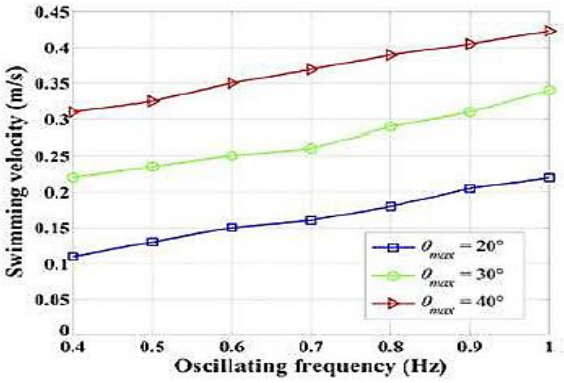
جدول ۲- سرعت حرکت رو به جلو مدل سفره‌ماهی براساس فرکانس ها و دامنه‌های بال زدن

فرکانس(هرتز) / دامنه(سانتیمتر)	۰/۶	۰/۸	۱	۱/۲	۱/۴
۱۰	۰/۳۵	۰/۵	۰/۴۴	۰/۶۲	۰/۵۹
۱۲	۰/۴۳	۰/۵۳	۰/۵	۰/۶۵	۰/۷
۱۴	۰/۵	۰/۵۸	۰/۶۴	۰/۸۱	۰/۸۳
۱۶	۰/۵۲	۰/۶۵	۰/۷	۰/۶۹	۰/۸۵

۶- اعتبارسنجی

با توجه به اینکه در مقالات گذشته هندسه‌ی مورد استفاده هندسه‌ی خاصی می‌باشد در این قسمت فقط روند کلی نمودارها بررسی می‌شوند و همچنین دامنه‌ی بال زدن براساس زاویه می-باشد که با توجه به اینکه عرض هر بال مقدار ۴۰ سانتیمتر است و مقدار دامنه‌ی بال زدن نیز مشخص است زوایا برای هر دامنه از بال زدن به دست

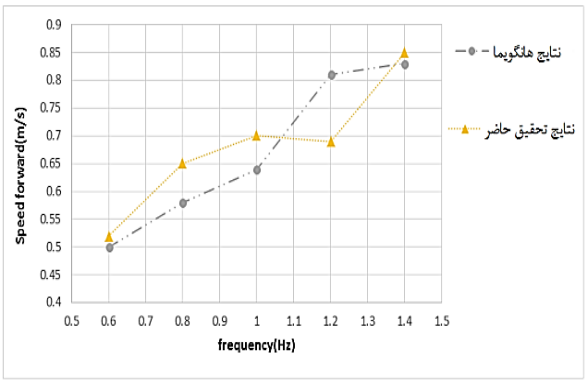
می‌آید. در نمودار شکل ۱۷ سرعت حرکت روبه جلو به ازای فرکانس‌های مختلف در دامنه های ثابت بر اساس مقاله‌ی آقای هانگویما[۳] به دست آمده است.



شکل ۱۷- نمودار سرعت حرکت روبه جلو برحسب فرکانس بال زدن به ازای دامنه ثابت براساس مقاله‌ی هانگویما[۱۸]

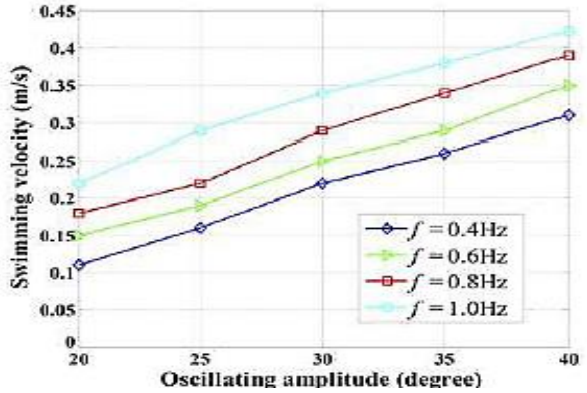
همانطور که از مقایسه‌ی نتایج این نمودارها مشاهده می‌شود، به ازای دامنه بال زدن حدود ۲۰ درجه به ازای افزایش فرکانس مقدار سرعت روبه جلو افزایش می‌یابد.

مقایسه سرعت حرکت روبه جلو برحسب فرکانس بال زدن به ازای دامنه ثابت با نتایج حاصل از مقاله هانگویما[۱۸] مطابق با نمـودار شکل ۱۸ نشان داده شده است.



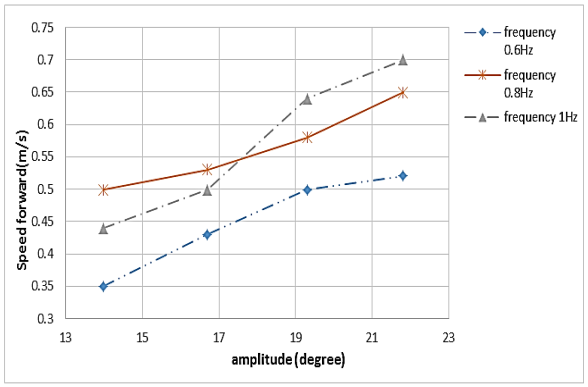
شکل ۱۸- نمودار سرعت حرکت روبه جلو برحسب فرکانس بال زدن به ازای دامنه ثابت در شبیه سازی و مقایسه با مقاله‌ی هانگویما[۱۸]

شکل ۱۹ نیز نمونه‌ای دیگر از نتایج هانگویما می‌باشد.



شکل ۱۹- نمودار سرعت حرکت روبه جلو برحسب دامنه بال زدن به ازای فرکانس ثابت براساس مقاله‌ی هانگویما[۱۸]

برای مقایسه‌ی نمودار مقاله‌ی هانگویما با نمودار تحقیق حاضر فقط فرکانس‌های زیر ۱ هرتز در نظر گرفته می‌شود تا به درستی بتوان آن‌ها را مقایسه کرد. شکل ۲۰ نمونه‌ی دیگر از نتایج تحقیق حاضر می‌باشد.

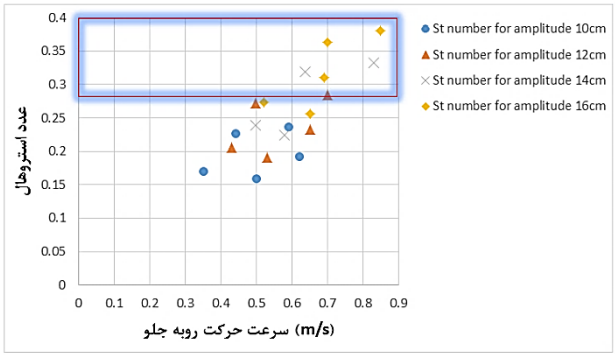


شکل ۲۰- نمودار سرعت حرکت روبه جلو برحسب دامنه بال زدن به ازای فرکانس ثابت

[3] Hongwei Ma

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.7.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.97]

از مقایسه‌ی نتایج می‌توان دریافت که به ازای فرکانس زیر ۱ هرتز با افزایش دامنه نوسان سرعت حرکت رو به جلو افزایش می‌یابد.
یکی دیگر از مقایسه‌هایی که می‌توان با یکی ازمقالات بسیار معتبر انجام داد بررسی عدد استروهال است که سال‌ها ست مورد توجه محققین قرارگرفته که به ازای جه مقادیری از عدد استرهال بالاترین بازده یا سرعت رو به جلو اتفاق می‌افتد. عدد استروهال به ازای دامنه ثابت در فرکانس‌های مختلف به دست آمده و سپس نمودار عدد استروهال براساس سرعت رو به جلو در رسم شده است. در شکل ۲۱ نمودار عدد استروهال بر حسب سرعت رو به جلو نشان داده شده است.



شکل ۲۱- نمودار عدد استروهال بر حسب سرعت رو به جلو

همانطور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود به ازای عدد استروهال تقریبا۰/۲۵ تا ۰/۴ بازده بالاتری یا بالاترین سرعت رو به جلو اتفاق افتاده است. لازم به ذکر است که عدد استروهال می تواند نماینده‌ی خوبی از دامنه و فرکانس بال زدن باشد، تا بتوان با دخالت هر دو پارامتر حالت بهینه با ماکزیمم سرعت روبه جلو را پیدا کرد. با توجه به جدول زیر و نمودار رسم شده می‌توان فهمید که به ازای دامنه های ۱۲،۱۴و۱۶ سانتیمتری در فرکانس ۱/۴هرتز سفره‌ماهی بیشترین سرعت رو به جلو را داشته است و در دامنه‌ی ۱۰ سانتیمتری به ازای همگی فرکانس‌ها سرعت رو به جلوی سفره‌ماهی پایین بوده است.

۷- نتیجه گیری

- با کنترل پارامترهای سینماتیکی حرکت مدل، می‌توان به حالت بهینه‌ای در حرکات سفره‌ماهی و تسریع در سرعت پیش رانش دست یابیم. سرعت روبه جلو وابسته به بزرگترین دامنه و فرکانس ضربات باله می‌باشد.
- همانطور که در نتایج مشاهده شد به ازای تمامی جابه-جایی‌ها در فرکانس۱/۲ هرتز سفره‌ماهی ماکزیمم ضریب درگ را داراست، بنابراین در طراحی و انتخاب موتور باید این فرکانس ملاک قرار گیرد.
- به ازای فرکانس‌های ثابت ۰/۶و ۱/۴ هرتز و جابجایی-های مختلف ماکزیمم ضرایب درگ سفره‌ماهی در حالت کمینه قرار دارند بنابراین برای مصرف کمتر باتری یا انرژی بهتر است موتورها در این فرکانس‌ها کار کنند.
- برای صعود سریعتر سفره‌ماهی و آمدن سریع به سطح آب بهتر است موتورها و درنتیجه‌ی آن بال زدن در فرکانس۱/۲ هرتز صورت گیرد زیرا که ضریب لیفت در حالت ماکزیمم قرار دارد.
- به ازای هر فرکانسی با افزایش دامنه نوسان سرعت پیشروی رو به جلوی سفرهماهی افزایش می‌یابد.

۶ – مراجع

[1] Hoar, W.S., D.J. Randall, and E. Donaldson, *Fish physiology*. 1983: Academic Press.

[2] Shadwick, R.E. and G.V. Lauder, *Fish physiology: fish biomechanics*. Vol. 23. 2006: Elsevier.

[3] Triantafyllou, M.S. and G.S. Triantafyllou, *An efficient swimming machine*. Scientific american, 1995. 272(3): p. 64-70.

[4] Anderson, J.M. and P.A. Kerrebrock. *The vorticity control unmanned undersea vehicle (VCUUV): An autonomous robot tuna*. in Proceedings of the 11th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. 1999.

[5] Hover, F., Ø. Haugsdal, and M. Triantafyllou, *Effect of angle of attack profiles in flapping foil propulsion*. Journal of Fluids and Structures, 2004. 19(1): p. 37-47.

[6] Palmisano, J.S., et al. *Power and thrust comparison of bio-mimetic pectoral fins with traditional propeller-based thrusters*. in 18th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. 2013.

[7] Bechert, D., et al. Drag reduction *mechanisms derived from shark skin. in IN: ICAS, Congress*, 15th, London, England, September 7-12, 1986, Proceedings. Volume 2 (A86-48976 24-01). New York, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1986, p. 1044-1068. 1986.

[8] Dean, B. and B. Bhushan, *The effect of riblets in rectangular duct flow*. Applied Surface Science, 2012. 258(8): p. 3936-3947.

[9] Chen, W.-s., et al., *Numerical simulation of batoid locomotion*. Journal of Hydrodynamics, 2011. 23(5): p. 594-600.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.7.3]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.97]

[10] Moored, K.W., et al., *Bioinspired propulsion mechanisms based on manta ray locomotion*. Marine Technology Society Journal, 2011. 45(4): p. 110-118.

[11] Sfakiotakis, M., D.M. Lane, and J.B.C. Davies, *Review of fish swimming modes for aquatic locomotion*. IEEE Journal of oceanic engineering, 1999. 24(2): p. 237-252.

[12] Triantafyllou, M., et al., *Review of hydrodynamic scaling laws in aquatic locomotion and fishlike swimming*. Applied Mechanics Reviews, 2005. 58(4): p. 226-237.

[13] Jones, K., et al. *Numerical computation of flapping-wing propulsion and power extraction*. in 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 1997.

[14] Bannasch, R., R.P. Wilson, and B. Culik, *Hydrodynamic aspects of design and attachment of a back-mounted device in penguins*. Journal of Experimental biology, 1994. 194(1): p. 83-96.

[15] Lighthill, M., *Hydromechanics of aquatic animal propulsion*. Annual review of fluid mechanics, 1969. 1(1): p. 413-446.

[16] Clark, R.P. and A.J. Smits, *Thrust production and wake structure of a batoid-inspired oscillating fin*. Journal of fluid mechanics, 2006. 562: p. 415-429.

[17] Vogel, S., *Life in moving fluids: the physical biology of flo*w. 1996: Princeton University Press.

[18] Ma, H., et al., *A biomimetic cownose ray robot fish with oscillating and chordwise twisting flexible pectoral fins. Industrial Robot*: An International Journal, 2015. 42(3): p. 214-221.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.39.7.3]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.39.97]