

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

رامین حاجی هاشمی<sup>۱</sup>، امین نجفی<sup>۲</sup>، هادی صفری<sup>۳</sup>، محمدرضا نگهداری<sup>۴\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته / کارشناسی ارشد، دانشگاه امام حسین (ع)

<sup>۲</sup> استادیار / عضو هیئت علمی، دانشگاه امام حسین (ع)

<sup>۳</sup> دانش آموخته / دکتری، دانشگاه صنعتی شریف

<sup>۴</sup> استادیار / عضو هیئت علمی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار

## 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 جذابیت‌ها 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 و آشفستگی حداقل آب اطراف آن می باشد. امروزه ربات‌های زیرسطحی که از سفره‌ماهی الگوگیری می‌شوند، شهادت 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 مانند 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.

## اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲

کلمات کلیدی:

سفره ماهی مانند مانتاری

شبیه‌سازی

ضرایب هیدرودینامیک

## 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 <sup>1</sup>, Amin Najafi <sup>2</sup>, Hadi Safari <sup>3</sup>, Mohammadreza Negahdari <sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Ph.D. Assistant Professor, Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Ph.D. Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

<sup>4</sup> 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

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 حوزه‌ها 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 آشفته‌گی حداقل آب اطراف آن می باشد. انواع موجودات در صنعت رباتیک از ابتدای پیدایش این صنعت تا کنون همیشه در طراحی ربات‌ها 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 آن‌ها را آسیاب شده بیرون می داد. الهام‌گیری از حیوانات و طبیعت نقش مهمی در صنعت رباتیک دارد و در سال‌های اخیر توجه زیادی به این موضوع شده است؛ زیرا این موضوع باعث مطابقت و تعامل هر چه بیشتر ربات‌ها با محیط پیرامونی خود می شود. ربات‌های 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، اقیانوس‌شناسی 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 به دلیل 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 نشست 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 سیستم‌های 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 پر بازده آبزیان، بخش قابل ملاحظه‌ای در کاهش 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 پر بازده در محیط زیر آب هستند. در برخی موارد می‌توانند آنقدر سریع حرکت کنند که به شتاب‌های بیشتر از ۲۵ در پریودهای کم برسند (ویدلر<sup>۱</sup>، ۱۹۹۳). همچنین می‌توانند آنقدر مانور پذیر باشند که به‌مراه تعدادی از ماهیان در کمتر از چند ده میلی ثانیه، ۱۸۰ درجه تغییر سرعت دهند (ولفگانگ<sup>۲</sup>، 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<sup>۳</sup> ایجاد نموده است (بارت<sup>۴</sup>، ۱۹۹۶) (لیو<sup>۵</sup>، ۲۰۰۵). این علاقه‌مندی ناشی از مزایای بالقوه‌ی شیوه‌ی شنای آنها نسبت به روش‌های

مرسوم است. مزایا شامل بهبود بازده سیستم رانش (تریانتافلو<sup>۵</sup>، ۱۹۹۵)، افزایش مانورپذیری (ولفگانگ<sup>۲</sup>، ۱۹۹۹)، و آشفته‌گی حداقل آب اطراف آن می‌باشد (اسفاکیوتاکیس<sup>۶</sup>، ۱۹۹۹). بازده رانش بهینه یکی از مهمترین مزایای حرکت فویل نوسانی است. پروانه‌های مورد استفاده برای حرکت شناورهای دریایی بازده شان معمولاً بیشتر از ۴۰ درصد

<sup>1</sup> Videler

<sup>2</sup> Wolfgang

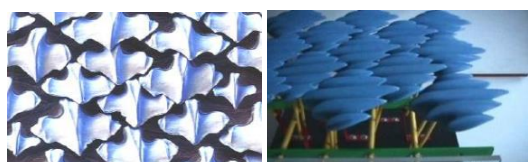
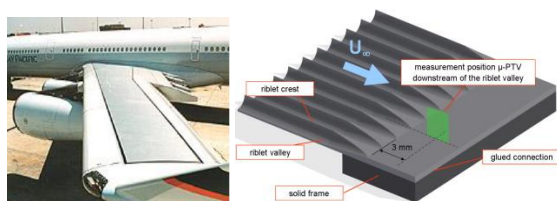
<sup>3</sup> AUV

<sup>4</sup> Barrett

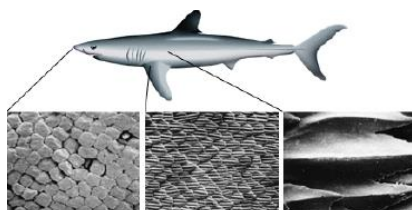
<sup>5</sup> Liu

برای واحد طول ۱۵ (نسبت به عرض واحد) در طول دیوار به دست 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 مومنوم در جهت عرضی - به دلیل گردابه‌های در امتداد جریان می‌شوند. به عبارت دیگر گردابه‌های در امتداد جریان، از دیواره جابجا شده و مومنوم اختلاط آشفتگی جریان کاهش می‌یابد. نظر به اینکه اختلاط، عهده‌دار تنش‌های موضعی بزرگی در نزدیکی دیواره می‌باشد، کاهش آن موجب مقاومت پوسته‌ای کمتر می‌شود. ریبلت‌های کوچک که بدنه‌ی کوسه‌های شناگر سریع را پوشش می‌دهد، مقاومت افزوده شده در جریان آشفته را به دو طریق کاهش می‌دهد: با ممانعت از انتقال در مقطع عرضی و از این سو به آن سو رفتن<sup>۱</sup> گردابه‌های در راستای جریان در زیر لایه لرج، و بلند کردن گردابه‌های با سرعت زیاد از بالای سطح، تنش‌های برشی و انتقال مومنوم 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<sup>[۲]</sup>

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

نیست، در حالیکه تست‌های انجام شده در سال ۱۹۹۵ دانشگاه MIT بر روی باله‌های نوسانی، نشان از دستیابی به بازده‌های بالای ۸۰ درصد می‌توان به دست آورد<sup>[۳]</sup>.

پدیده‌ی فون کارمن بدلیل رهايش 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 اندازه‌گیری شده است. هشت تست لحاظ شده بود و بازده‌های بین ۶ تا ۸۷ درصد بدست آمده است<sup>[۴]</sup>.

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

ریبلت‌ها برآمدگی‌های کوچکی اند که در یک ردیف در امتداد جریان قرار داشته و زبری‌های ناهمسانگرد نسبت به سطح دارند. این شیارها یکی از محدود تکنیک‌هایی است که در جهت کاهش مقاومت اصطکاکی پوسته در لایه مرزی آشفته - هم در آزمایشگاه و هم در آیرودینامیک 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 به دست آید. طی دهه‌های اخیر کاملاً آشکار شده است که لایه مرزی آشفته روی یک سطح با دندان‌های طولی تنش‌های برشی کمتری نسبت به سطوح صاف ایجاد می‌کند.

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

ریبلت‌های با هندسه‌های متفاوتی در تونل باد تست شده‌اند و به اثبات رسیده است که کاهش ۱۰ درصدی مقاومت بر روی سطوح صاف را در پی داشته است. والش و لیندمن<sup>۲</sup> با تست گرفتن از چندین نمونه از ریبلت‌ها شامل: مثلثی، فرورفتگی و برآمدگی‌های سینوسی و U شکل‌ها، ماکزیمم کاهش مقاومت اصطکاکی ۷-۸٪

<sup>2</sup> anisotropic

<sup>1</sup> Walsh, Lindemann

<sup>1</sup> Cross stream

همکارانش بود. دنباله پایین دست پنل زاویه دار 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 نمی‌رسد وجود داشته باشد. برخی منابع پیشنهاد حل معادله ناویر استوکس و پیش‌بینی دقیق تراست را ارائه نموده‌اند، اما این روش نیازمند استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و صرف زمان قابل توجهی برای حل و پیچیدگی‌های مسأله می‌باشد.

طی بررسی‌های مطالعاتی دو روش اصلی برای تخمین نیروی تراست وجود دارد: روش گردابه‌ای (استریلین و تریانتافلو، ۱۹۹۸) و روش جسم کشیده و مشتقاتش<sup>۷</sup> 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 می‌دهد. 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 به دلیل 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 می‌باشد. 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 می‌افتد (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

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

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 می‌کنند. طبق نتایج، اختلافات شاخصی نیز اتفاق می‌افتد. 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 استروهل در بازه ماکزیمم بین ۰/۴۵ و ۰/۸ متغیر بود، که با افزایش ضریب منظری افزایش می‌یافت. اگرچه بازه با افزایش ضریب منظری افزایش می‌یافت، بیشینه در حدود ۳۰ درصد بوده و این مقدار نسبتاً کم احتمالاً 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<sup>۱</sup>، ۲۰۰۴) (بناش<sup>۲</sup>، ۱۹۹۵) (لایتهیل<sup>۳</sup>، ۱۹۶۰) و اغلب بصورت حلقه‌های ورتکس متصل بهم توصیف کردند.

برای ضریب منظری محدود حرکات هیو و پیچ ایرفویل، پارکر و سوریا<sup>۴</sup> (۲۰۰۳) مدلی پیشنهاد دادند که شامل جفت حلقه‌های ورتکس در هم فرو رفته، 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<sup>۱</sup> (۲۰۰۴) برای نیروی محرک باله‌ی سینه ماهی، شبیه سازی‌های عددی در اعداد رینولدز پایین هیو و پیچ فویل که توسط گاکلیل مینی<sup>۵</sup> 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 استروهل بزرگ ویک جدا از هم (دوبخشی) تشکیل شدند. شکل ویک‌های مشابه توسط دونگ و همکارانش (۲۰۰۵) برای فرم بیضوی با ضرائب منظری  $8/\pi$  و  $4/\pi$  مشاهده شد (پایین‌ترین عدداستروهل مورد مطالعه آن‌ها ۰/۳ بود) [۱۴، ۱۵].

در جزئیات مطالعه‌ی تجربی بر روی پنل مستطیلی زاویه دار و ضریب منظری ۰/۵۴، اسمیت<sup>۶</sup> (۲۰۰۶) نتایج مدل ورتکس دنباله برای عدد استروهل بین ۰/۲ و ۰/۲۵ کاملاً مشابه گاکلیل مینی و

<sup>۱</sup> Lauder & Drucker

<sup>۲</sup> Bannasch

<sup>۳</sup> Lighthill

<sup>۴</sup> Parker & Soria

<sup>۵</sup> Guglielmini

<sup>۶</sup> Smits

<sup>۷</sup> vortex theory

<sup>۸</sup> elongated body theory

شبهه‌سازی‌ها، هیو و پیچ تقریباً ۹۰ درجه اختلاف فاز با یکدیگر دارند.

رژیم‌های جریان اطراف آبزیان را می‌توان با استفاده از معادلات ناویر - استوکس تحلیل و یا شبهه‌سازی 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 مومنتم، 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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (2)$$

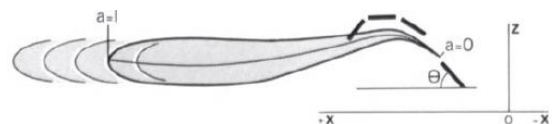
در رابطه بالا،  $U$  بردار سرعت،  $u$ ،  $v$  و  $w$  اجزاء بردار سرعت و  $\rho$  چگالی سیال می‌باشد.

## ۲-۲ معادله‌ی اندازه حرکت سیال

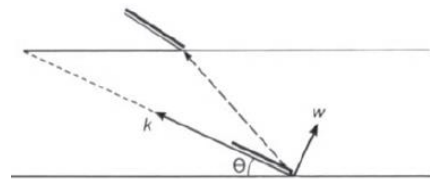
قانون دوم نیوتن بیان می‌کند که نرخ تغییر اندازه حرکت یک ذره‌ی سیال برابر با برآیند نیروهای وارد شده بر ذره است. با در نظر گرفتن یک المان سیال می‌توان معادلات اندازه حرکت را به صورت زیر بیان نمود:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-P + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (3)$$

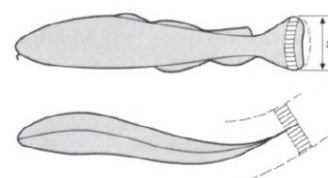
سه بعدی ماهی نشان دهنده‌ی جابه‌جایی ماهی در زمان است، جهت شنا کردن در طول محور مثبت  $X$  می‌باشد و  $Z$  محور عمودی بر سطح افق و  $\Theta$  زاویه‌ی بین انتهای دم و محور  $X$  می‌باشد. در قسمت ب) موقعیت بعد از لبه‌ی دم شکل الف با مقیاس بزرگتری بازتاب شده است که فلش شکسته در نوک آن نمایانگر سرعت لحظه‌ای نوک دم که آن به دو جز  $k$  در راستای 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  $0.5S$  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 می‌شود (تریانتیفیلو 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، ۲۰۰۴) و بر اساس مشاهدات ماهی واقعی و

<sup>1</sup> Triantafyllou

<sup>2</sup> Hoar

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]:

$$U_c(\psi) = U_f(\psi) \quad (۶)$$

که  $u$  بردار سرعت،  $\rho$  چگالی جریان و  $\theta$  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  $\psi$  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 مثل سیمپل<sup>۱</sup> و پیزو روش‌های گام جزئی 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-

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

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

$P$  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  $z$  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:

$$S_{Mx} = 0$$

$$S_{My} = 0$$

$$S_{Mz} = -\rho g \quad (۴)$$

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 آنجایی که 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 معادلات ناویر-استوکس معروف است:

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

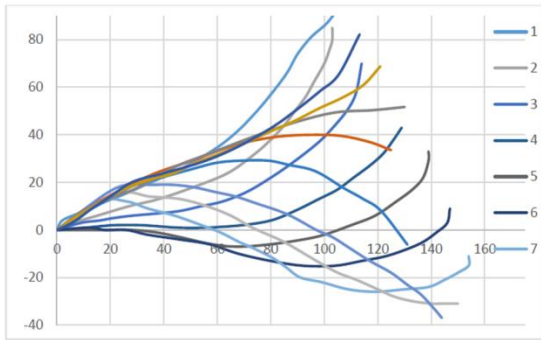
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + div(\rho v U) = -\frac{\partial P}{\partial y} + div(\mu \cdot grad(v)) + S_{My} \quad (۵)$$

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

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

<sup>1</sup> Prediction-Correction  
<sup>2</sup> SIMPLE  
<sup>3</sup> PISO  
<sup>4</sup> Fractional step

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 بزرگتر از قسمت پایین می باشد. شکل ۳ حرکت لبه‌ی حمله‌ی سفره ماهی، براساس سیکل حرکتی نمونه‌ی واقعی را نشان می‌دهد. در فصل بعدی بررسی های رفتاری حرکت سفره ماهی و شبیه سازی های مرتبط پرداخته خواهد شد.



محور تغییر شکل باله در جهت عرض باله (میلیمتر)

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

### ۳- شبیه سازی 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<sup>۵</sup> و حل جریان سیال<sup>۶</sup> صورت می گیرد که مراحل آن از اضافه کردن جنس سیلیکون تا گرفتن کنتورهای نهایی در زیر آمده است.

برای مشاهده جابجایی ها، کرنش ها، تنش ها و... به صورت کانتور و یا به وسیله‌ی probe برای هر نقطه دلخواه به حل اضافه می شود. به عنوان مثال تغییر شکل بال ها در جهت Z به صورت نمودار براساس زمان در شکل ۴ نشان داده شده است.

توان فرض کرد که صفحه از طریق نوسان باله های ری عمود بر محور اصلی بدنه در خلال شنا کردن تغییر شکل می دهد. 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 می باشد. در این تحقیق از روش های مش بندی مجدد<sup>۱</sup> و یکنواخت سازی فرنی<sup>۲</sup> مورد استفاده شده است. مبنای روش مش بندی مجدد بر اساس انحراف از اندازه‌ی المان های اولیه و حداقل کیفیت تعیین شده است و با انحراف از این مقادیر کنترلی، مش ها حذف گردیده و ناحیه حل مجدداً مش بندی می شود. حرکت جسم در توابع تعریف شده توسط کاربر<sup>۳</sup> (UDF) در شبیه سازی هیدرودینامیکی مرتبط با فلونت مشخص شده است. تمامی شبیه سازی ها 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 می باشد:

- حرکت موجی شکل در بدن

- باله های زوج (سینه ای و شکمی)

- باله های فرد (دمی، پشتی و خروچی)

یا ترکیبی از موارد بالا.

هر کدام از این روش ها برای حرکت نیاز به توانایی های فیزیولوژی و تغییرات حرکتی ماهیان است. حرکات موجی سفره ماهی از ترکیب دو نوع حرکت می باشد: حرکت موج عرضی در خلاف حرکت و حرکت بال زدن. به عبارت دیگر سفره ماهیان از هر دو قسمت بدنه و باله های سینه در خلال حرکت استفاده می کند. در این تحقیق حرکت رو به جلو فقط با حرکات موجی باله ی سینه انجام و قسمت میانی در حالت مستقیم باقی می ماند. برای دستیابی به شنای خطی رو به جلو، حرکات متقارن بر روی باله های سینه در هر دو طرف بدنه، برای بی اثر کردن نیروهای جانبی اعمال می شود. بنابراین نیرو در جهت جانبی در محاسبات بعدی نادیده گرفته شده است. به علاوه برای کاهش جابجایی در جهت Y (در جهت عمق)، حرکت در آن جهت بصورت نوسانی در نظر گرفته و بصورت زیر بیان می شود.

$$y(x,t) = A \sin(kz - \omega t) \quad (7)$$

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

<sup>4</sup> Fluid-Solid Interaction

<sup>5</sup> Transient Structural

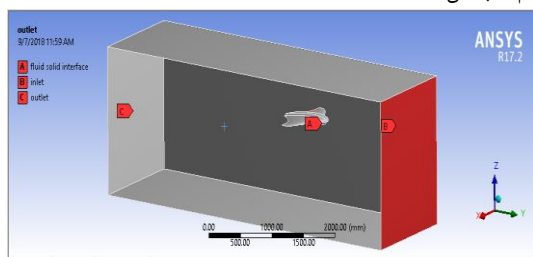
<sup>6</sup> Fluid Flow (Fluent)

<sup>1</sup> Remeshing

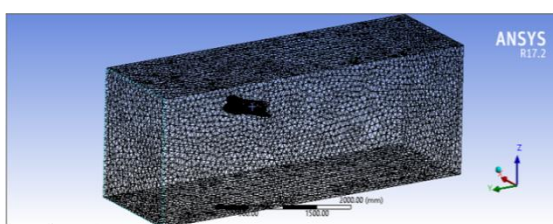
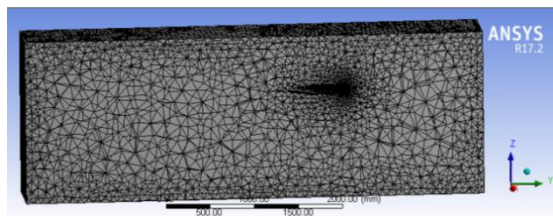
<sup>2</sup> Smoothing

<sup>3</sup> User-Defined Functions





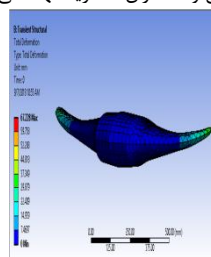
شکل ۵- نامگذاری شرایط مرزی



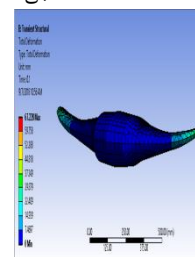
(الف)

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

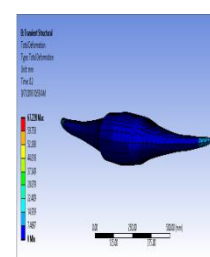
برای شبکه بندی بدنه‌ی سفره ماهی به قسمت مدل سازی نرم افزار می‌رویم. با باز کردن قسمت مربوطه، سایر تنظیمات حل و حلگر نیز فعال می‌شوند. برای مش زدن بدنه‌ی سفره ماهی به تنهایی قسمت دامنه سیال را از نمودار درختی جدا کرده و بدنه مش زده می‌شود. برای مش زدن بدنه به این گونه عمل می‌شود که ابتدا قسمت بدنه وسط سفره ماهی 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 متعادل ۰/۸۵۹ است.



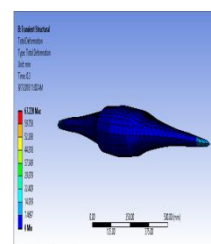
Time = 0s



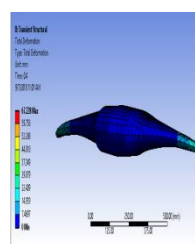
Time = 0.1s



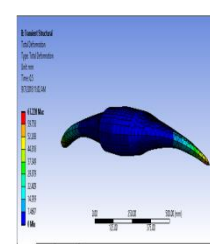
Time = 0.2s



Time = 0.3s



Time = 0.4s



Time = 0.5s

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  $k-\epsilon$  گرفته می‌شود. نوع سیال آب انتخاب شده و سپس در قسمت شرایط مرزی، 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 نام گذاری می‌شود.

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

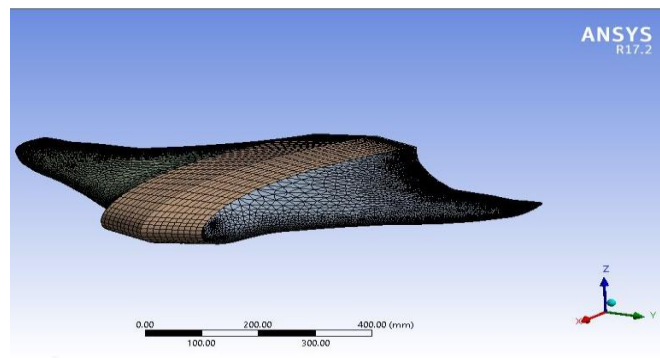
<sup>1</sup> boundary conditions

<sup>2</sup> suppress

<sup>3</sup> inlet

<sup>4</sup> outlet





شکل ۷- نمایی از مش و کیفیت آن

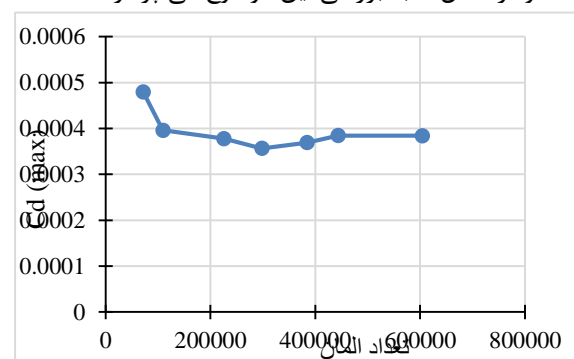
## ۵- بررسی نتایج

در این تحقیق هیدرودینامیک حرکت باله سفره ماهی 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 سازی های انجام گرفته بر روی آن خواهیم پرداخت، حرکت باله سفره ماهی به صورت نوسانی و نتایج آن برای فرکانس ها و دامنه های مختلف انجام شده است.

سرعت ورودی تغییر می کند تا میانگین ضریب درگ عددی نزدیک با صفر شود در مقیاس  $10^{-6}$ . 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 سفره ماهی 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 سفره ماهی نیز حائز اهمیت است، به همین جهت نمودارهای ماکزیمم ضریب لیفت نیز آورده شده است.

## ۵-۱ استقلال از شبکه

به منظور اعتبار سنجی شبیه سازی انجام شده، بر اساس کیفیت-ها و اندازه های مختلف از مش شبیه سازی را انجام می دهیم 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 دامنه های مختلف حل انجام می شود و آنقدر

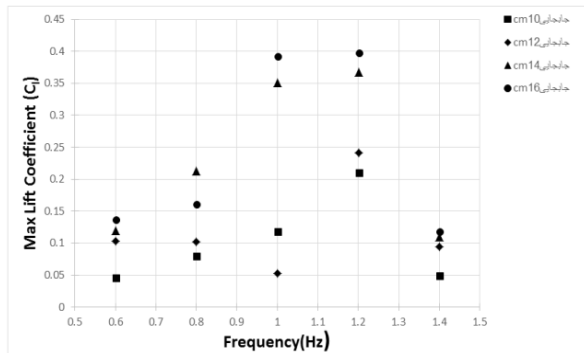
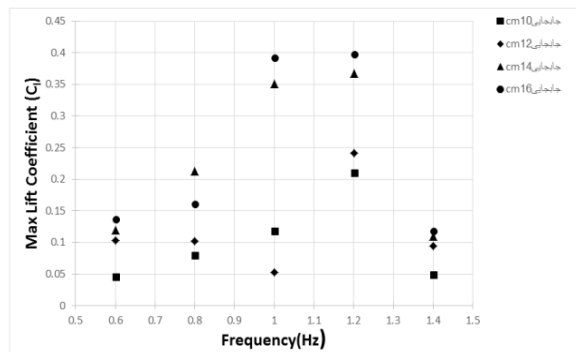
جدول ۱- تغییرات ماکزیمم ضرایب درگ و لیفت بر حسب فرکانس ها و دامنه های مختلف بال زدن

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

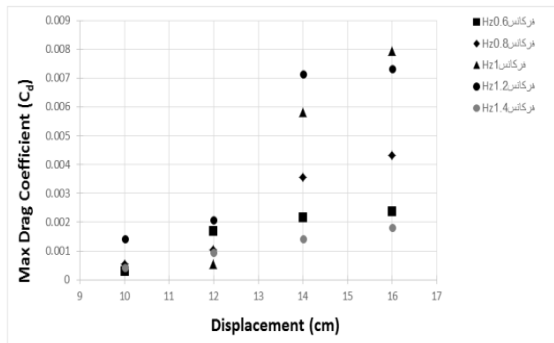
شکل ۹- نمودار تغییرات ضریب درگ ماکزیمم براساس فرکانس‌های مختلف در جابجایی ثابت



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

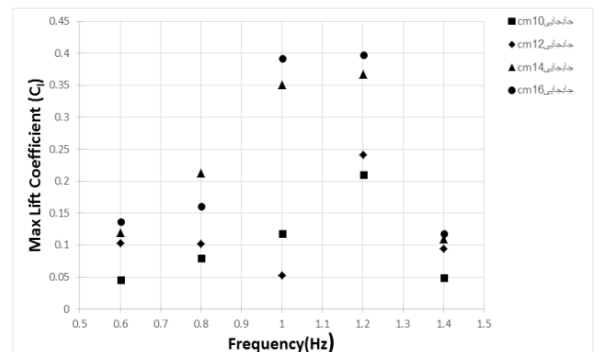
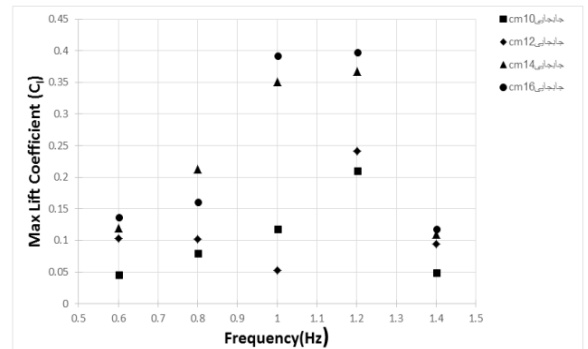
همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌کنید به ازای بال زدن در دامنه‌ی ثابت و در فرکانس‌های مختلف، در فرکانس ۱/۲ هرتز ضریب درگ ماکزیمم از تمامی فرکانس‌های دیگر بیشتر بوده و سپس در فرکانس ۱/۴ هرتز کاهش چشمگیری دارد.

همچنین به ازای دامنه‌های ثابت بال زدن و در فرکانس مینیمم ۰/۶ هرتز و فرکانس ماکزیمم ۱/۴ هرتز، ضریب درگ ماکزیمم، در حالت کمینه قرار دارد (شکل ۱۱).

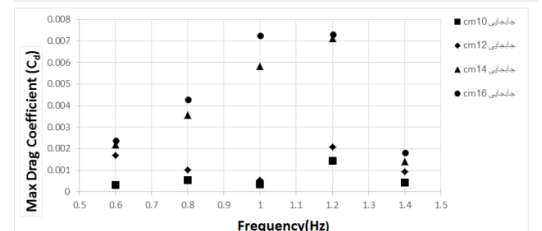
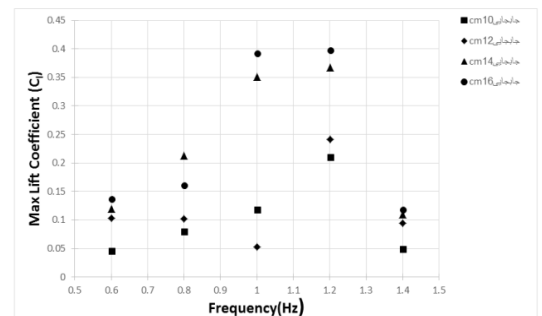


فرکانس = ۱/۲ هرتز				
Displacement (cm)	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶
C <sub>D</sub> (max)	۰/۰۰۱۴۳	۰/۰۰۲۰۸۹	۰/۰۰۷۱۳	۰/۰۰۷۳
C <sub>L</sub> (max)	۰/۲۰۹۶۲	۰/۲۴۰۸۶	۰/۳۶۷۸	۰/۳۹۸۲

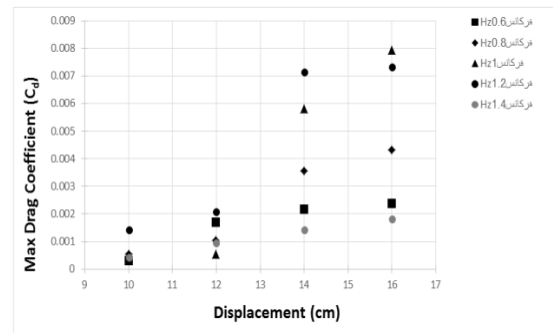
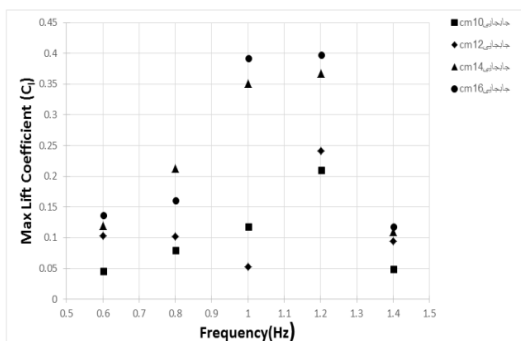
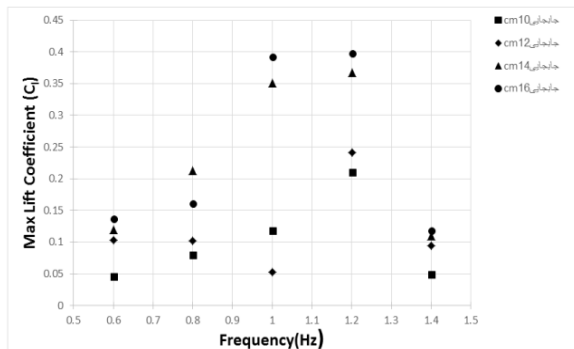
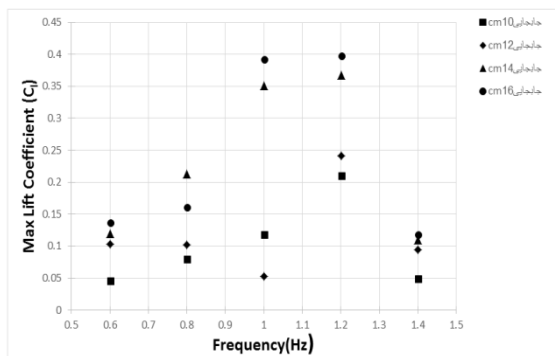
فرکانس = ۱/۴ هرتز				
Displacement (cm)	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶
C <sub>D</sub> (max)	۰/۰۰۰۴۳۴	۰/۰۰۰۹۴	۰/۰۰۱۵۲	۰/۰۰۱۸۷
C <sub>L</sub> (max)	۰/۰۵۰۲	۰/۰۹۴۲۱	۰/۱۰۹۳	۰/۱۱۹۷۶



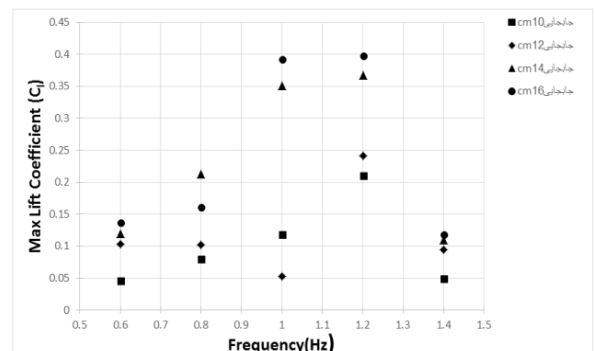
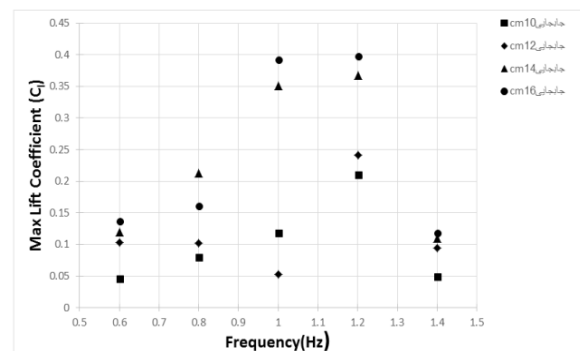
شکل ۹ و ۱۰ به مقایسه ضرایب لیفت و درگ در فرکانس‌ها و جابجایی‌های مختلف می‌پردازد.



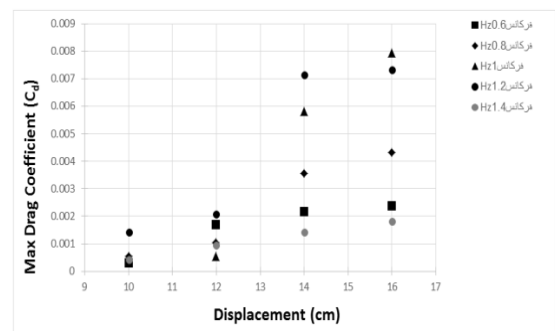
سانتیمتر در تمامی فرکانس‌ها ماکزیمم ضریب درگ در حالت بیشینه قرار داشته و به ازای جابجایی ۱۰ سانتیمتر به ازای تمامی فرکانس‌ها ماکزیمم ضریب درگ در حالت کمینه قرار دارد (به ازای دامنه‌های ماکزیمم بال زدن سطح تصویرشده در برابر جریان بزرگتر از سطح تصویری بال زدن به ازای دامنه-های کمتر می باشد، بنابراین با 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.



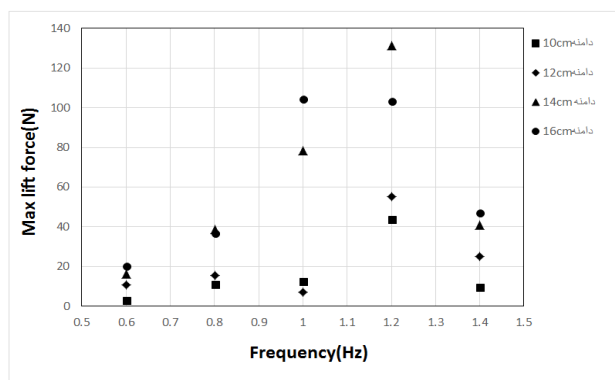
شکل ۱۱- نمودار تغییرات ضریب درگ ماکزیمم براساس جابه‌جایی‌های مختلف در فرکانس ثابت



شکل ۱۲- ضریب لیفت برحسب فرکانس نیز به ازای تمامی دامنه‌های ثابت بال زدن در فرکانس ۱/۲ 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.



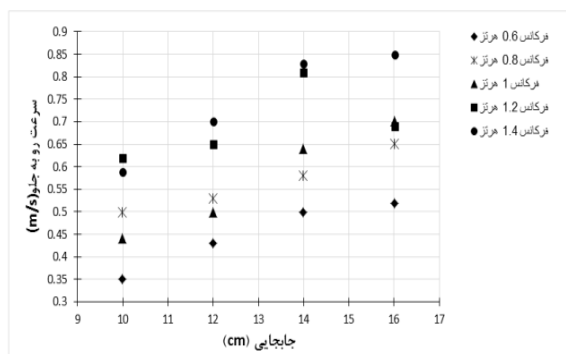
شکل ۱۳- ضریب درگ بر حسب دامنه بال زدن در فرکانس-های مختلف نیز مشاهده می‌شود که به ازای جابجایی ۱۶



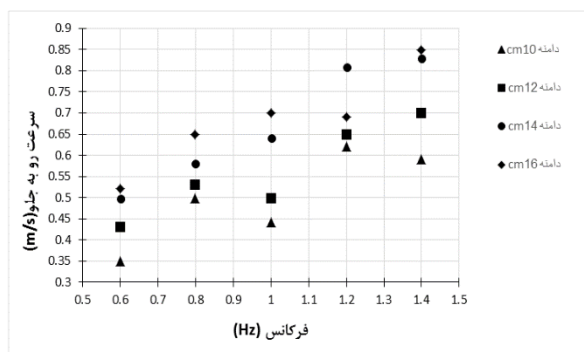
شکل ۱۴- نمودار تغییرات نیروی درگ براساس دامنه‌های مختلف در فرکانس‌های ثابت

در

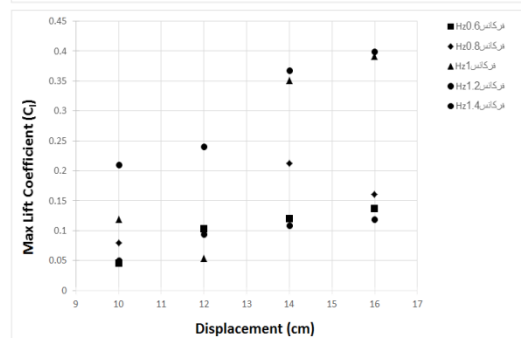
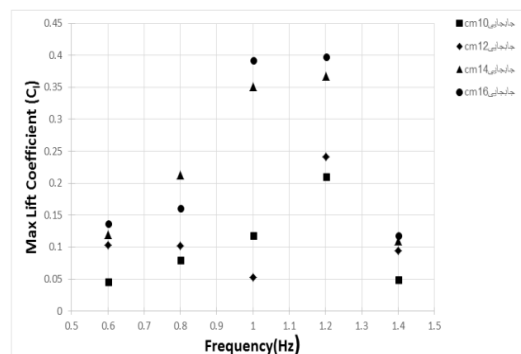
شکل ۱۵ سرعت روبه جلو بر حسب دامنه‌ی بال زدن و در شکل ۱۶ نمودار سرعت روبه جلو بر حسب فرکانس بال زدن ترسیم شده است، همانطور که مشاهده می‌شود تقریباً به ازای همگی فرکانس‌ها با افزایش دامنه بال زدن سرعت روبه جلو افزایش یافته است. در جدول ۲ نیز سرعت حرکت رو به جلو مدل سفره‌ماهی براساس فرکانس‌ها و دامنه‌های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



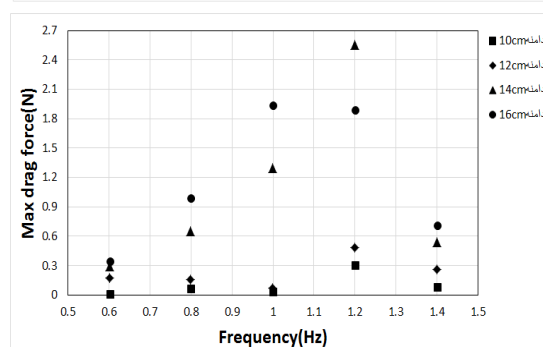
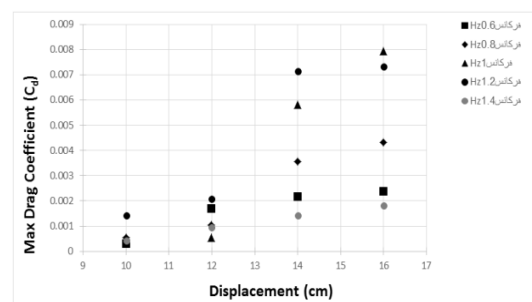
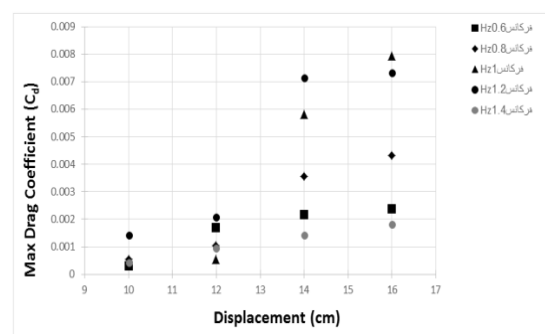
شکل ۱۵- نمودار سرعت حرکت روبه جلو بر حسب دامنه بال زدن به ازای فرکانس ثابت



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



شکل ۱۷- نمودار تغییرات ضریب لیفت ماکزیمم براساس جابه‌جایی- های مختلف در فرکانس ثابت



شکل ۱۸- نمودار تغییرات نیروی درگ براساس فرکانس‌های مختلف در دامنه‌های ثابت

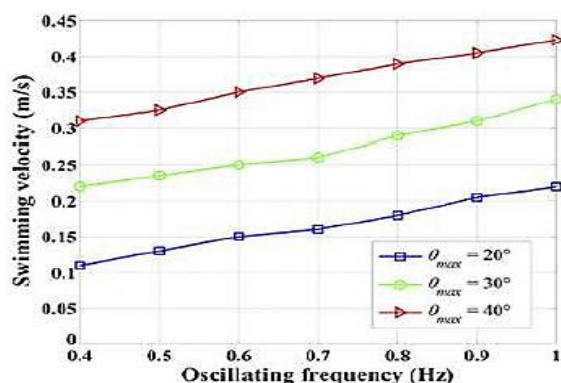
جدول ۲- سرعت حرکت رو به جلو مدل سفره ماهی براساس فرکانس ها و دامنه های بال زدن

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 می‌باشد 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

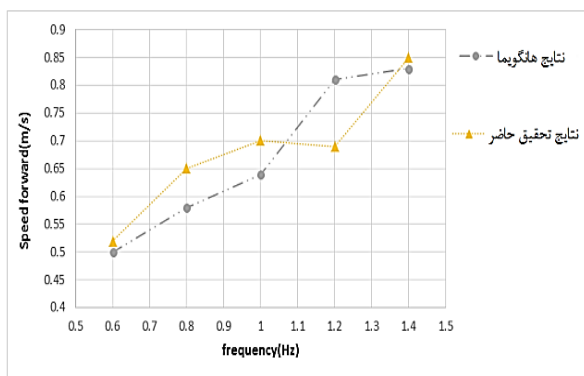
می‌آید. در نمودار شکل ۱۷ سرعت حرکت روبه جلو به ازای فرکانس‌های مختلف در دامنه‌های ثابت بر اساس مقاله‌ی آقای هانگویم<sup>۳</sup> به دست آمده است.



شکل ۱۷- نمودار سرعت حرکت روبه جلو برحسب فرکانس بال زدن به ازای دامنه ثابت براساس مقاله‌ی هانگویم<sup>۳</sup> [۱۸]

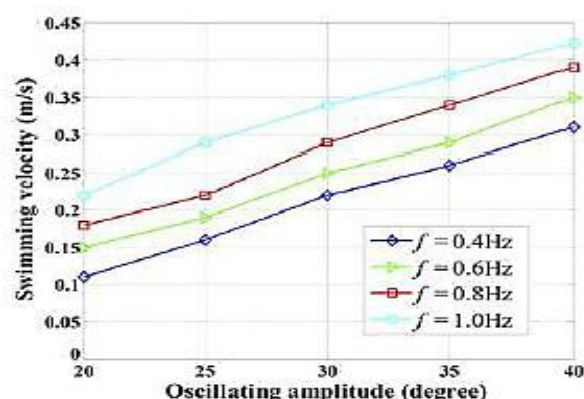
همانطور که از مقایسه‌ی نتایج این نمودارها مشاهده می‌شود، به ازای دامنه بال زدن حدود ۲۰ درجه به ازای افزایش فرکانس مقدار سرعت روبه جلو افزایش می‌یابد.

مقایسه سرعت حرکت روبه جلو برحسب فرکانس بال زدن به ازای دامنه ثابت با نتایج حاصل از مقاله هانگویم<sup>۳</sup> [۱۸] مطابق با نمودار شکل ۱۸ نشان داده شده است.



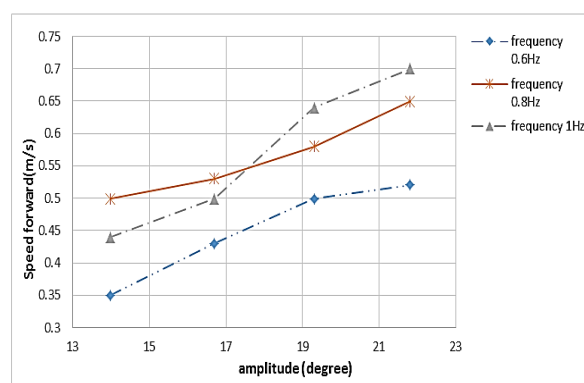
شکل ۱۸- نمودار سرعت حرکت روبه جلو برحسب فرکانس بال زدن به ازای دامنه ثابت در شبیه سازی و مقایسه با مقاله‌ی هانگویم<sup>۳</sup> [۱۸]

شکل ۱۹ نیز نمونه‌ای دیگر از نتایج هانگویم می‌باشد.



شکل ۱۹- نمودار سرعت حرکت روبه جلو برحسب دامنه بال زدن به ازای فرکانس ثابت براساس مقاله‌ی هانگویم<sup>۳</sup> [۱۸]

برای مقایسه‌ی نمودار مقاله‌ی هانگویم 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.



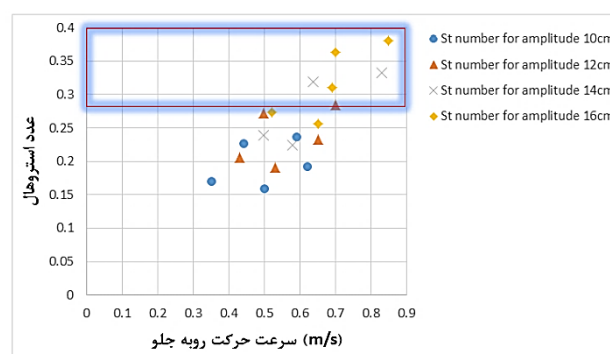
شکل ۲۰- نمودار سرعت حرکت روبه جلو برحسب دامنه بال زدن به ازای فرکانس ثابت

- به ازای فرکانس‌های ثابت ۰/۶ و 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 در نتیجه‌ی آن بال زدن در فرکانس ۱/۲ 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.

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 از مقالات بسیار معتبر انجام داد بررسی عدد استروهال است که سال‌هاست مورد توجه محققین قرار گرفته 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 تقریباً ۰/۲۵ تا ۰/۴ بازده بالاتری یا بالاترین سرعت رو به جلو اتفاق افتاده است. لازم به ذکر است که عدد استروهال می‌تواند 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 دامنه‌های ۱۶ و ۱۲، ۱۴ سانتیمتری در فرکانس ۱/۴ هرتز 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 جابه‌جایی‌ها در فرکانس ۱/۲ هرتز سفره‌ماهی ماکزیمم ضریب درگ را داراست، بنابراین در طراحی و انتخاب موتور باید این فرکانس ملاک قرار گیرد.



[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 flow*. 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.