J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 48, 2026. (109-120)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Bio-Inspired Design and Hydrodynamic Analysis of an Exploratory Underwater Vehicle based on Body Shape of the Longnose Spearfish

Yousef Riyazati[1], Kazem Hejranfar[2*]

[1] *Master of Science, Sharif University of Technology; yousef.riyazati77@sharif.edu*
[2] *Professor, Sharif University of Technology; khejran@sharif.edu (K. Hejranfar)*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 5 Feb 2026
Last modification: 9 May 2026
Accepted: 11 May 2026
Available online: 11 May 2026

Article type:
Research paper

Keywords:
Bio-inspired design
Hydrodynamic analysis
Submersible hull optimization
Drag reduction
Sailfish morphology

ABSTRACT

The longnose spearfish, one of the fastest ocean predators and a member of the billfish family, can reach speeds of about 110 km/h. It possesses a slender and highly hydrodynamic body that reduces flow disturbances, minimizes drag, and enhances motion stability. In this study, the design of an exploratory underwater vehicle inspired by the overall body form of the longnose spearfish is investigated. First, the morphological and hydrodynamic characteristics of the longnose spearfish and the flow behavior around its general body shape are examined, particularly at its maximum swimming speed of 31 m/s, as well as at lower speeds for the validation with the available experimental results. Subsequently, using its general body shape and applying proper geometric modifications, an initial model of the underwater vehicle is designed and developed. The appropriate location, installation angle, and number of control surfaces compatible with the body structure of the spearfish are then analyzed. Numerical simulations are carried out for the designed bio-inspired underwater vehicle at different speeds and the results are compared with those of a reference geometry having nearly the same wetted surface area. The numerical results show that the drag coefficient of the bio-inspired geometry is approximately between %31 to %52 lower than that of the existing underwater vehicle geometry. This finding indicates that applying bio-inspired design principles can significantly improve hydrodynamic performance and may contribute to the development of more efficient underwater systems and propulsion technologies for marine applications.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.109]

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.48.109

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۸، ۱۴۰۴، (۱۲۰-۱۰۹)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

طراحی زیست‌الهام و تحلیل هیدرودینامیکی یک وسیله زیرسطحی اکتشافی برپایه شکل بدن نیزه‌ماهی نیزه‌بلند

یوسف ریاضتی[۱]، کاظم هجران‌فر[۲]*

[۱] کارشناسی ارشد هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، yousef.riyazati77@sharif.edu

[۲] استاد، دانشگاه صنعتی شریف، khejran@sharif.edu

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۱۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

طراحی بیومیمتیک

تحلیل هیدرودینامیکی

بهینه‌سازی بدنه زیرسطحی

کاهش پسا

مورفولوژی نیزه‌ماهی

چکیده

نیزه‌ماهی نیزه‌بلند به عنوان یکی از سریع‌ترین شکارچیان اقیانوس و از خانواده نیزه‌ماهی‌ها با سرعتی در حدود ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت، دارای بدنی کشیده است که موجب کاهش اغتشاش جریان، کمینه‌سازی نیروی پسا و افزایش پایداری حرکتی آن می‌شود. در این پژوهش، طراحی یک وسیله زیرسطحی اکتشافی با الهام از فرم کلی بدن نیزه‌ماهی نیزه‌بلند مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا ویژگی‌های مورفولوژیکی و هیدرودینامیکی نیزه‌ماهی نیزه‌بلند و رفتار جریان پیرامون فرم کلی بدن آن، به‌ویژه در بیشینه سرعت شنا معادل ۳۱ متربرثانیه و سرعت‌های کمتر جهت اعتبارسنجی با نتایج تجربی موجود مطالعه شده است. سپس، با استفاده از فرم کلی بدن این ماهی و با اعمال تغییرات مناسب هندسی، مدل اولیه یک وسیله زیرسطحی طراحی و توسعه یافته است. در ادامه، انتخاب محل، زاویه نصب و تعداد سطوح کنترلی مناسب براساس ساختار بدن نیزه‌ماهی نیزه‌بلند صورت گرفته است. شبیه‌سازی عددی برای هندسه زیرسطحی زیست‌الهام طراحی‌شده در سرعت‌های مختلف انجام شده و نتایج حاصل برای این هندسه با هندسه مرجع دارای سطح ترشده تقریبا یکسان مقایسه گردیده است. نتایج عددی نشان می‌دهد ضریب پسای هندسه زیرسطحی زیست‌الهام بین ۳۱ تا ۵۲ درصد کمتر از هندسه زیرسطحی موجود است. این نتیجه نشان می‌دهد بهره‌گیری از اصول زیست‌الهام در طراحی وسایل زیرسطحی می‌تواند به طور مؤثری موجب بهبود عملکرد هیدرودینامیکی شده و در توسعه سامانه‌های زیرسطحی و پیشران‌های کارآمد برای کاربردهای دریایی مورد استفاده قرار گیرد.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.48.109

حق نشر: © ۲۰۲۶ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.109]

۱- مقدمه

با گسترش نیاز بشر به اکتشاف، پایش و بهره‌برداری پایدار از محیط‌های دریایی، توسعه‌ی وسایل زیرسطحی کارآمد به یکی از حوزه‌های مهم پژوهش در مهندسی دریا و رباتیک دریایی تبدیل شده است. در چنین کاربردهایی، بهبود عملکرد هیدرودینامیکی، کاهش نیروی پسا و افزایش بهره‌وری حرکتی از جمله چالش‌های اساسی در طراحی این سامانه‌ها محسوب می‌شود. یکی از رویکردهای نوین برای دستیابی به طراحی‌های کارآمدتر، بهره‌گیری از اصول طراحی زیست‌الهام [۱] است؛ رویکردی که با الهام از ساختارها و سازوکارهای بهینه‌شده در طبیعت، تلاش می‌کند راهکارهایی مؤثر برای مسائل مهندسی ارائه دهد. در محیط‌های آبی، بسیاری از موجودات دریایی طی میلیون‌ها سال تکامل، به فرم‌های بدنی بسیار کارآمدی برای حرکت در سیال دست یافته‌اند. در این میان، نیزه‌ماهی نیزه‌بلند به عنوان یکی از سریع‌ترین شکارچیان اقیانوسی با سرعتی در حدود ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت، دارای بدنی کشیده، هیدرودینامیکی و بسیار سازگار با حرکت در آب است. شکل بدن این ماهی با کاهش اغتشاش جریان، کمینه‌سازی نیروی پسا و افزایش پایداری حرکتی، شرایطی مناسب برای حرکت سریع و کارآمد فراهم می‌کند.

نیزه‌ماهی نیزه‌بلند از گونه‌های اقیانوسی و فراسطحی است که معمولاً در لایه‌های بالایی آب زندگی می‌کند. بیشترین مشاهده این ماهی در عمق‌های حدود ۱۰ تا ۱۵۰ متری است؛ یعنی جایی که نور کافی وجود دارد و شکار فراوان است. با این حال، در شرایط خاص می‌تواند تا عمق‌های حدود ۲۵۰ متری نیز نفوذ کند، ولی بخش عمده رفتارهای تغذیه‌ای آن در ناحیه‌ی اپی‌پلاژیک [۲] انجام می‌شود. بدن این ماهی بسیار کشیده، باریک است که به‌طور طبیعی پسا را کاهش می‌دهد. زائده‌ی نیزه مانند جلوی سر جریان آب را به‌صورت پایدار هدایت کرده و جدایش جریان را کمینه می‌کند. این شکارچی بدون ایجاد موج بلند و در نهایت سکوت، ابتدا به طعمه نزدیک می‌شود و به صورت حمله ناگهانی [۳] یا حمله قوسی‌شکل که با شتاب‌گیری سریع آغاز می‌شود، از خود نیزه برای ضربه زدن و شکار استفاده می‌کند.

لو و چانگ [۴] در سال ۲۰۱۰ [۱] با انجام یک مطالعه پارامتریک و آماری، عملکرد یک سامانه رباتیک الهام‌گرفته از ماهی با الگوی شنای کارانگیفرم را مورد بررسی قرار دادند. هدف این پژوهش، تحلیل تأثیر پارامترهای سینماتیکی و ویژگی‌های ساختاری باله دمی بر کارایی شنا بود. نتایج نشان داد که فرکانس و دامنه نوسان باله دمی بیشترین نقش را در تولید نیروی پیشران ایفا می‌کنند.

ساگونگ [۵] و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۲]، به تحلیل دو گونه از آبزیان پرسرعت دریایی، یعنی شمشیرماهی و نیزه‌ماهی پرداختند. مطالعه‌ی آنان به‌صورت تجربی و برپایه نمونه‌های تاکسیدرمی [۶] شده، بدون حضور باله‌های اصلی و فرعی انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که این دو گونه از سریع‌ترین ماهیان شناخته‌شده‌ی دریایی به شمار می‌روند؛ به‌طوری‌که حداکثر سرعت نیزه‌ماهی حدود ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت با ضریب پسا ۰/۰۰۹ گزارش شده است. لازم به ذکر است نیزه‌ماهی نیزه‌بلند نیز از خانواده شکارچیان پرسرعت نیزه‌ماهی است، با این تفاوت که کاملا در سکوت و خفا و بدون ایجاد اختلال در آب شکار خود را انجام می‌دهد.

ماگرتنز [۷] و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۳] با استفاده از مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی حرکت نیزه‌ماهی را به دقت شبیه‌سازی کردند. آن‌ها دریافتند که شکل بدنه این ماهی به طور خاص بهینه شده تا جریان آب حول آن به صورت منظم و پایدار حرکت کند، که این امر باعث کاهش چشمگیر آشفتگی در اطراف بدن این ماهی می‌شود. کاهش جریان آشفته به معنای کاهش نیروی پسا است که ماهی باید در برابر آن کار کند، بنابراین، مصرف انرژی در هنگام شنا در سرعت‌های بسیار بالا به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

ون و لاندر [۸] در سال ۲۰۱۳ [۴] از یک سامانه رباتیک فلاپینگ–فویل با جبران اثرات اینرسی استفاده کردند تا سازوکارهای فیزیکی حاکم بر حرکت موجی در ماهی‌ها را بررسی کنند. هدف اصلی این پژوهش تفکیک اثرات اینرسی سازه‌ای از برهم‌کنش‌های واقعی سیال ساختار بود تا نقش حرکات نوسانی در تولید نیرو با دقت بیشتری تحلیل شود. نتایج نشان داد که الگوی نوسان فویل، روابط فاز حرکتی و نحوه توزیع تغییرشکل در طول فویل از عوامل کلیدی در تولید تراست، کنترل ساختار جریان و بهبود بازده هیدرودینامیکی سامانه محسوب می‌شوند.

ژا [۹] و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۵] مطالعه‌ای هیدرودینامیکی روی یک ماهی رباتیک خودران انجام دادند که در آن از راهبرد کنترل بازخورد نیرو برای تنظیم عملکرد شنا استفاده شد. تمرکز این

---

۱ Bio-inspired design
۲ Epipelagic
۳ Ambush strike
۴ Low and Chong
۵ Sagong
۶ Taxidermy
۷ Magertens
۸ Wen and Lauder
۹ Zhou

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.109]

پژوهش بر ادغام دینامیک‌های پیشرانه با بازخورد نیروی بلادرنگ به منظور دستیابی به حرکت خودران پایدار و کارآمد بود. نتایج نشان داد که بهره‌گیری از کنترل بازخورد نیرو امکان تنظیم مؤثر سینماتیک دم را فراهم می‌کند و در نتیجه، موجب بهبود تعادل نیروی پیشران، افزایش پایداری شنا و ارتقای بهره‌وری سامانه پیشران می‌شود.

آبکاسیس[10] و همکاران در سال ۲۰۲۳ [۶] با استفاده از داده‌های تله‌متری، الگوهای حرکتی افقی و عمودی شمشیرماهی‌های پهن‌باله را بررسی کرده و ارتباط این حرکات را با شرایط محیطی مورد تحلیل قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که رفتار حرکتی این گونه به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر عواملی نظیر دما، عمق، چرخه‌های شبانه‌روزی و پراکنش طعمه قرار دارد.

بینبریج[11] در سال ۱۹۶۳ [۷] یکی از نخستین مطالعات کمی درباره حرکات بدن ماهی‌ها در حین شنا را انجام داد و به‌صورت نظام‌مند رابطه میان سرعت شنا و پارامترهای سینماتیکی را مورد بررسی قرار داد. نتایج این پژوهش نشان داد افزایش سرعت شنا عمدتاً از طریق افزایش فرکانس ضربه دم حاصل می‌شود و نه افزایش دامنه آن، در حالی که ویژگی‌های موجی حرکت بدن به‌طور دقیق و هماهنگ تنظیم می‌شوند.

هارت[12] و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۸] به بررسی ساختارهای سطحی پوست ماهی مارلین در مقیاس‌های میکرو و نانو پرداختند و نقش این ویژگی‌ها را در بهبود عملکرد هیدرودینامیکی مورد تحلیل قرار دادند. در این پژوهش، ساختارهای ریزمقیاس موجود بر سطح پوست این ماهی با استفاده از روش‌های تصویربرداری و تحلیل سطحی مطالعه شد تا نحوه تأثیر آن‌ها بر تعامل جریان آب با سطح بدن مشخص گردد. نتایج نشان داد که وجود الگوهای میکرو و نانوساختار روی پوست می‌تواند موجب کاهش اصطکاک سطحی و در نتیجه کاهش نیروی پسا در هنگام حرکت در آب شود.

جونز[13] و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۹] مطالعه‌ای در زمینه طراحی بیومیمتیک بافت‌های سطحی با هدف کاهش نیروی پسا انجام دادند. در این پژوهش، تمرکز اصلی بر شناسایی و الگوبرداری از ویژگی‌های زیستی مرتبط با ساختار شیارهای سطح پوست کوسه بود؛ ساختاری که به‌طور طبیعی موجب هدایت جریان و کاهش آشفتگی در لایه مرزی سیال می‌شود. آن‌ها با بررسی هندسه، زاویه و الگوی توزیع شیارهای پوست کوسه دریافتند که این ویژگی‌ها سبب کاهش اصطکاک سطحی و افزایش پایداری جریان پیرامون بدن در هنگام حرکت می‌شوند.

ژان[14] و همکاران در سال ۲۰۲۲ [۱۰] به بررسی الگوی شنای شکارچیان بزرگ دریایی مانند سفره‌ماهی، نهنگ و شمشیرماهی در نزدیکی سطح آب پرداختند و اثر موقعیت شنا بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی آن‌ها را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که برای گونه‌هایی مانند نهنگ و سفره‌ماهی، ضریب پسا هنگام حرکت در نزدیکی سطح آب به‌طور قابل توجهی بیشتر از حالتی است که در عمق پایین‌تر شنا می‌کنند، و این افزایش عمدتاً ناشی از پدیده‌ی پسای موجی است که به واسطه‌ی برهم‌کنش با سطح آزاد آب ایجاد می‌شود.

کاتو[15] و همکارش در سال ۲۰۰۵ [۱۱] پژوهشی را با هدف بررسی تأثیر وضعیت بدن ماهی بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی آن انجام دادند. در این مطالعه، تأثیر تغییر زاویه و موقعیت بدن ماهی نسبت به جریان آب بر نحوه‌ی توزیع فشار، الگوی جریان پیرامونی و نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدن مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد حتی تغییرات جزئی در زاویه‌ی بدن می‌تواند موجب دگرگونی قابل توجهی در رفتار جریان، میزان پسا و پیشران تولیدی شود.

در مطالعه حاضر، طراحی و عملکرد هیدرودینامیکی یک وسیله زیرسطحی با الهام از فرم کلی بدن نیزه‌ماهی نیزه‌بلند مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در ابتدا، با انجام شبیه‌سازی‌های عددی به بررسی تاثیر فرم کلی بدن نیزه‌ماهی نیزه‌بلند بر فیزیک جریان و مشخصات هیدوردینامیکی آن پرداخته شده و در ادامه، مشخصات هیدرودینامیکی هندسه زیرسطحی زیست‌الهام طراحی‌شده با نتایج یک زیرسطحی موجود دارای سطح ترشده تقریبا یکسان مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.

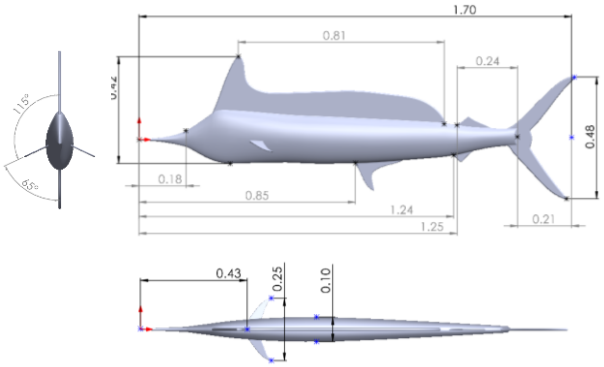
۲ - هندسه، دامنه محاسباتی و شبکه عددی

در فرآیند مدل‌سازی هندسی، شکل نیزه‌ماهی نیزه‌بلند برپایه داده‌های واقعی مورفولوژیکی[16] و تصاویر موجود از آن بازسازی شده و مطابق با شکل ۱، تمرکز اصلی بر فرم کلی بدن، ساختار باله‌ها و شکل دم قرار گرفته است؛ اجزایی که به‌طور مستقیم در ایجاد ویژگی‌های هیدرودینامیکی منحصربه‌فرد این آبزی نقش دارند. در شکل ۲، هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند مدل‌سازی‌شده و هندسه حقیقی

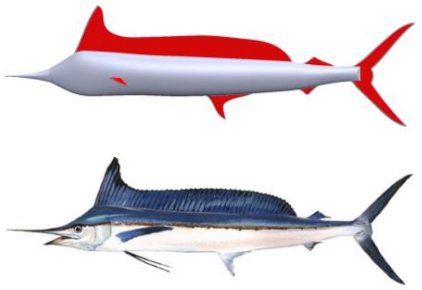
[10] Abecassis
[11] Bainbridge
[12] Hart
[13] Jones
[14] Zhan
[15] Kato
[16] Morphological

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.109]

آن با هم مقایسه شده و فرم کلی بدن هندسه نیزماهی نیزه‌بلند با حذف سطوح قرمز رنگ نشان داده‌شده در شکل ۲ (الف) برای اعتبارسنجی نتایج عددی با نتایج مرجع مد نظر قرار خواهد گرفت. لازم به‌ذکر است فرم کلی بدن این ماهی الگوی مورد استفاده برای طراحی هندسه زیرسطحی زیست‌الهام است.

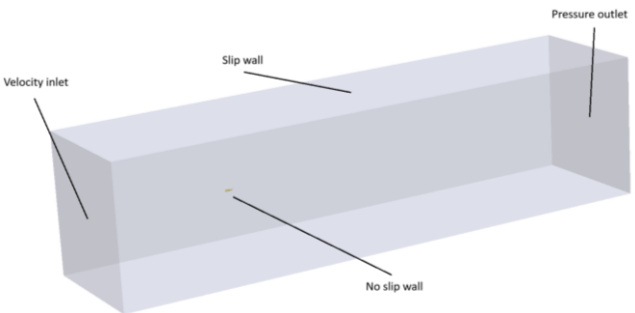


شکل ۱- ابعاد هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند مدل‌سازی‌شده

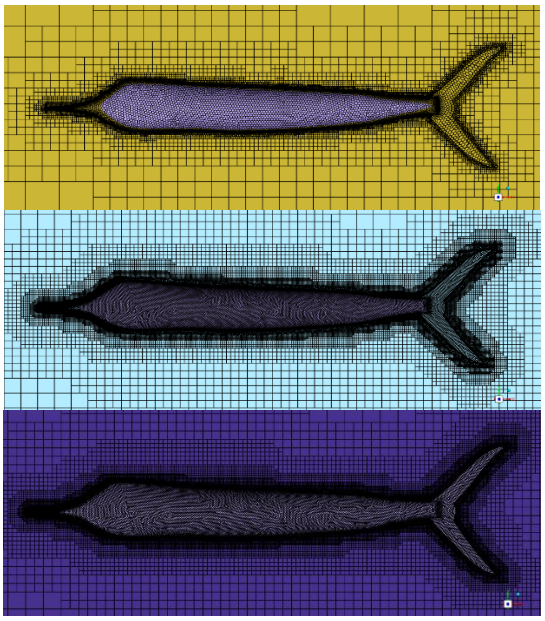


شکل ۲- هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند مدل‌سازی‌شده (الف) و هندسه حقیقی نیزه‌ماهی نیزه‌بلند (ب)

دامنه محاسباتی به صورت مستطیل‌شکل و ابعاد آن ۱۵×۱۵×۴۵ برابر طول بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند درنظر گرفته شده است. در شکل ۳، دامنه محاسباتی و شرایط مرزی مورد استفاده برای شبیه‌سازی عددی جریان را نشان می‌دهد.



شکل ۳- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی برای شبیه‌سازی عددی جریان اطراف فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند



شکل ۴- شبکه تولیدشده برای فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند، (الف) شبکه درشت، (ب) شبکه متوسط، (پ) شبکه ریز

برای تولید شبکه محاسباتی از المان‌های ترکیبی لانه زنبوری و هگزا به جهت نشست مناسب همراه با تعداد المان کم شبکه برای هندسه‌های نسبتا پیچیده در نرم‌افزار فلوینت مشینگ[۱۷] استفاده شده است. مطابق با شکل ۴، برای بررسی استقلال حل از شبکه، سه اندازه شبکه در نظر گرفته شده است: شبکه ریز (۴.۲ میلیون)، شبکه متوسط (۲.۳ میلیون) و شبکه درشت (۱.۳ میلیون). با توجه به جدول ۱، نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد برای شبکه متوسط و ریز، تغییرات در ضریب پسا قابل توجه نیست و بنابراین، شبکه متوسط به‌عنوان شبکه مناسب برای ادامه شبیه‌سازی‌های عددی انتخاب شده است.

جدول ۱- تاثیر ابعاد شبکه روی ضریب پسای فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند در عدد رینولدز $۴/۵ \times ۱۰^{۶}$

تعداد المان شبکه	ضریب پسا
۱/۳ میلیون	۰/۰۰۶۰۰
۲/۳ میلیون	۰/۰۰۶۸۶
۴/۲ میلیون	۰/۰۰۶۸۶

در جدول ۲، کیفیت شبکه تولیدشده اطراف فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند برپایه معیارهای کیفیت شبکه مورد بررسی قرار گرفته که نشان می‌دهد شبکه مورد نظر از کیفیت مناسب برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی برخوردار است.

[۱۷] Fluent meshing

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.109]

جدول ۲- بررسی کیفیت شبکه تولیدشده

معیار	درصد	بازه
انحراف سلول	٪۸۶/۱	$۰/۹ \leq x$
متعامد بودن سلول	٪۸۵/۱	$x \leq ۰/۱$
نسبت طول به عرض سلول	٪۷۹/۱	$x \leq ۱۰$

در ادامه، تاثیر ابعاد دامنه محاسباتی نیز روی نتایج حل بررسی شده است. در جدول ۳، نتایج ضریب پسا برای ابعاد مختلف دامنه محاسباتی به‌ازاء تعداد المان شبکه متوسط ارائه شده و دامنه متوسط برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی مناسب و انتخاب شده است. فرم دامنه محاسباتی و نوع شبکه عددی تولیدشده اطراف فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند به‌طور مشابه برای سایر هندسه‌های مورد بررسی در بخش‌های بعدی استفاده شده است.

جدول ۳- تاثیر ابعاد دامنه محاسباتی روی ضریب پسای فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند در عدد رینولدز $۴/۵ \times ۱۰^{۶}$

ابعاد دامنه محاسباتی	ضریب پسا
۳۰×۱۰×۱۰	۰/۰۰۵۹۱
۴۵×۱۵×۱۵	۰/۰۰۶۸۶
۹۰×۳۰×۳۰	۰/۰۰۶۸۹

۳ – معادلات حاکم

با توجه به رژیم جریان، شبیه‌سازی عددی جریان آشفته تراکم‌ناپذیر اطراف هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند انجام شده است. برای این منظور، فرم تراکم‌ناپذیر معادلات ناویر-استوکس متوسط‌گیری‌شده رینولدز، شامل معادلات پیوستگی و مومنتم، مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\nabla \cdot V = 0 \qquad (۱)$$

$$\rho\left(\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V\right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[(\mu + \mu_t)(\nabla V + (\nabla V)^T)\right] \qquad (۲)$$

که ρ چگالی سیال، V بردار سرعت، p فشار، μ لزجت دینامیکی و μ_t لزجت آشفتگی گردابه‌ای می‌باشد. در این مطالعه، از مدل آشفتگی انتقال تنش برشی $k-\omega$ SST برای مدل‌سازی جریان آشفته استفاده شده است. مدل انتقال تنش برشی ترکیبی از دو مدل معروف $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ است که نقاط قوت هر دو مدل را دارا می‌باشد و مدل‌سازی مناسبی از جریان‌های آشفته ارائه می‌دهد.

در این مدل، معادلات مربوط به انرژی جنبشی آشفتگی k و نرخ اتلاف آشفتگی ω به صورت زیر می‌باشند:

$$\rho\left(\frac{\partial k}{\partial t} + V \cdot \nabla k\right) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t)\nabla k] + P_k - \beta^* \rho \omega k \qquad (۳)$$

$$\rho\left(\frac{\partial \omega}{\partial t} + V \cdot \nabla \omega\right) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t)\nabla \omega] + (\alpha\omega/k)P_k - \beta\rho\omega^2 + 2(1-F_1)\rho\sigma_{\omega 2}(1/\omega)(\nabla k \cdot \nabla \omega) \qquad (۴)$$

که P_k عبارت تولید انرژی جنبشی آشفتگی است و پارامتر F_1 انتقال بین مدل $k-\omega$ در نزدیکی دیوار و مدل $k-\varepsilon$ در ناحیه جریان خارجی را تضمین می‌کند. لزجت آشفتگی گردابه‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_t = a_1 \rho k / \max(a_1 \omega, SF_2) \qquad (۵)$$

که S مقدار تانسور چرخش است. جزییات سایر پارامترها و مقادیر ضرایب در روابط فوق در مرجع [۱۲] آمده است.

معادلات (۱) و (۲) بیان‌گر معادلات پیوستگی و مومنتوم جریان سیال بوده و برای محاسبه میدان سرعت و فشار در جریان آشفته به کار می‌روند. معادلات (۳) و (۴) نیز در مدل‌سازی آشفتگی و برای محاسبه انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف آشفتگی جریان استفاده می‌شوند. با محاسبه این مشخصات و با استفاده از رابطه (۵)، لزجت آشفتگی گردابه‌ای موردنیاز در رابطه (۲) تعیین می‌شود.

۴ - روش عددی و شرایط مرزی

برای شبیه‌سازی عددی جریان سیال، از نرم‌افزار تجاری فلوئنت[۱۸] استفاده شده است. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود گسسته شده و از یک الگوریتم کوپل برای حل هم‌زمان معادلات پیوستگی و مومنتم استفاده شده است. شرایط مرزی برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی نیز مطابق با شکل ۳ است.

۵ - نتایج عددی

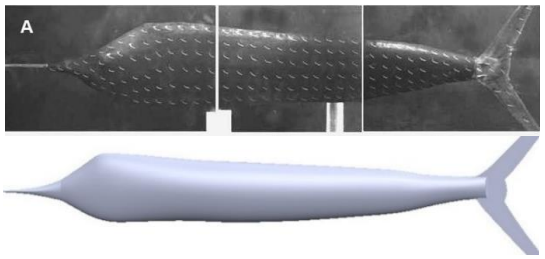
برای اطمینان از صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی، ابتدا حل عددی جریان روی فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند (که ساختار بدنه اصلی آن شباهت زیادی با نسخه مورد مطالعه در مرجع

[۱۸] Fluent

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.109]

[۲] دارد) انجام شده و نتایج عددی حاصل با نتایج تجربی مرجع [۲] مقایسه و ارزیابی شده است. مشابه با مرجع [۲]، هندسه شامل پوزه همراه با نیزه، دم پشتی و بدنه اصلی در نظر گرفته شده و سایر اجزای جانبی نظیر بالک‌ها مطابق با شکل ۵ حذف شده‌اند تا تطابق مناسب با نمونه تجربی مرجع [۲] فراهم شود.

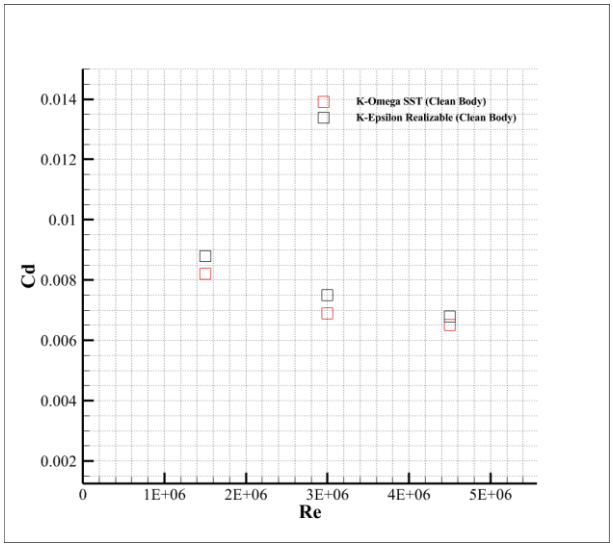


شکل ۵- هندسه تاکسیدرمی نیزه‌ماهی مورد بررسی مرجع [۲] (الف) و فرم کلی بدن هندسه تولیدشده نیزه‌ماهی نیزه‌بلند (ب)

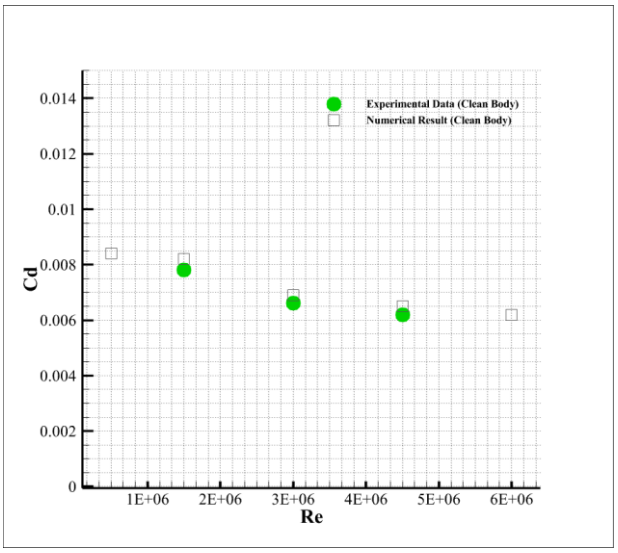
نتایج تجربی مرجع [۲] مربوط به آزمایش‌های انجام‌شده نمونه‌ای تاکسیدرمی‌شده از نیزه‌ماهی نیزه‌بلند بوده که در سه عدد رینولدز $۱/۵ \times ۱۰^{۶}$، ۳×۱۰^{۶} و $۴/۵ \times ۱۰^{۶}$ مورد بررسی قرار گرفته است. عدد رینولدز با توجه به رابطه $\mathrm{Re} = \rho UL/\mu$ تعریف می‌شود که U معرف سرعت جریان آزاد و L معرف بیشترین طول بدنه (فاصله میان نوک نیزه تا نوک دم پشتی) است. لازم به ذکر است در مرجع [۲] ضریب پسای نیزه‌ماهی نیزه‌بلند براساس سطح ترشده محاسبه شده و بررسی عددی حاضر نیز بر این اساس است. مقدار عدد رینولدز $۴/۵ \times ۱۰^{۶}$ معادل با سرعت بیشینه شنای ۳۱ متربرثانیه برای هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند است.

در شکل ۶، تاثیر نوع مدل آشفتگی روی ضریب پسای فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند در سه عدد رینولدز ذکرشده بررسی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ضریب پسای حاصل از انجام شبیه‌سازی عددی با دو مدل آشفتگی $k-\omega$ SST و $k-\varepsilon$ Realizable، حدود ۹ درصد با هم اختلاف دارند. با توجه به دقت بیشتر نتایج مدل آشفتگی $k-\omega$ SST، از این مدل برای ادامه شبیه‌سازی‌ها عددی استفاده می‌شود.

در شکل ۷، نتایج عددی حاضر برای ضریب پسای فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند با نتایج تجربی مرجع [۲] مقایسه شده و همخوانی خوبی مابین نتایج مشاهده می‌شود. لازم به‌ذکر است نتایج عددی در بازه بزرگتری از عدد رینولدز ارایه شده تا تغییرات ضریب پسا در محدوده بزرگتری از عدد رینولدز قابل بررسی باشد. بیشترین اختلاف نتایج عددی و تجربی در حدود ۱۰ درصد است و این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت فرم هندسی و شیارهای روی پوست نسخه هندسه تاکسیدرمی نیزه‌ماهی مورد بررسی مرجع [۲] باشد.

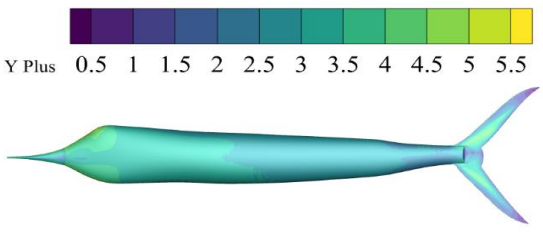


شکل ۶- مقایسه ضریب پسای فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند حاصل از اعمال دو نوع مدل آشفتگی در اعداد رینولدز مختلف



شکل ۷- مقایسه ضریب پسای فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه-بلند با نتایج تجربی مرجع [۲] در اعداد رینولدز مختلف

مطابق با شکل ۸، بیشترین مقدار پارامتر y^{+} مجاور سطح بدنه حدود ۵/۵ است که نشان‌دهنده دقت نتایج حاصل از تحلیل عددی جریان آشفته نزدیک بدنه است.



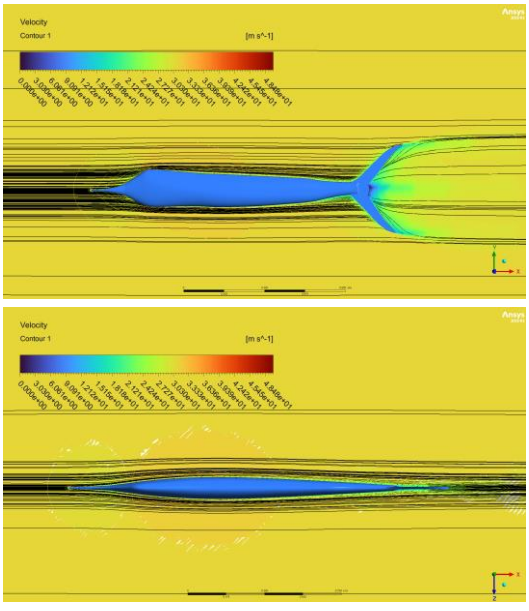
شکل ۸- توزیع پارامتر y^{+} اطراف فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند در عدد رینولدز $۴/۵ \times ۱۰^{۶}$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.109]

در شکل ۹، میدان جریان با خطوط همتراز اندازه سرعت اطراف فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند در عدد رینولدز $۴/۵ \times ۱۰^{۶}$ نشان داده شده‌است. در ناحیه جلویی نزدیک نوک نیزه و پوزه، به دلیل تأثیر مانع بدنه بر جریان ورودی، سرعت به شدت کاهش یافته و نواحی آبی‌رنگ با کمترین مقدار سرعت مشاهده می‌شود. این رفتار ناشی از اثر ممانعت بدنه و تشکیل لایه مرزی در ابتدای حرکت جریان است. در امتداد بدنه، به‌ویژه در ناحیه پشتی، با توجه به شکل دوکی شکل بدنه، جریان بتدریج شتاب می‌گیرد. در ناحیه دم، افزایش محسوس سرعت در نزدیکی لبه‌های خروجی به‌وضوح قابل مشاهده است. این امر به دلیل انقباض مسیر جریان و تمرکز خطوط جریان در اطراف خروجی دم پدید آمده و منجر به ایجاد نواحی با سرعت بالا در دو سوی ناحیه دمی شده است.

مطابق با بررسی مرجع [۲]، وجود نیزه بلند عمدتا نقشی مهمی در شکار و افزایش یا کاهش طول آن، تغییراتی حدود ۲ درصد در ضریب پسا را داراست. در این ساختار، فک بالایی به‌مراتب از فک پایینی بلندتر است. شواهد نشان می‌دهد که این اندام نه‌تنها در شکار یا دفاع مؤثر است، بلکه نقش هیدرودینامیکی نیز ایفا می‌کند. حضور این پوزه‌ی دراز، موجب به تأخیر افتادن جدایش جریان در امتداد بدنه شده و از این طریق، پسا را کاهش می‌دهد. همچنین، ضخامت لایه مرزی روی بخش میانی بدنه را افزایش می‌دهد، بنابراین، در طراحی فرم هندسی زیرسطحی زیست‌الهام باید از نیزه کوتاه‌تر، افزایش نرم سطح بالایی و کوتاه فک پایینی استفاده شود. علاوه براین، مطابق با بررسی مرجع [۳]، پوزه بلند و باریک آن، باعث افزایش عملکرد هیدرودینامیکی شده و به بهبود مانور و پایداری ماهی در شرایط جریان‌های پیچیده نیز کمک می‌کند.

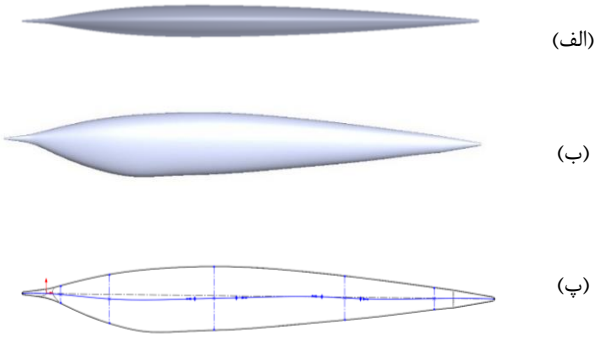


شکل ۹- خطوط همتراز اندازه سرعت اطراف فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند در عدد رینولدز $۴/۵ \times ۱۰^{۶}$

با استفاده از اطلاعات و نتایج بررسی‌های فوق، مطابق با جدول ۴ یک فرم کلی از ابعاد هندسی نیزه‌ماهی نیزه‌بلند بدون سطوح کنترلی درنظر گرفته شده و با انجام تغییرات و ایده‌آل‌سازی‌هایی به عنوان فرم کلی هندسه زیرسطحی اکتشافی زیست‌الهام طراحی‌شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۴- مقایسه پارامترهای هندسی و ابعادی فرم کلی هندسه نیزه-ماهی نیزه‌بلند با فرم کلی هندسه زیرسطحی زیست‌الهام

ویژگی هندسی	زیست‌الهام	نیزه‌ماهی نیزه‌بلند	اختلاف (٪)
طول کل (m)	۱/۷۳۰	۱/۷۲۸	۰/۱۲
بیشینه عرض (m)	۰/۱۲۰	۰/۰۹۸	۲۲/۴۵
بیشینه ضخامت (m)	۰/۲۱۷	۰/۲۰۵	۵/۸۵
نسبت باریکی	۸/۱۹۹	۸/۴۲۹	۲/۷۳
سطح ترشده (m^2)	۰/۶۹۹	۰/۵۹۸	۱۶/۸۹

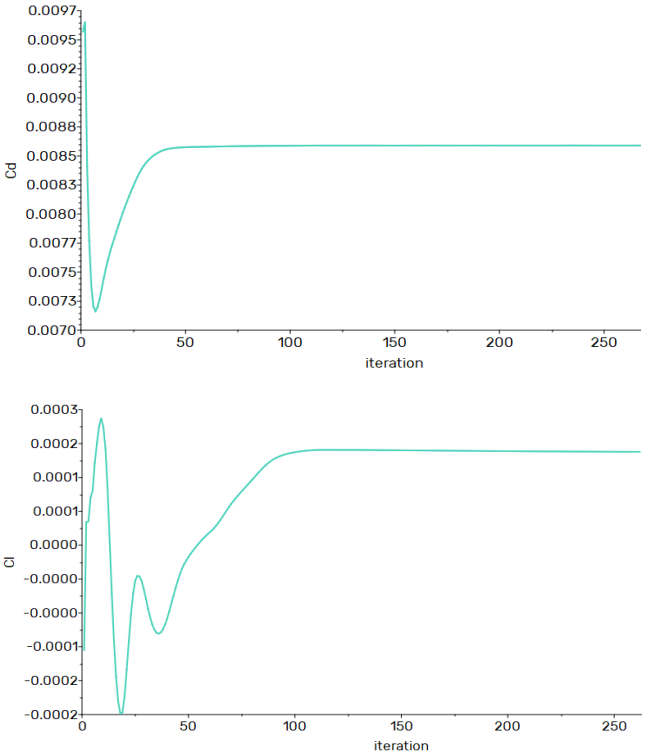


شکل ۱۰- فرم کلی بدنه هندسه زیرسطحی برپایه طراحی زیست‌الهام از فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند (الف) نمای بالا، (ب) نمای جانبی، (پ) نمای جانبی با نمایش خط وتر

هدف از مطالعه حاضر، بررسی رفتار و محاسبه مشخصات هیدرودینامیکی زیرسطحی اکتشافی الهام‌زیست طراحی‌شده در فاز حرکت مستقیم است و موضوعاتی نظیر تولید نیروی پیشرانش، پایداری و کنترل این هندسه در این‌جا مورد بررسی و تحلیل قرار نمی‌گیرد. با توجه به شکل ۱۱، ضریب پسای فرم کلی هندسه زیرسطحی زیست‌الهام بدون سطوح کنترلی در رینولدز $۴/۵ \times ۱۰^{۶}$ در حدود ۰/۰۰۸۷ و ضریب برآ نیز حدود ۰/۰۰۰۲ است که با توجه به فرم خط وتر این هندسه ضریب برآ نزدیک صفر است. ضرایب پسا و برآ برای فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند در این عدد رینولدز نیز به‌ترتیب حدود ۰/۰۰۶۸۶ و ۰/۰۰۰۱۸ است که با نتایج فرم کلی هندسه زیرسطحی زیست‌الهام قابل مقایسه است. علت افزایش پسا در فرم کلی هندسه زیرسطحی زیست‌الهام را می‌توان ناشی از افزایش سطح ترشده و کاهش نسبت باریکی هندسه آن نسبت به فرم کلی هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند، مطابق با جدول ۴، دانست.

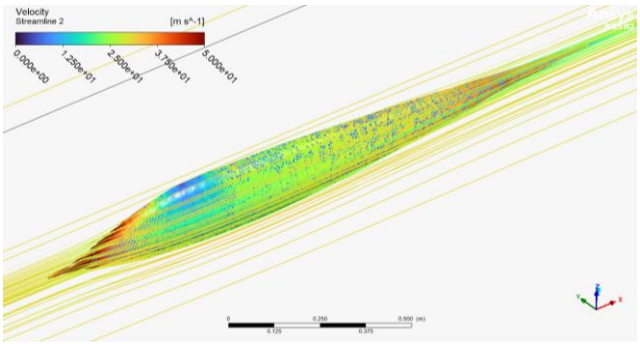
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.109]



شکل ۱۱- تغییرات ضرایب برآ و پسا برحسب تکرار حل برای فرم کلی هندسه زیرسطحی زیست‌الهام در عدد رینولدز $۴/۵ \times ۱۰^{۶}$

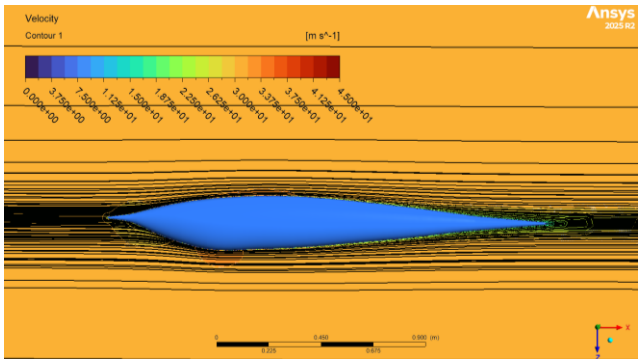
حال، فیزیک جریان سیال اطراف فرم کلی هندسه زیرسطحی زیست‌الهام بررسی می‌شود. با توجه به خطوط جریان در شکل ۱۲، جدایش جریان اطراف هندسه زیرسطحی زیست‌الهام دیده نمی‌شود. در حقیقت، شکل بدنه کشیده و نسبتا باریک این هندسه باعث شده جریان به‌طور بهینه‌ای به سطح جسم چسبیده و از ایجاد گردابه‌ها جلوگیری کند.



شکل ۱۲- خطوط جریان و خطوط همتراز اندازه سرعت اطراف فرم کلی هندسه زیرسطحی زیست‌الهام در عدد رینولدز $۴/۵ \times ۱۰^{۶}$

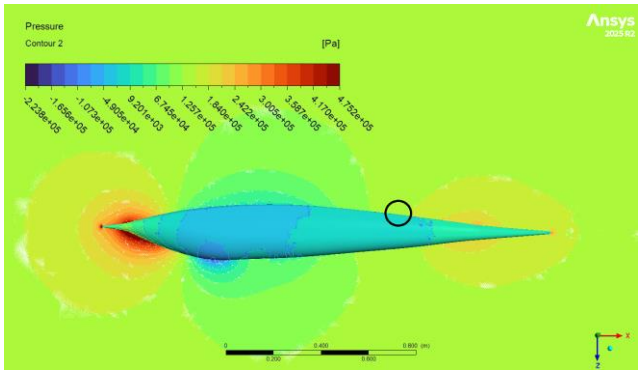
در ادامه، محل نصب، تعداد سطوح کنترلی و انتخاب هیدروفویل مد نظر قرار می‌گیرد. در هندسه‌های زیرسطحی، انتخاب سطوح کنترلی باید با رفتار لایه مرزی هماهنگ باشد، زیرا در نزدیکی سطح بدنه بیشترین گرادیان سرعت، فشار و تنش برشی وجود داشته و همین ناحیه در اتلاف مومنتوم و ایجاد نیروی پسا نقش تعیین‌کننده دارد.

با توجه شکل ۱۳، با حرکت جریان در امتداد بدنه، ضخامت لایه مرزی (δ) بتدریج افزایش پیدا می‌کند. این افزایش به این معناست که مقدار بیشتری از جریان دچار کاهش سرعت شده و در نتیجه، مومنتوم جریان نسبت به جریان آزاد کاهش می‌یابد که تبدیل به نیروی پسا می‌شود. بنابراین، اگر سطوح کنترلی خیلی کوچک باشد ممکن است هنوز کل اثر کاهش مومنتوم را ثبت نکند. به همین دلیل، معمولاً سطوح کنترلی در فاصله‌ای معادل با چند برابر ضخامت لایه مرزی قرار می‌گیرند تا کل ناحیه‌ای که مومنتوم در آن کاهش پیدا کرده، درون فضای شامل سطوح کنترلی قرار گیرد.



شکل ۱۳- نمای جانبی از خطوط همتراز اندازه سرعت اطراف فرم کلی زیرسطحی زیست‌الهام در رینولدز $۴/۵ \times ۱۰^{۶}$

مطابق با شکل ۱۴، موقعیت شروع تغییرات ضریب فشار و افزایش زیاد ضخامت لایه مرزی در فاصله ۰/۴۷متری از لبه فرار این هندسه است که به عنوان محل قرارگیری سطوح کنترلی لحاظ شده است.



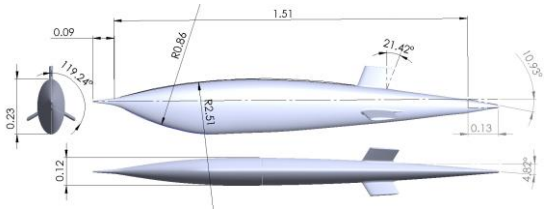
شکل ۱۴- خطوط همتراز ضریب فشار اطراف فرم کلی هندسه زیرسطحی زیست‌الهام در عدد رینولدز $۴/۵ \times ۱۰^{۶}$

در شکل ۱۵، نماهای مختلف هندسه زیرسطحی زیست‌الهام طراحی‌شده نشان داده شده است و محل نصب سطوح کنترلی برای این هندسه برمبنای توضیح ارائه‌شده در شکل ۱۳ انتخاب شده است. در بررسی حاضر، مقایسه و ارزیابی نتایج عددی و فیزیک جریان اطراف هندسه زیرسطحی زیست‌الهام با هندسه زیرسطحی

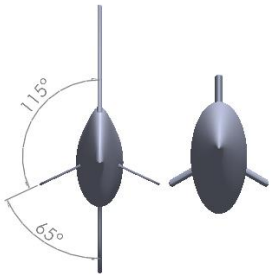
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.109]

مشابه دارای اطلاعات تجربی [۱۳]، مد نظر است. با توجه به اینکه در مرجع [۱۳] از هیدروفویل متقارن NACA0015 برای سطوح کنترلی استفاده شده، در بررسی حاضر نیز سطوح کنترلی برمبنای این هیدروفویل انتخاب و طراحی شده تا مقایسه واقع‌بینانه‌ای بین نتایج عددی و تجربی صورت گیرد.



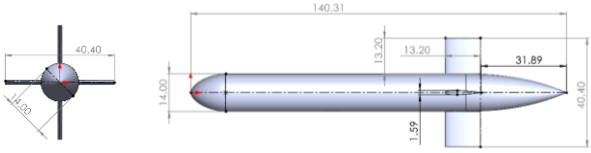
شکل ۱۵- ابعاد هندسه زیرسطحی زیست‌الهام طراحی‌شده



شکل ۱۶- هندسه زیرسطحی زیست‌الهام طراحی‌شده (راست) و هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند (چپ)

مطابق با شکل ۱۶، انتخاب تعداد و زاویه نصب سطوح کنترلی هندسه زیرسطحی زیست‌الهام برمبنای تعداد و زاویه نصب سطوح کنترلی هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند انجام شده است، با این وجود، نوع هیدروفویل و ابعاد هندسی سطوح کنترلی این دو هندسه یکسان نیست.

در شکل ۱۷، هندسه زیرسطحی مورد مطالعه مرجع [۱۳] نمایش داده شده است. لازم به‌ذکر است مشخصات هیدرودینامیکی برای این هندسه در مرجع [۱۳] برای سرعت‌های نسبتا پایین ارایه شده و شبیه‌سازی عددی جریان روی این هندسه در بررسی حاضر هم در سرعت‌های پایین و هم سرعت‌های بالا انجام خواهد شد تا عملکرد هیدرودینامیکی هندسه زیرسطحی زیست‌الهام با هندسه مرجع [۱۳] در بازه بزرگی از مقادیر سرعت مورد ارزیابی قرار گیرد.



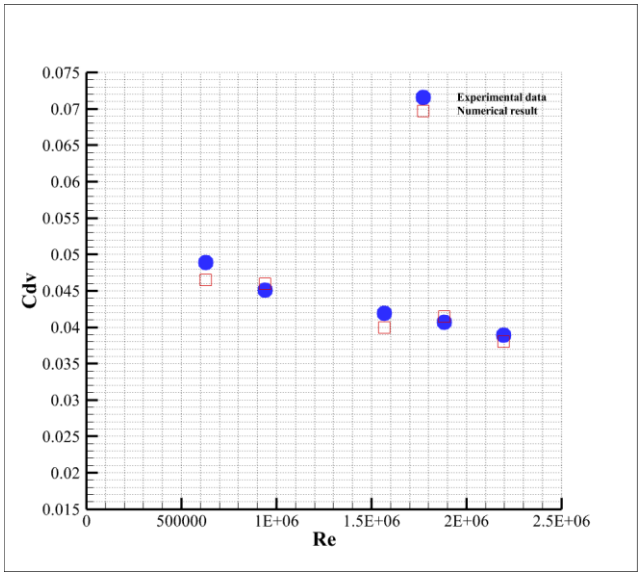
شکل ۱۷- ابعاد هندسه زیرسطحی مورد بررسی در مرجع [۱۳]

ابتدا، جهت اطمینان از صحت تحلیل عددی صورت‌گرفته در بررسی حاضر برای هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳]، شبیه‌سازی عددی جریان روی این هندسه در سرعت‌های نسبتا پایین انجام شده و مشخصات هیدرودینامیکی حاصل از تحلیل عددی حاضر با نتایج تجربی [۱۳] مقایسه خواهد شد. لازم به‌ذکر است خواص سیال و مشخصات جریان برای هندسه مورد بررسی در مرجع [۱۳] مطابق با جدول ۵ برای عمق ۵۰۰ متری زیر سطح آب است.

جدول ۵- خواص سیال و مشخصات جریان جهت شبیه‌سازی عددی هندسه مورد بررسی مرجع [۱۳]

U (m/s)	$Re \times 10^5$	Temperature (°C)	ρ (kg/m^3)	μ (mPa.s)
۰/۴	۶/۲۷	۲۵	۱۰۲۳	۰/۹۶
۰/۶	۹/۴۱	۲۵	۱۰۲۳	۰/۹۶
۱/۰	۱۵/۶۸	۲۵	۱۰۲۳	۰/۹۶
۱/۲	۱۸/۸۲	۲۵	۱۰۲۳	۰/۹۶
۱/۴	۲۱/۹۶	۲۵	۱۰۲۳	۰/۹۶

در شکل ۱۸، ضریب پسای حاصل از تحلیل عددی حاضر برای هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] با نتایج تجربی این مرجع در اعداد رینولدز نسبتا پایین مقایسه شده که همخوانی خوبی دیده می‌شود. لازم به‌ذکر است محاسبه ضریب پسای حجمی در این شکل با رابطه $C_{dv} = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 V^{\frac{2}{3}}}$ انجام شده است. بررسی نشان می‌دهد اختلاف نتایج عددی و تجربی ضریب پسای حجمی برای هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] کمتر از ۳ درصد است. در ادامه، تحلیل عددی برای هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] در محدوده اعداد رینولدز بالاتر نیز انجام خواهد شد.



شکل ۱۸- مقایسه ضریب پسای حاصل از تحلیل عددی حاضر با نتایج تجربی برای هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] در اعداد رینولدز مختلف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

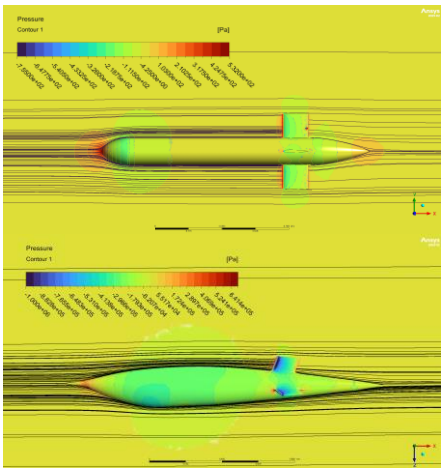
[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.109]

در جدول ۶، پارامترهای هندسی و ابعادی هندسه زیرسطحی زیست‌الهام و هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] با هم مقایسه شده است. پارامتر هندسی مهم در جدول، مساحت سطح ترشده است که مقدار آن برای این دو هندسه کمتر از ۱ درصد اختلاف دارند و سایر ابعاد و فرم کلی این دو هندسه دارای تفاوت‌های هستند.

جدول ۶- مقایسه پارامترهای هندسی و ابعادی برای هندسه زیرسطحی زیست‌الهام و هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳]

ویژگی هندسی	زیست‌الهام	مرجع [۱۳]
طول کل بدنه (m)	۱/۷۳۰	۱/۴۰۰
بیشینه قطر بدنه (m)	۰/۲۳۰	۰/۱۴۰
سطح ترشده (m^2)	۰/۶۹۹	۰/۷۰۵

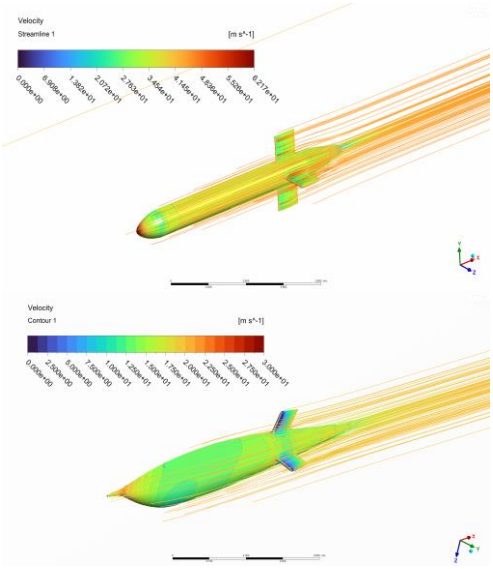
در شکل‌های ۱۹ و ۲۰، خطوط همتراز اندازه سرعت و فشار اطراف هندسه زیرسطحی زیست‌الهام و هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] ارایه شده است. مشاهده می‌شود تغییرات سرعت و فشار پیرامون هندسه زیرسطحی زیست‌الهام نسبتا به‌آرامی انجام می‌شود. علت این فرم بهینه در هندسه زیرسطحی زیست‌الهام را می‌توان ناشی از ارتباط میان فرم کلی بدن، نحوه حرکت ماهی‌ها دانست که مرتبط با فیزیولوژی ماهی‌ها می‌باشد. در حقیقت، ماهی‌های دارای فرم فشرده و کشیده مانند نیزه‌ماهی نیزه‌بلند، برای حرکت مستقیم، سریع و کم‌انحراف مناسب هستند [۱۴]. مطابق با مرجع بیومکانیک ماهی [۱۵] که به بررسی سازوکارهای زیست مکانیکی در بدن ماهی‌ها پرداخته است، محل قرارگیری ضخامت بیشینه بدن و شکل پوزهی ماهی‌ها تأثیر مستقیم در جدایش جریان، نیروی برآ و پسا داشته و محل حداکثر ضخامت نیزه‌ماهی نیزه‌بلند یکی از بهینه‌ترین ساختارها را به دنبال دارد.



(الف)

(ب)

شکل ۱۹- مقایسه خطوط جریان و خطوط همتراز فشار اطراف هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] (الف) و هندسه زیرسطحی زیست‌الهام (ب) در رینولدز $۴/۵ \times ۱۰^{۷}$

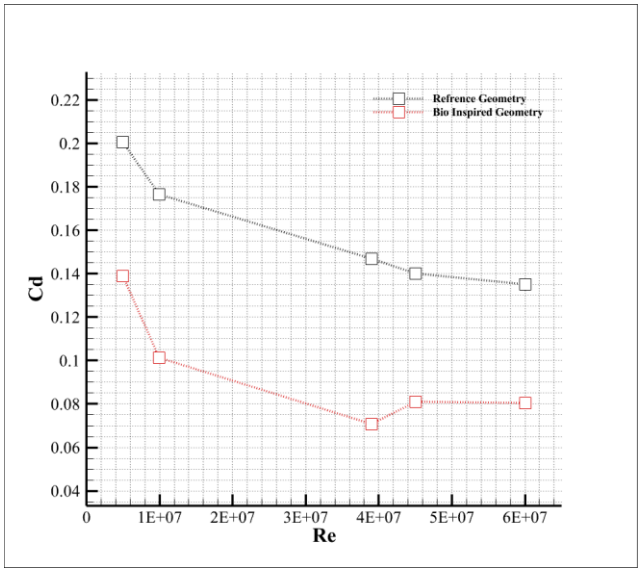


(الف)

(ب)

شکل ۲۰- مقایسه خطوط جریان و خطوط همتراز اندازه سرعت اطراف هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] (الف) و هندسه زیرسطحی زیست‌الهام (ب) در رینولدز $۴/۵ \times ۱۰^{۷}$

در شکل ۲۱، نتایج شبیه‌سازی عددی حاضر برای ضریب پسای هندسه زیرسطحی زیست‌الهام در اعداد رینولدز مختلف ارایه شده و با نتایج عددی حاضر برای هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] مقایسه شده است. ضریب پسا براساس سطح‌ترشده هر هندسه محاسبه شده و عدد رینولدز نیز براساس طول واحد تعیین شده است. بررسی نشان می‌دهد هندسه زیرسطحی زیست‌الهام عملکرد هیدرودینامیکی بهتری داشته و دارای کاهش ضریب پسای میانگین ۴۳ درصدی نسبت به هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] است.



شکل ۲۱- مقایسه ضریب پسای هندسه زیرسطحی زیست‌الهام و هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] در اعداد رینولدز مختلف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.109]

در جدول ۷، ضریب پسای هندسه زیرسطحی زیست‌الهام و هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] در سرعت‌های مختلف مقایسه شده است. در این جدول، ضریب پسا به صورت تفکیک فشاری و اصطکاک پوسته‌ای سطح ارائه شده و درصد کاهش ضریب پسای کل نسبت به هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] نیز آورده شده است. بررسی نشان می‌دهد هر دو جزء ضریب پسا و ضریب پسای کل هندسه زیرسطحی زیست‌الهام نسبت به هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] در سرعت‌های مختلف کمتر است و بیشترین درصد کاهش ضریب پسای کل مربوط به سرعت ۳۱ متربرثانیه و حدود ۵۲ درصد است. مهم‌ترین عامل کاهش پسا در هندسه زیرسطحی زیست‌الهام، فرم مناسب بدنه و توزیع مناسب فشار سطح آن نسبت به هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] است.

جدول ۷- مقایسه ضریب پسای هندسه زیرسطحی زیست‌الهام و هندسه زیرسطحی مرجع [۱۳] در سرعت‌های مختلف

$\Delta C_{d,\mathrm{T}}$	$C_{dp,\mathrm{Ref}}$	$C_{df,\mathrm{Ref}}$	$C_{df,\mathrm{bio}}$	$C_{dp,\mathrm{bio}}$	$Re \times 10^6$	U (m/s)
٪۳۱	۰/۰۳۲۰	۰/۱۷۲۱	۰/۱۰۶۶	۰/۰۳۲۴	۴/۹۹	۵
٪۴۲	۰/۰۲۷۹	۰/۱۴۸۱	۰/۰۹۳۹	۰/۰۰۸۱	۹/۹۸	۱۰
٪۵۲	۰/۰۲۷۵	۰/۱۱۹۳	۰/۰۶۴۰	۰/۰۰۵۱	۳۹/۰۰	۳۱
٪۴۰	۰/۰۲۲۳	۰/۱۱۷۶	۰/۰۷۶۷	۰/۰۰۶۸	۴۵/۰۰	۴۵
٪۴۰	۰/۰۲۱۷	۰/۱۱۳۴	۰/۰۷۳۰	۰/۰۰۶۷	۶۰/۰۰	۶۰

۶ - نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در پژوهش حاضر، طراحی یک زیرسطحی اکتشافی زیست‌الهام براساس فرم کلی بدن نیزه‌ماهی نیزه‌بلند انجام شده و عملکرد هیدرودینامیکی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. ابتدا، ویژگی‌های هیدرودینامیکی و فیزیک جریان اطراف فرم کلی بدن هندسه نیزه‌ماهی نیزه‌بلند با انجام شبیه‌سازی‌های عددی بررسی شده و نتایج عددی حاصل برای این هندسه با نتایج تجربی موجود مقایسه شده که همخوانی خوبی به‌دست آمده است. در ادامه، براساس فرم کلی بدن نیزه‌ماهی و با انجام تغییرات و ایده‌آل‌سازی‌های هندسی روی آن، مدل یک زیرسطحی طراحی شده و انتخاب تعداد سطوح کنترلی و محل و زاویه نصب آن‌ها متناسب با ساختار بدن نیزه‌ماهی انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی جریان روی هندسه زیرسطحی زیست‌الهام طراحی‌شده در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد عملکرد هیدرودینامیکی این هندسه نسبت به هندسه زیرسطحی مرجع (با سطح ترشده تقریبا یکسان) بسیار بهبود یافته و ضریب پسای کل هندسه زیرسطحی زیست‌الهام بین ۳۱ تا ۵۲ درصد کمتر از هندسه زیرسطحی مرجع است. مطالعه حاضر نشان می‌دهد که طراحی زیست‌الهام وسایل زیرسطحی می‌تواند به طور مؤثری موجب بهبود عملکرد هیدرودینامیکی شده و در توسعه سامانه‌های زیرسطحی برای کاربردهای دریایی مورد استفاده قرار گیرد.

۷- منابع و مراجع

1- Low, K.H. and Chong, C.W., (2010), Parametric study of the swimming performance of a fish robot propelled by a flexible caudal fin, *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 5, p. 046002. https://doi.org/10.1088/1748-3182/5/4/046002

2- Sagong, W., Jeon, W.-P., Choi, H. and Lee, S., (2013), Hydrodynamic characteristics of high-speed fish: Comparative study on swordfish and marlin, *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 8, p. 036010. https://doi.org/10.1088/1748-3182/8/3/036010

3- Marras, S., Killen, S. S., Lindström, J., McKenzie, D. J., Steffensen, J. F., & Claireaux, G. (2014). *Fish swimming in schools save energy regardless of their spatial position*. Current Biology, 24(9), R386–R387.

4- Wen, L. and Lauder, G., (2013), Understanding undulatory locomotion in fishes using an inertia-compensated flapping foil robotic device, *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 8, p. 046013. https://doi.org/10.1088/1748-3182/8/4/046013

5- Zhou, H., Cheng, L., Wang, S., Wang, H. and Li, Q., (2012), Hydrodynamic investigation of a self-propulsive robotic fish based on a force-feedback control method, *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 7, p. 036012. https://doi.org/10.1088/1748-3182/7/3/036012

6- Abecassis, M., Dewar, H., Hawn, D. and Polovina, J., (2023), Vertical and horizontal movements of broadbill swordfish (Xiphias gladius) in relation to the environment, *Scientific Reports*, Vol. 13, p. 12019. https://doi.org/10.1038/s41598-023-37294-1

7- Bainbridge, R., (1963), Body movements in swimming fish, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 40, p. 23–56. https://doi.org/10.1242/jeb.40.1.23

8- art, J.R., Chung, K.K. and Kim, S.H., (2017), Microscale and nanoscale surface characterization of marlin (Istiophoridae) skin: Implications for drag reduction in aquatic locomotion, *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 12, p. 036005. https://doi.org/10.1088/1748-3182/12/3/036005

9- Jones, R., Bhushan, B. and Hieronymus, T.L., (2016), Bioinspired design of surface textures for drag reduction on shark skin, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 482, p. 1–17. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.07.031

10- Zhan, J.-M., Gong, Y.-J., & Li, T.-Z. (2022). Gliding locomotion of manta rays, killer whales, and swordfish near the water surface. Science Advances, 8(22), eabn6801. https://doi.org/10.1126/sciadv.abn6801

11- Kato, S., & Wang, T. (2005). The effect of body posture on the hydrodynamic characteristics of a fish. Journal of Experimental Biology, 208(16), 3259–3267. https://doi.org/10.1242/jeb.01720

12- Hoffmann KA, Chiang ST. (2000) *Computational Fluid Dynamics*. Vol 3. Wichita, KS: Engineering Education System.

13- Sousa, J. V. N., Lima, A. G. B., Batista, F. A., Souza, E. C., Cavalcante, D. C. M., Pessôa, P. M., & Carmo, J. E. F. (2019). On the study of autonomous underwater vehicles by computational fluid dynamics. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 41, 471. https://doi.org/10.4236/ojfd.2020.101005

14- Long, J. H., Koob, T. J., Irving, K., Combie, K., Engel, V., Livingston, N., Lammert, A., & Schumacher, J. (1994). Four flippers or two? Tetrapod locomotor design and the evolution of the cetacean fluke. Journal of Experimental Biology, 194(1), 319–332. https://doi.org/10.1242/jeb.194.1.319

15- Shadwick, R. E., & Lauder, G. V. (2006). *Fish Biomechanics*. Academic Press.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/marineeng.21.48.109]