طراحی شکل بدنه یک زیرسطحی خودکنترل با رویکرد مستقیم

مجید علیجانی[۱]، نوروز محمد نوری[۲]*، مرحمت زینعلی[۳]

[۱] کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ majidalijani@alumni.iust.ac.ir
[۲] استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ mnouri@iust.ac.ir
[۳] دکترا مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ zeinali@ iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۰۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۲۸

کلمات کلیدی:
وسایل زیر سطحی خود کنترل
ضریب درگ
مایرینگ
طراحی آزمایش

چکیده

طراحی هیدرودینامیکی شکل بدنه از اصلی‌ترین مراحل طراحی بدنه یک وسیله زیرسطحی می‌باشد. پارامترهای موثر در طراحی هیدرودینامیکی شکل بدنه شامل طول قسمت دماغه و دم، پروفیل آنها و نیز قسمت تخت جلوی دماغه و پشت دم می‌باشند. در مطالعه حاضر به منظور بررسی تاثیر هریک از این پارامترها بر ضریب درگ بدنه از روش طراحی آزمایشها استفاده شده است. برای این منظور ضمن معرفی دسته بدنه‌های خانواده هیدرولب، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی جریان حول بدنه هیدرولب۵۰۰ جهت طراحی آزمایشها بکار گرفته شده است. لذا در مرحله نخست یک نمونه آزمایش تجربی در تونل آب برای اعتبارسنجی پروفیل فشار بدنه هیدرولب۵۰۰ انجام شده است. مقایسه نتایج تجربی و عددی بدنه هیدرولب۵۰۰، اعتبار روش عددی بکارگرفته شده را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از کار حاضر نشان می دهد که به کمک روش ارئه شده با دقت بالایی می‌توان ضریب درگ یک وسیله زیرسطحی خودکنترل را در طرح نهایی تخمین زد.

Designing an Autonomous Underwater Vehicle hull shape with Direct Approach

Majid Alijani[1], Nowrouz Mohammad Nouri[2]*, Marhamat Zeinali [3]

[1] MSc of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology; majidalijani@alumni.iust.ac.ir
[2] Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology; mnouri@iust.ac.ir
[3] PhD of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology; zeinali@ iust.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 29 Jul. 2016
Accepted: 19 Jul. 2017

Keywords:
AUV
Drag Coefficient
Myring.
Design of Experiment

ABSTRACT

Hydrodynamic design of the exterior hull shape is a main step of body shape design. The effective parameters in this process include the length of the nose and tail, the blunt sections of nose and tail as well as the profiles of the nose and the tail. In the present study to investigate the effect of each of these parameters on the drag coefficient of the body, Design of Experiments (DOE) method is used. For this purpose, by introducing the Hydrolab family profiles, the results of numerical simulation of flow around the Hydrolab500 body was applied to design of experiments. In the first phase, a sample experiments in water tunnel was conducted to validate the pressure profile around Hydrolab500 body. Comparing experimental and numerical results shows the validity of the employed numerical methods. The results of the current work shows that by presented method the drag coefficient of an AUV in the final design can be estimated with high accuracy.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]

۱ - مقدمه

افزایش جمعیت جهان از طرفی و ضرورت کشف و حفظ منابع جدید انرژی از طرف دیگر، نیاز به کاوش در اقیانوس ها جهت رسیدن به اطلاعات جدید در اعماق کشف نشده را ضروری ساخته است. همچنین خطوط نفتی و مخابراتی، اسکله ها و بنادر نیاز به کنترل مداوم دارند. با توجه به خطرات موجود در اعماق دریاها، امروزه برای انجام این ماموریت‌ها از وسایل زیرسطحی خود کنترل استفاده می‌شود[۱]. طراحی وسایل زیرسطحی خودکنترل متناسب با ماموریت، شامل مراحل مختلفی از جمله طراحی شکل بدنه، طراحی سیستم جلوبرنده، طراحی قسمت های داخلی و متعلقات این وسیله می‌باشد. هریک از این مراحل به گونه‌ای باید انجام گیرد که در نهایت وسیله دارای بیشترین زمان ماموریت، کمترین درگ و کمترین نیروی جلوبرنده ممکن باشد[۲] . طراحی شکل بدنه از مراحل اولیه و شاید از اصلی‌ترین مراحل طراحی یک وسیله زیرسطحی باشد. در این حوزه محققین بسیاری از دیرباز تاکنون فعالیت نموده‌اند. طراحی شکل بدنه با دو رویکرد کلی رویکرد مستفیم و رویکرد معکوس انجام می گیرد. در رویکرد معکوس رسیدن به بدنه‌ای که از یک توزیع فشار مطلوب تبعیت کند مدنظر است. در این رویکرد ابتدا یک توزیع فشار اولیه برای نوع خاصی از بدنه‌ها در نظر گرفته می‌شود و سعی برآنست که به بدنه‌ای دست یافت که این توزیع فشار را ارضا کند[۳].

در رویکرد مستقیم با حل جریان اطراف بدنه به صورت مستقیم سعی می‌شود به بهترین بدنه با مشخصات هیدرودینامیکی و پروفیل فشار مناسب دست یافت. دیوید تیلور [۴] در سال ۱۹۱۵ مطالعات روی رفتار هیدرودینامیکی بدنه‌های خط جریانی مدور را آغاز کرد. او علاقه مند به بیان شکل‌های مدور به صورت پارامتریک بود و یک برنامه برای انجام فرآیندتوسعه خانواده بدنه‌های مدور براساس آزمایش‌های قبلی آغاز شد(DTMB) [۱] . در این تحقیق یک سری هندسه‌های کاربردی تحلیلی مانند بیضوی با سهموی، بیضوی با هذلولوی و چندجمله‌ای‌های درجه مختلف ارائه گردید. در سال ۱۹۳۲ لیون چندجمله‌ای درجه۲ را برای بیان مربع انحراف از خط مرکزی برای شکلهای قابل هدایت توسعه داد و به عنوان شکل اولیه ارائه گردید [۵]. در سال ۱۹۵۰گرتلر و لندوبر [۶] پرفیل بدنه را به کمک چندجمله‌ای‌های درجه۶ بیان نمودند. درجه این چندجمله‌ای تعداد پارامترهای مورد نیاز برای بیان کامل شکل را تعیین می‌کند. این بدنه‌ها با محدودیت خمش در بدنه مواجه بودند. گرتلر [۷] مطالعات تجربی روی سری بدنه‌های متقارن که به صورت ریاضی قبلا بیان شده بودند، صورت داد. سری‌های مورد مطالعه او که به سری‌های ۵۸ موسومند توسط ۵ پارامتر مشخص گردیدند. این پارامترها نسبت لاغری، ضریب پریسماتیک، شعاع دماغه، شعاع دم و موقعیت قطر بیشینه است. در سال ۱۹۶۶ کارمیشل[۸] بدنه جریان آرام مربوط به اعداد رینولدز محدوده حرکتی اژدر در شرکت هوافضای امریکای شمالی گزارش داد. مقصود از این تحقیق مشخص کردن میزان کاهش درگ ممکنه با استفاده از تغییر دادن شکل بود. در این گزارش یک روش خاص ایجاد بدنه معرفی نگردید و یک بدنه بر پایه ایرفویل‌های درگ پایین ناکا طراحی گردید. در سال ۱۹۶۹آقای گرانویل [۹] شکل-های خط جریانی دوبعدی و متقارن به صورت تحلیلی به صورت چند جمله‌ای مناسب در قالب پارامترهای مستقل بیان کردند. محدوده مجاز این پارامترهای مستقل با توجه به محدودیت‌های هندسی منتخب آزمایش شد. پارسونز و گودسون در سال ۱۹۷۴ به شکل‌دهی اجسام متقارن و مدور برای دستیابی به درگ مینیمم در جریان غیر قابل تراکم پرداختند[۱۰]. در سال ۱۹۸۱ مایرینگ اقدام به پیشنهاد یک سری بدنه با درگ قابل قبول موسوم به بدنه-های اژدری شکل نمود[۱۱]. در سال ۱۹۹۴ پکوود و همکارش هاگینز [۱۲] یک شکل بدنه جریان آرام با در نظر گرفتن پروانه متناظر با این بدنه مورد مطالعه قرار دادند. از جمله مهمترین کارهای انجام گرفته با دینامیک سیالات محاسباتی[۲]، تحقیقات سرکار و همکارانش است که در سال ۱۹۹۷با استفاده از مدل‌های توربولانی مختلف، جریان روی بدنه‌های متقارن محوری شکل را مورد مطالعه قرار دادند[۱۳]. در سال ۱۹۹۸ لوتز و همکاران [۱۴و۱۵] روی بهینه‌سازی شکل به صورت عددی در اجسام جریان آرام طبیعی در رینولدزهای مختلف مطالعه کردند. در این تحقیق هیچ محدودیت هندسی روی اشکال اعمال نشد. در سال ۲۰۰۲ یاماگوچی شکل بدنه خاصی را شبیه‌سازی و مورد مطالعه قرار داد. او اثر متقابل شکل بدنه و پروانه را در نظر گرفت[۱۶]. در سال ۲۰۰۷ پنگ وانگ و همکاران[۱۷] روی یک نوع خاص از وسیله زیرسطحی با استفاده از الگوریتم طراحی فضای فرعی همزمان[۳] مطالعه کردند. در این مطالعه دو هدف نویز کمینه و درگ کمینه مدنظر قرار گرفت. لذا یک مدل بهینه سازی چند هدفه[۴] برای طراحی شکل بدنه توسعه داده شد. در سال ۲۰۰۸ مارتز و همکاران با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چند هدفه[۵] طرح یک وسیله زیرسطحی را توسعه دادند[۱۸]. در سال ۲۰۰۹ هیتاو ژو و همکاران [۱۹] روی مساله بهینه‌سازی شکل وسیله زیرسطحی بدون موتور با استفاده از مدل جایگزینی[۶] برای بهینه-سازی چند بعدی مطالعاتی به عمل آوردند. در سال ۲۰۰۹ ژیا و همکارانش[۲۰] در مورد انتخاب شکل مناسب براساس شکل ماهی‌گونه خط جریانی تحقیق به عمل آوردند. در این تحقیق ضریب درگ در رینولدزهای بالا شبیه‌سازی شد. نتایج نشان دادند که بدنه‌های سهموی و بیضوی دارای عملکرد درگ جریانی بهتری می‌باشند. در سال ۲۰۱۰ سومان و همکاران [۲۱] یک تحقیق عملی و محاسباتی روی دماغه‌های بیضوی‌گون را روی یک وسیله زیرسطحی سرعت بالا انجام دادند. آنها چهار پروفیل مخروطی،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]

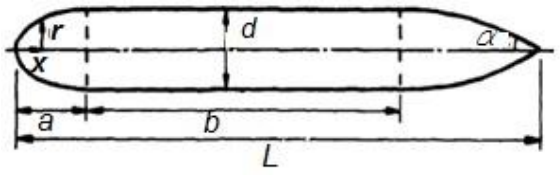
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]

صاف، کروی و بیضوی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج محاسباتی نشان دهنده این بود که دماغه بیضوی دارای کمترین ضریب درگ و توزیع فشار مناسب بود. در سال ۲۰۱۱ آلام و همکاران[۲۳] از بسته بهینه‌سازی برای طراحی بهینه شکل وسیله زیرسطحی استفاده کردند. در این تحقیق دو بسته بهینه‌سازی تحت عناوین NSGA-2[۷] و IDEA [۸] باهم مقایسه شده است. در سال ۲۰۱۳ لیفسون [۲۴] بهینه سازی شکل اجسام متقارن را با مدل چند شبکه‌ای[۹] بررسی کرد که طی این تحقیق از الگوریتم بهینه-سازی براساس جایگزینی[۱۰] استفاده شده است. در این تحقیق از الگوریتم SBO[۱۱] برای بهینه سازی استفاده شده است و کارآیی روش بهینه‌سازی در مقایسه با روش‌های معمولی نشان داده شد. در سال ۲۰۱۳ شرینا و همکارانش[۲۵] کاهش درگ و شکل جسم را با استفاده از جت هوا را با ابزار دینامیک سیالات محاسباتی مورد مطالعه قرار دادند. آنها شکل پیشنهادی هیوانگ در سال ۱۹۷۸را برای این کار انتخاب کردند[۲۶].

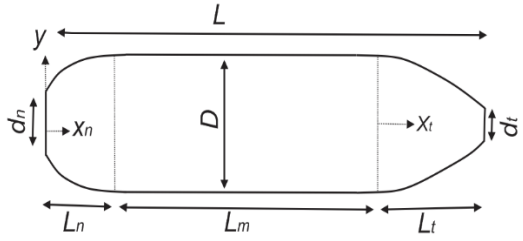
در کار حاضر از روش طراحی آزمایش[۱۲] جهت بررسی پارامترهای موثر بر طراحی شکل بدنه یک زیرسطحی خودکنترل استفاده شده است. جهت نیل به این هدف ابتدا در بخش۲ بدنه‌های مورد بررسی تحت عنوان بدنه‌های هیدرولب معرفی می‌شوند و سپس پارامترهای موثر بر عملکرد هیدرودینامیکی وسیله زیرآبی تعیین می‌شوند. در بخش۳ نحوه انجام تست تجربی روی بدنه هیدرولب۵۰۰ تشریح شده است. نتایج بدست آمده از تست تجربی با روشهای آماری صحه‌گذاری شده‌اند. در بخش۴ به شبیه سازی جریان حول بدنه هیدرولب۵۰۰ پرداخته می‌شود و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از تست تجربی در تونل آب مقایسه می‌شود. در بخش۵ با روش DOE دسته نمونه‌های مورد بررسی معرفی شده و نتایج حل عددی هر دسته نمونه به تفکیک بدست می‌آید. در انتها با استفاده از نتایج نمونه‌ها و رگرسیون دوسطحی کانتور ضریب درگ برحسب پارمترهای مختلف بدست می‌آید. همچنین برای بدنه‌های خانواده هیدرولب در محدوده مورد بررسی رابطه‌ای برای ضریب درگ برحسب پارامترهای مختلف مورد بررسی بدست می‌آید. در پایان نشان داده می‌شود که به کمک این رابطه با دقت قابل قبولی می-توان ضریب درگ یک بدنه خاص را بدون انجام حل عددی تخمین زد.

۲-تعریف بدنه

بدنه‌های مورد بررسی تحقیق حاضر از خانواده هیدرولب میباشد که دارای سه بخش کلی دماغه، دم و قسمت میانی است، که نسبت به بدنه اژدری شکل مایرینگ از تفاوت هایی برخوردار است. در شکلهای۱و۲ دو بدنه مایرینگ و هیدرولب با هم مقایسه شده‌اند.



شکل۱. بدنه اژدری شکل پیشنهادی مایرینگ[۸]

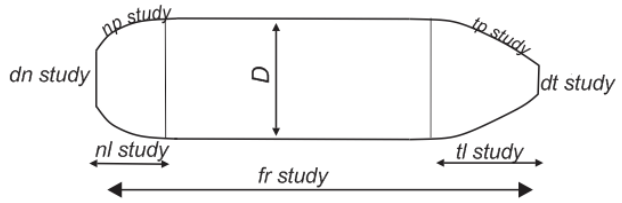


شکل۲. شکل بدنه هیدرولب

همانطور که از شکل پیداست بدنه هیدرولب دارای قسمتهای صاف در دماغه و دم است که بدنه مایرینگ این قسمتها را ندارد. وجود این قسمتهای صاف علاوه بر افزایش امکانپذیری و کاهش مشکلات ساخت بدنه (به خصوص در قسمتهای جلوی دماغه و انتهای دم)، باعث می‌شود که جایگذاری متعلقات داخلی آسانتر انجام پذیرد و از طرفی قرار دادن سنسورهای مطالعاتی مانند دوربین و سیستم روشنایی و... در قسمت دماغه و نیز سیستم جلوبرنده و پروانه در قسمت دم به آسانی انجام پذیرد.

همانطور که از شکل هیدرولب پیداست، عملکرد هیدرودینامیکی شکل وابسته به مقادیر و پارامترهای زیر است:

۱- قطر قسمت صاف دماغه(dn) [۱۳] ۲-پروفیل دماغه(np) [۱۴] ۳-طول دماغه(nl) [۱۵] ۴-قطر بیشینه و طول کلی و در یک عبارت مقدار ضریب لاغری(نسبت طول به قطر ماکزیمم) (fr) [۱۶] ۵-طول دم(tl) [۱۷] ۶-پروفیل دم(tp) [۱۸] ۷-قسمت صاف دم (dt) [۱۹]. این پارامترهای هندسی در شکل ۳ نشان داده شده است:



شکل۳- پارامترهای مورد بررسی در بدنه هیدرولب

پارامترهای مهم دیگر نیز وجود دارد که شامل عدد رینولدز و عمق کاری زیرسطحی می‌باشد که جزو پارامترهای هندسی نمی‌باشند. مطالعات روی این پارامترها در یک بازه محدودی انجام می‌گیرد و عمق کاری پارامتر ثابت در نظر گرفته می‌شود. قسمت میانی دارای شکل استوانه‌ای شکل با قطر ثابت می‌باشد که بر انتهای دماغه و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]

ابتدای دم مماس است. اما پروفیل‌های درنظر گرفته شده برای دماغه و دم دارای شکل کلی روابط۱و۲ هستند که هریک تابع ۶ ضریب ثابت $\alpha, \beta, \gamma, A, B, C$ می‌باشند:

$$Y(x_n) = (D - d_n)\left\{A_n\left[\frac{x_n}{L_n}\right]^{\alpha_n} + B_n\left[\frac{x_n}{L_n}\right]^{\beta_n} + C_n\left[\frac{x_n}{L_n}\right]^{\gamma_n}\right\} + \frac{d_n}{2} \quad (۱)$$

$$Y(x_t) = (D - d_t)\left\{A_t\left[\frac{x_t}{L_t}\right]^{\alpha_t} + B_t\left[\frac{x_t}{L_t}\right]^{\beta_t} + C_t\left[\frac{x_t}{L_t}\right]^{\gamma_t}\right\} + \frac{D}{2} \quad (۲)$$

برای بررسی اثر هریک از پارامترها یک طرح مطالعاتی برای نمونه گیری ارائه می‌شود و سپس هریک از نمونه‌ها بررسی می‌شوند. در ادامه به روند بررسی ونتایج مطالعات روی پارامترها پرداخت می-شود.

۳- بررسی تجربی

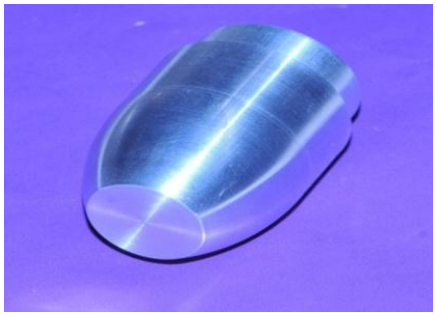
جهت اعتبار سنجی کارهای عددی و تئوری انجام شده از نتایج به دست آمده از تست مدلی بدنه هیدرولب۵۰۰ در تونل آب دانشگاه علم و صنعت ایران استفاده شده است. در این قسمت ابتدا به توضیحاتی درباره سیستم تونل آب دانشگاه علم و صنعت ایران و سنسورهای اندازه‌گیری آن پرداخته می‌شود . در ادامه نحوه طراحی آزمایش، داده‌برداری و تحلیل نتایج آن مورد بحث قرار گرفته است.

۳-۱-تونل آب

تونل از نوع مدار بسته و مساحت مقطع تست ۲۰cm×۱۰cm و طول تقریبی ۱ متر می‌باشد که برای جلوگیری از خطاهای سیستماتیک مجهز به لانه زنبوری و پره‌های راهنما شده است. سیستم پمپاژ آب با دبی $۳۵۰.m^3/h$ را در تونل به گردش در می‌آورد و به از گذر از مقطع تست وارد حوضچه آرامش می‌شود.

۳-۲-طراحی شکل

برای بدست آوردن توزیع فشار ابتدا باید مدلی از بدنه واقعی ساخته شود و بر روی آن تست انجام گیرد. برای این منظور مدلی با مقیاس $\frac{1}{15.24}$ طراحی و ساخته شده‌است. در شکل‌های ۴ تا ۷ نمایی از طراحی و شکل قسمت‌های مختلف مدل دیده می‌شود.



شکل ۴- مدل دماغه

شکل ۵- مدل دم

شکل ۶- مدل قسمت میانی

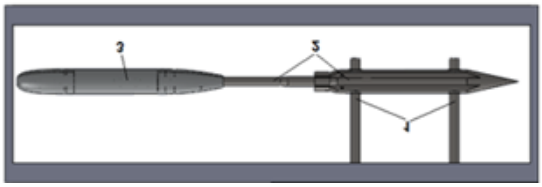
همانطور که ذکر شد، یکی از اهداف انجام تست، یافتن توزیع فشار بدنه می‌باشد. برای این منظور سوراخ‌هایی در بدنه تعبیه شده است. این سوراخ‌ها عمود بر جریان زده شده‌است تا فشار استاتیک اندازه-گیری شود. در شکل۷ نمایی از این سوراخ‌ها و لوله های فشار تعبیه شده داخل بدنه مشاهده می‌شود.

شکل ۷- نمایی از دماغه و دم مدل با لوله های فشار

برای ایجاد زوایای حمله مختلف و ثابت نگه داشتن مدل از استینگ مونت طراحی شده در آزمایشگاه هیدرودینامیک کاربردی دانشگاه علم و صنعت استفاده شده‌است. شکل ۸ نمایی از طراحی آن را نشان می‌دهد.

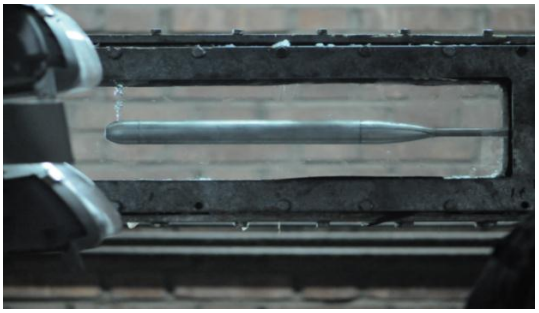
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]



شکل ۸- استینگ مونت طراحی شده برای تستهای استاتیکی و دینامیکی

پس از نصب مدل زیرسطحی هیدرولب ۵۰۰ در تونل آب با دمیدن هوا به شیلنگ‌های فشار از باز بودن تمام سوراخ‌های تعبیه شده بر روی مدل اطمینان حاصل شد. شکل۹ نمایی از تست خروج هوا از سوراخ‌های تعبیه شده بر روی بدنه مدل هیدرولب ۵۰۰ را نشان می‌دهد.



شکل ۹-تست خروج هوا از سوراخ‌های تعبیه شده بر روی بدنه مدل هیدرولب ۵۰۰

۳-۳-ابزارهای اندازه‌گیری

الف- سامانه اندازه‌گیری فشار

یک باکس فشار برای اندازه‌گیری فشار در کانال‌های مختلف در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرودینامیک دانشگاه علم و صنعت تهیه شده است. در این باکس ۶۴ فشارسنج از سه سری ,MPX5010 MPX5050 و MPX5100 در دو نوع نسبی و مطلق شرکت Motorola مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در نقاط مختلف تونل آب بر حسب نیاز سوراخ‌هایی روی پلکسی‌گلاس‌ها تعبیه شده که به کمک لوله‌هایی به این جعبه فشار متصل هستند و این امکان را بوجود می‌آورند تا بتوان به کمک رایانه داده‌ها را ثبت، ذخیره و برای پردازش‌های بعدی آماده نمود. در آزمایشگاه برنامه‌ای تحت عنوان Hydrolab logger نوشته شد که بتواند اطلاعات را ثبت، ذخیره و نمایش دهد. در این نرم‌افزار دو ثابت برای کالیبراسیون قرار داده شده‌است که برای فشارسنج‌های مختلف متفاوت بوده و می‌بایستی تنظیم شوند. در این برنامه می‌توان نرخ داده‌برداری و زمان داده‌برداری را نیز تنظیم نمود.

ب- سامانه اندازه‌گیری دبی جریان

جهت اندازه‌گیری دبی و سرعت عبوری سیال در مقطع آزمایش، از یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی، Proline Promag 10 P، محصول شرکت Endress Hauser استفاده شده‌است. این دبی-سنج بر روی لوله ۸ اینچی ورودی پمپ و به فاصله ۵۰ سانتی‌متر قبل از انشعاب بای‌پس و ۹۰ سانتی‌متر بعد از خروجی مخزن آب نصب شده‌است که در شکل۱۰ نمایش داده شده است.

شکل ۱۰- دبی سنج مورد استفاده در تونل آب و شیر بای‌پس

ج- سامانه ثبت داده

برای ثبت اطلاعات لازم از تونل آب، دو سری سامانه داده‌برداری استفاده شده است. یکی جهت ثبت اطلاعات دبی آب عبوری از تونل و دیگری جهت ثبت اطلاعات حسگرهای فشار. شکل ۱۱ این دو سامانه اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

شکل ۱۱- سامانه داده برداری فشار، دما و دبی جریان

۳-۴-تحلیل آماری نتایج

قبل از اینکه نتایج تجربی به عنوان یک معیار ارزیابی مورد استفاده قرار گیرند، ابتدا بایستی خود به نحوی تحت اعتبارسنجی و راستی‌آزمایی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]

قرار بگیرند. در اینجا نتایج مربوط به فشار کانال‌های مختلف که در طول بدنه گسترده شده اند مد نظر است. یک سری تحلیل آماری یکی از کانالها به عنوان مثال کانال P3 (سومین کانال روی قسمت صاف دماغه) در این قسمت آمده است. در این نمودارها نرمال بودن(زنگوله ای بودن توزیع) نتایج، مقدار میانگین، انحراف معیار، همچنین نویز مورد بررسی می‌باشد.با بررسی این موارد و اطمینان از صحت نتایج، می‌توان از اعتبارسنجی کارهای تئوری توسط نتایج تجربی سخن به میان آورد. تعداد کل داده‌ها N=1200 است که درواقع این عدد نشانگر تعداد داده‌برداری از این کانال به خصوص در حین تست بوده است.

اگر نمونه‌ها با y_i مشخص شوند، مقدار میانگین نمونه‌ها از رابطه ۳ بدست می‌آید:

$$y_{avrg} = \frac{\sum_{i=1}^{N} y_i}{N} \qquad (۳)$$

و مقدار واریانس و نیز خطای استاندارد، که به نحوی بیانگر پراکندگی داده‌ها می‌باشند، به ترتیب از روابط ۴و ۵ بدست می‌آید:

$$\sigma^2_y = \frac{\sum_{i=1}^{N} (y_i - y_{avrg})^2}{N} \qquad (۴)$$

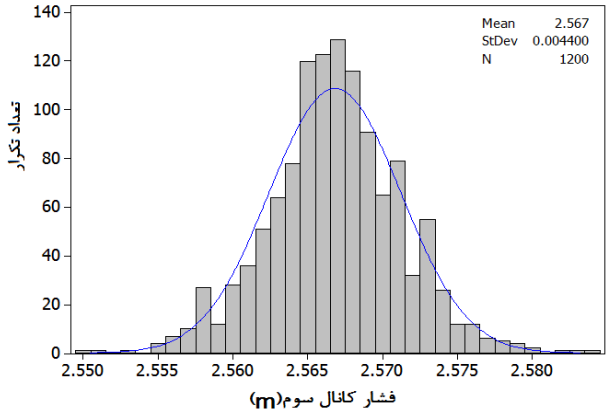
$$\sigma_y = \pm\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (y_i - y_{avrg})^2}{N}} \qquad (۵)$$

به دلیل اینکه پدیده های فیزیکی (ودر اینجا داده‌های فشار) نرمال و دارای توزیع زنگوله ای هستند، انتظار می‌رود نمودار توزیع آنها به صورت گوسین باشد. نرمال بودن داده‌ها از روی توزیع به صورت زنگوله‌ای مشخص می‌گردد. هرچه نمودار توزیع داده‌ها به توزیع زنگوله‌ای نزدیکتر باشد، داده‌ها قابل اعتمادتر هستند..

درمورد خطای نویز بایستی گفته شود که هرچه توزیع رندوم‌گونه‌ای حول خط صفر داشته باشد و مقدار دامنه‌ی خطاها به صفر نزدیک‌تر باشد، داده‌ها مناسب‌تر و قابل اعتمادترند.مقدار خطای نویز از رابطه ۶ بدست می‌آید:

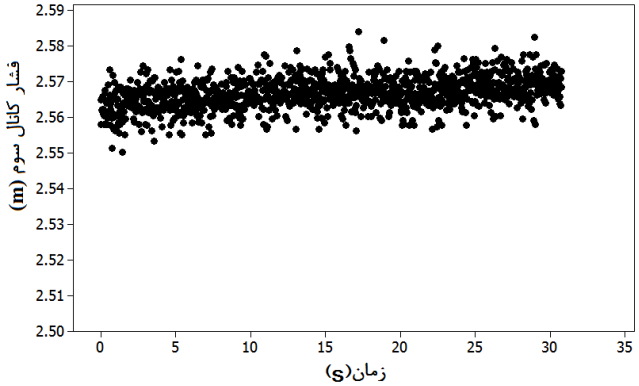
$$noise = y_i - y_{avrg} \qquad (۶)$$

در نمودارهای۱۲ تا ۱۵ هریک از این موارد مذکور (زنگوله ای بودن ، میانگین، انحراف معیار و...) برای یک نمونه کانال (کانال سوم P3) بررسی شده است و شایان ذکر است که کانال‌های دیگر نیز رفتار مشابهی دارند. شکل۱۲ نمودار توزیع دسته‌ی داده ها را نشان می‌دهد.



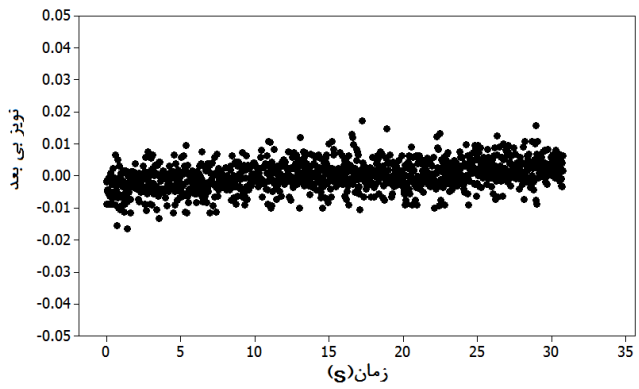
شکل ۱۲- نمودار نرمالیتی داده های یک کاناال در یک تست

با توجه به شکل۱۲ دیده می‌شود داده‌ها از یک نرمالیتی خوبی پیروی می‌کنند و قابلیت اعتماد خوبی دارند. همچنین مقدار انحراف معیار در حدود ۰/۰۰۴ می‌باشد که مقدار نسبتا کمی می‌باشد. مقدار میانگین نیز ۲/۵۶۷ متر آب گزارش شده است. در شکل ۱۳ نمودار توزیع مقادیر داده حول مقدار میانگین بر حسب زمان آمده است.



شکل ۱۳- نمودار فشار کانال سوم برحسب زمان در شرایط خاص داده برداری

همانطور که از شکل ۱۳ پیداست داده‌ها حول مقدار میانگین توزیع خوبی دارند و خطای بایاس (سیستماتیک) زیاد در نمودار ۱۳دیده نمی‌شود. در شکل ۱۴ نمودار نویز مربوط به همین کانال و نمونه‌ها آمده است.

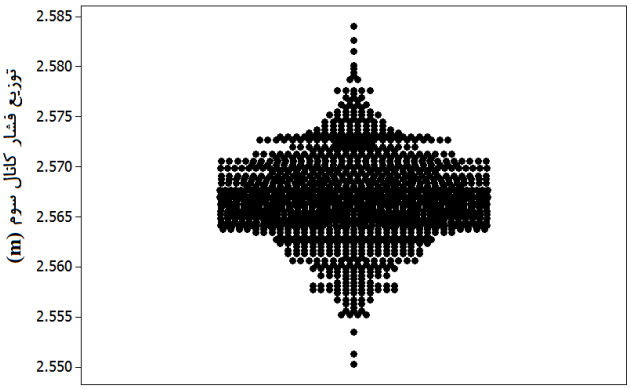


شکل ۱۴- نمودار نویز کانال سوم بر حسب زمان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]

این نمودار همانطور که گفته شد، از مهمترین نمودارها در تحلیل آماری یک مساله می‌باشد و شرایط آن بایستی به گونه‌ای باشد که حول نقطه صفر به صورت یکنواخت توزیع رندوم‌گونه‌ای داشته باشد. همانطور که دیده می‌شود نمودار نویز توزیع مناسبی حول صفر دارد و هیچ گونه بایاسی در این نمودار دیده نمی‌شود. در شکل۱۵ نیز توزیع مقادیر کانال سوم آمده است.

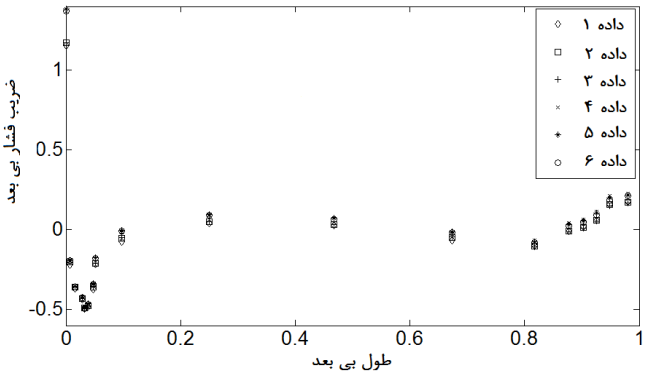


شکل ۱۵- نمودار توزیع داده ها اطراف میانگین

باتوجه به شکل۱۵ محل تقریبی میانگین و بازه‌ی پراکندگی داده‌ها مشهود است و همانطور که دیده می‌شود این رنج دارای مقداری محدود و تقریبا چیزی در حدود ۵/۸ درصد است و همچنین چگالی توزیع در حوالی مقدار میانگین بیشتر است. باتوجه به بحث-های مطرح شده در رابطه با تحلیل آماری نتایج، قابل قبول بودن نتایج از دیدگاه آماری برداشت می‌شود و در مرحله بعد به نتایج تست پرداخت می‌شود.

۳-۵-نتایج تست

در شکل ۱۶ نمودار ۶بار تکرار داده برداری میانگین‌گیری شده پروب‌های فشار آمده است که شرایط همگی یکسان(زاویه حمله صفر و سرعت ۵متر بر ثانیه) و فقط زمان تست آنها در ساعات مختلفی بوده است.



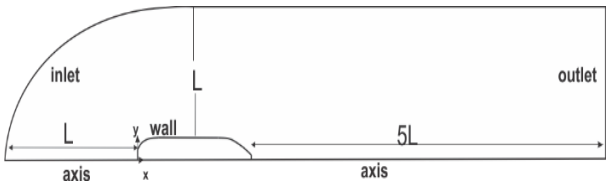
شکل ۱۶- داده های فشار در نقاط مختلف بدنه در شرایط یکسان زاویه حمله صفر و سرعت۵

همانطور که از شکل۱۶ پیداست نتایج داده ها تقریباروی هم منطبق اند و داده برداری دارای تکرارپذیری بالایی است و نتایج قابلیت اعتمادپذیری بالایی دارند. به عبارت دیگر خطای ناشی از نویز نسبتا کم می‌باشد و نتایج تست تحت تاثیر خطاهای نویزی نمی‌باشد.

۴-ناحیه محاسباتی و حل عددی

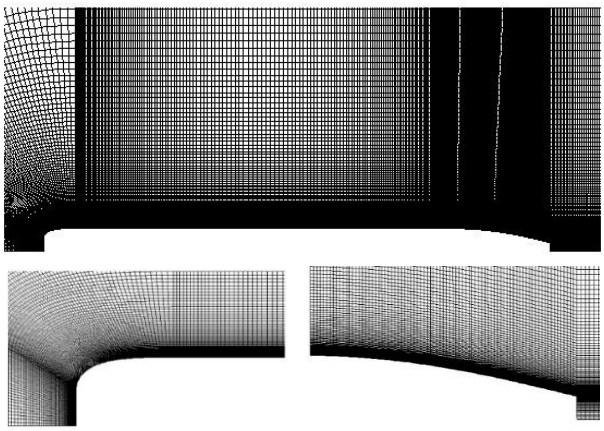
۴-۱-ناحیه محاسباتی

ناحیه محاسباتی در نظر گرفته شده برای شبیه سازی جریان حول این بدنه ها به صورت شکل ۱۷ در نظر گرفته می‌شود:



شکل۱۷-.ناحیه محاسباتی

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود به دلیل اینکه بدنه متقارن محوری می‌باشد، مساله به صورت متقارن دوبعدی درنظرگرفته می-شود. قسمت ورودی دارای یک طول جسم از دماغه و قسمت خروجی ناحیه محاسباتی به اندازه پنج طول جسم از دم فاصله دارند. طول ناحیه محاسباتی قسمت بالای جسم هم به اندازه یک طول جسم است. مرحله بعد ایجاد شبکه بندی در ناحیه محاسباتی می‌باشد که در شکل۱۸ مشاهده می‌شود.



شکل۱۸- شبکه بندی نزدیک بدنه

۴-۲-حل جریان(فلوئنت):

فرم کلی معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم ناپذیر شامل معادله بقای جرم و مومنتوم در روابط ۷ و ۸ از مراجع [۲۷] و [۲۸] آورده شده است:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (۷)$$

$$\rho\bar{u}_j\frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_j} = \rho\bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[-\bar{p}\delta_{ij} + \mu\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}\right) - \rho\overline{\acute{u}_i\acute{u}_j}\right] \quad (۸)$$

در این معادلات ρ و u_i بترتیب مبین چگالی و مولفه سرعت i ام هستند درحالیکه $i = 1,2,3$ است. P، δ_{ij} و μ بترتیب بیانگر فشار استاتیک، دلتا کرونکر و لزجت دینامیکی سیال غیر نیوتنی هستند. $-\rho\overline{u_i'u_j'}$ مبین تنش رینولدز است که خود از رابطه۹ قابل محاسبه است:

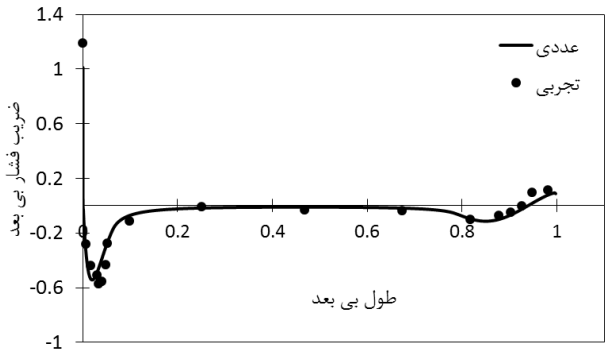
$$-\rho\overline{\acute{u}_i\acute{u}_j} = \mu_t\left[\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}\right] - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \quad (۹)$$

در رابطه ۹، μ_t مبین لزجت توربولانسی است که باتوجه به مدل توربولانسی انتخابی مدلسازی می‌شود. در این مقاله به منظور مدلسازی جریان توربولانس از مدل توربولانسی کی-اپسیلون ریئلایزیبل[۲۰]استفاده شده است. این روش دو تغییر اساسی نسبت به روش استاندارد کی-اپسیلون یافته است. در این روش از معادله جدیدی برای محاسبه لزجت توربولانی استفاده شده است و همچنین معادله۹ از معادله‌ای برای انتقال میانگین مربعات نوسانات ورتیسیتی اقتباس گشته است. [۲۷و۲۸].

در این کار یک مساله متقارن محوری با شرایط مرزی مقتضی در یک ناحیه مشخص حل شده است. در شکل‌های ۱۷و ۱۸ ناحیه محاسباتی بمنظور حل عددی و شرایط مرزی به همراه شبکه بندی درنظر گرفته شده برای ناحیه محاسباتی نشان داده شده است. مساله حاضر توسط مش‌های سازمان یافته ارزیابی گشته و نهایتا تعداد مش ۶۰۰۰۰ بعنوان تعداد بهینه مش بمنظور شبیه سازی انتخاب گشته است. باتوجه به اینکه $y^+ \approx 30$ است لذا از تقریب تابع دیواره[۲۱] نیز در مدل توربولانسی کی-اپسیلون ریئلایزیبل استفاده شده است. از روش سیمپل[۲۲] نیز بمنظور کوپل بین میدان فشار و سرعت در حل عددی استفاده شده است. همچنین تقریب مرتبه اول بالادستی برای تقریب معادله انتقال توربولانی و تقریب مرتبه دوم مرکزی برای فشار و سرعت تنظیم گشته است.

۳-۴- مقایسه نتایج تجربی و عددی

در شکل۱۹ نتایج مقایسه حل عددی و تجربی برای زاویه حمله صفر آورده شده است.



شکل ۱۹- نمودار مقایسه ضریب فشار برحسب طول بی بعد حل عددی و نتایج آزمایشگاهی با زاویه حمله صفر برای بدنه هیدرولب۵۰۰

همانطورکه ازشکل۱۹پیداست، نتایج عددی و آزمایشگاه همخوانی نسبتا خوبی با هم دارند و از آنجا که بحث آماری بر نتایج آزمایشگاهی قبلا انجام شد و نشان داده شد که نتایج آزمایشگاهی معتبرند، لذا اعتبار روش عددی مبرهن می‌باشد.

۵- طراحی آزمایش DOE برای مدل رگرسیون و نقاط بهینه

فرآیند طراحی آزمایش دارای متغیرهایی تحت عنوان ورودی و متغیر(ها)ی خروجی می‌باشد. به منظور یافتن روابط بین ورودی(ها) و خروجی(ها) به صورت عمدی فاکتورهای ورودی تغییر داده می‌شوند. اطلاعات بدست آمده از آزمایش‌هایی که به خوبی طرح ریزی، انجام و تحلیل شده به منظور بهبود عملکرد تولید، کاهش نرخ دوباره کاری و ضایعات، کاهش بازه زمانی توسعه محصول، کاهش تغییرپذیری در فرآیندهای تولید و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. طراحی آزمایش منتسب به فرآیند طرح‌ریزی، طراحی و تحلیل آزمایش می‌باشد که در آن نتایج هدفمند و معتبر به صورت موثر و مفید استخراج می‌شود. موفقیت هر آزمایش طراحی شده وابسته به طرح ریزی استوار، انتخاب مناسب طرح، تحلیل آماری داده ها می‌باشد. در زمینه DOE در تولید، دو نوع متغیر یا فاکتور فرآیندی، فاکتورهای کمی و کیفی ، مد نظر است. برای فاکتورهای کمی بایستی تصمیم گرفته شود که محدوده مورد بررسی و نحوه اندازه گیری و کنترل آنها در طول آزمایش چگونه باشد. فاکتورهای کیفی در طبیعت به صورت گسسته می‌باشد. نوع مواد، نوع مخزن و ... از جمله مثال‌هایی برای فاکتورهای کیفی می‌باشد. یک فاکتور با توجه به ماهیتش ممکن است چندین سطح را دربربگیرد. واژه "سطح" در اینجا به معنای یک تنظیم خاص یا مقدار خاصی از فاکتور است که در در آزمایش انجام می‌گیرد. به عنوان مثال اگر سه نوع ماده در یک آزمایش مورد نیاز باشد، در نتیجه فاکتور نوع مواد دارای سه سطح می‌باشد[۲۹]. به عنوان مثال دیگر از کاربردهای طراحی آزمایش، کریستانا و همکاران [۳۰] با روش طراحی آزمایش با در نظر گرفتن متغیرهای موثر همچون فاصله پاشش و نرخ تزریق، یک روش نوین در اسپری دارو را مورد مطالعه قرار دادند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]

در کار حاضر از روش دوسطحی برای بررسی وابستگی ضریب درگ به پارامترهای طراحی شکل بدنه استفاده شده است. در ادامه این بخش به روش به کارگرفته شده و نتایج به دست آمده به تفصیل پرداخته می‌شود.

۵-۱-انتخاب نمونه‌ها

در طرح مطالعاتی حاضر از روش دو سطحی استفاده می‌شود. برای بررسی، ابتدا شکل بدنه هیدرولب ۵۰۰ به عنوان بدنه معیار در نظرگرفته می‌شود و برای هر پارامتردوسطح در نظر گرفته می‌شود. مطابق جدول ۱ مربوط به سطح بالا و ۱- مربوط به سطح پایین است که بدنه هیدرولب ۵۰۰ سطح میانی از تمام پارامترهای مورد نظر است.

جدول ۱- پارامترها و سطوح در نظر گرفته شده

سطوح	dt	tp	tl	fr	nl	np	Dn	re
-۱	Dt1	Tp1	Tl1	Fr1	Nl1	Np1	Dn1	Re1
۰	H500							
۱	Dt2	Tp2	Tl2	Fr2	Nl2	Np2	Dn2	Re2

از روش فاکتوریل مطابق جدول۲ استفاده می‌شود. در کل ۸ فاکتور داریم که اگر همه پارامترهای تداخلی[۲۳] را در نظر بگیریم، تعداد نمونه‌های مورد نیاز را داریم:

$$samples = 2^8 = 1024\ samples \qquad (۱۰)$$

عملا بررسی تعداد ۱۰۲۴ نمونه غیر ممکن است. لذا باید از روش فاکتوریل جزئی[۲۴] استفاده کنیم. روش ۱/۱۶ فاکتوریل از نظر تعداد نمونه مناسب است. پس خواهیم داشت[۲۶]:

$$\frac{1}{16} factorial \rightarrow \frac{1024}{16} = 16\ samples \qquad (۱۱)$$

پس نیاز به ۱۶ نمونه است که تعداد کافی می باشد.زیرا تعداد نمونه ها آنچنان زیاد نیست که نتوان آنها را بررسی کرد و آنچنان کم نیست که در رگرسیون مشکل ایجاد نماید. مشخصات نمونه ها به صورت کدی برای سطوح پارامترها (۱ و ۰ و ۱-) طبق جدول ۲ می‌باشد:

جدول ۲- مشخصات کدینگ و سطوح نمونه‌ها

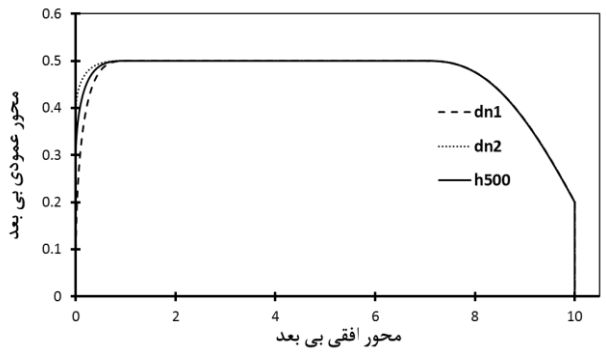
شماره	نمونه	dt	tp	tl	Fr	nl	np	dn	Re
۱	H500	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	Dn1	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-۱	۰
۳	Dn2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
۴	Np1	۰	۰	۰	۰	۰	-۱	۰	۰
۵	Np2	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
۶	Nl1	۰	۰	۰	۰	-۱	۰	۰	۰
۷	Nl2	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
۸	Fr1	۰	۰	۰	-۱	۰	۰	۰	۰
۹	Fr2	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
۱۰	Tl1	۰	۰	-۱	۰	۰	۰	۰	۰
۱۱	Tl2	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰
۱۲	Tp1	۰	-۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۳	Tp2	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۴	Dt1	-۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	Dt2	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۶	Re1	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-۱
۱۷	Re2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱

طبق جدول۲ به طور مثال نمونه ۱ مربوط به هیدرولب ۵۰۰ می-باشد که شکل معیار(سطح ۰) است و نمونه ۲ مربوط به شکل با سطح پایین پارامتر قطر صاف دماغه (۱-) و نمونه ۳ مربوط به شکل با سطح بالای پارامتر قطر صاف دماغه (۱) می‌باشد. بقیه نمونه‌ها هم به شکل مشابه هستند. در ادامه روند حل عددی هریک از نمونه‌ها به تفکیک آمده است.

۵-۲-نتایج حل عددی نمونه ها

درشکلهای ۲۰ تا ۲۶ بدنه‌های مختلف با طول و قطر بی‌بعدشده نمایش داده شده اند. به عبارت دیگر طول و عرض بدنه‌ها بر قطر بیشینه تقسیم شده است.

در شکل۲۰ بدنه های مربوط به سطوح مختلف قطر صاف قسمت دماغه مشاهده می‌شود:



شکل۲۰-.بدنه های مربوط به سطوح مختلف قطر صاف قسمت دماغه

با حل جریان حول این شکلها نتایج جدول ۳ حاصل می‌گردد. در این جدول CD_{Body} ضریب درگ کل بدنه ، $\frac{CD_{pBody}}{CD_{Body}}$(%) نسبت ضریب درگ فشاری به ضریب درگ بدنه به صورت درصد، $\frac{CD_{pNose}}{CD_{pBody}}$(%) نسبت ضریب درگ فشاری دماغه به ضریب درگ فشاری کل بدنه،$\frac{CD_{pNose}}{CD_{pBody}}$(%) ضریب درگ فشاری دماغه به ضریب درگ فشار کل بدنه به صورت درصد، $\frac{CD_{fBody}}{CD_{Body}}$(%) نسبت ضریب درگ اصطکاکی به ضریب درگ کل بدنه به صورت درصد و CD_{Nose} ضریب درگ دماغه می‌باشد.

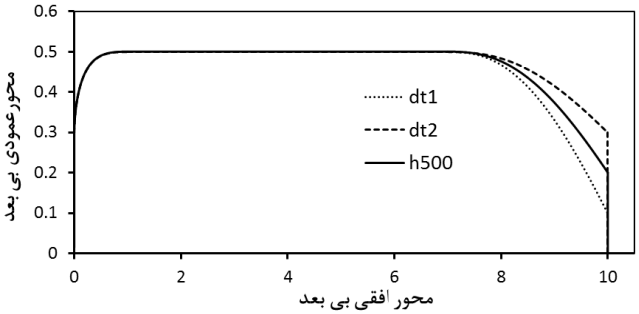
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]

جدول ۳- نتایج مربوط به سطوح مختلف قطر صاف قسمت دماغه

نمونه	CD_{Nose}	$\frac{CD_{fBody}}{CD_{Body}}(\%)$	$\frac{CD_{pNose}}{CD_{pBody}}(\%)$	$\frac{CD_{pBody}}{CD_{Body}}(\%)$	CD_{Body}
Dn1	۰/۰۲۴۴	۸۵/۶۷	۵۳/۸۵	۱۴/۳۳	۰/۱۰۹۹
Dn2	۰/۰۴۳۵	۷۳/۱۸	۷۸/۸۹	۲۶/۸۲	۰/۱۲۵۶
H500	۰/۰۲۹۷	۸۲/۳۲	۶۴/۴۰	۱۷/۶۸	۰/۱۱۴۰

در شکل ۲۱ بدنه های مربوط به سطوح مختلف قطر صاف قسمت دم مشاهده می‌شود:



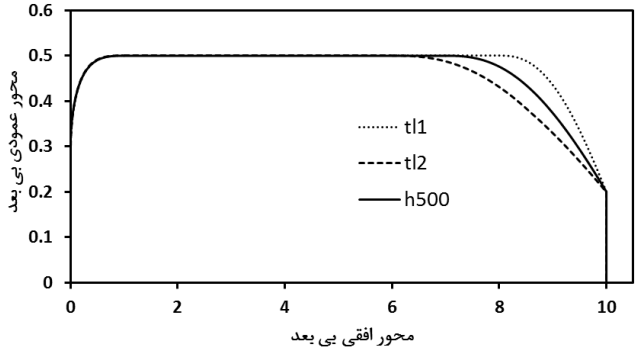
شکل۲۱-.بدنه های مربوط به سطوح مختلف قطر صاف قسمت دم

و با حل جریان حول این شکلها نتایج جدول ۴ حاصل می‌گردد. در این جدول $\frac{CD_{pTail}}{CD_{pBody}}(\%)$ نسبت ضریب درگ فشاری دم به ضریب درگ فشاری کل بدنه،$\frac{CD_{pTail}}{CD_{pBody}}(\%)$ ضریب درگ فشاری دم به ضریب درگ فشار کل بدنه به صورت درصد، $\frac{CD_{fBody}}{CD_{Body}}(\%)$ نسبت ضریب درگ اصطکاکی به ضریب درگ کل بدنه به صورت درصد و CD_{Tail} ضریب درگ دم می‌باشد.

جدول ۴- نتایج مربوط به سطوح مختلف قطر صاف قسمت دم

نمونه	CD_{Tail}	$\frac{CD_{fBody}}{CD_{Body}}(\%)$	$\frac{CD_{pTail}}{CD_{pBody}}(\%)$	$\frac{CD_{pBody}}{CD_{Body}}(\%)$	CD_{Body}
Dt1	۰/۰۲۳۰	۸۳/۶۹	۲۷/۹۶	۱۶/۳۱	۰/۱۱۰۰
Dt2	۰/۰۳۹۴	۷۵/۸۴	۵۷/۱۹	۲۴/۱۶	۰/۱۲۶۴
H500	۰/۰۲۷۱	۸۲/۳۲	۳۵/۶۰	۱۷/۶۸	۰/۱۱۴۰

در شکل ۲۲ بدنه های مربوط به سطوح مختلف طول قسمت دم مشاهده می‌شود:



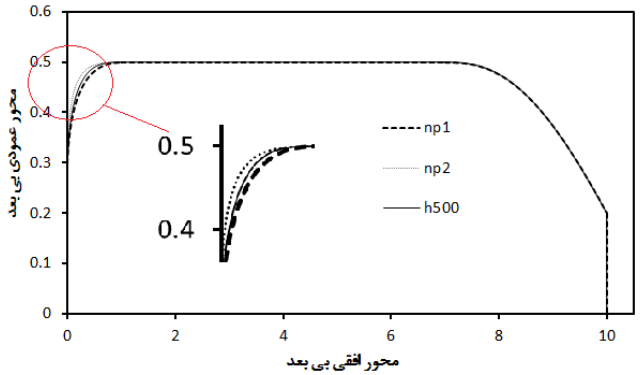
شکل۲۲- بدنه های مربوط به سطوح مختلف طول قسمت دم

با حل جریان حول این شکلها نتایج جدول ۵ حاصل می‌گردد:

جدول ۵- نتایج مربوط به سطوح مختلف طول قسمت دم

نمونه	CD_{Tail}	$\frac{CD_{fBody}}{CD_{Body}}(\%)$	$\frac{CD_{pTail}}{CD_{pBody}}(\%)$	$\frac{CD_{pBody}}{CD_{Body}}(\%)$	CD_{Body}
Tl1	۰/۰۲۰	۸۳/۰۵	۳۳/۴۶	۱۶/۹۵	۰/۱۱۵۸
Tl2	۰/۰۳۵	۸۱/۳۲	۳۸/۹۸	۱۸/۶۸	۰/۱۱۲۸
H500	۰/۰۲۷	۸۲/۳۲	۳۵/۶۰	۱۷/۶۸	۰/۱۱۴۰

در شکل ۲۳ بدنه های مربوط به سطوح مختلف پروفیل قسمت دماغه مشاهده می‌شود:



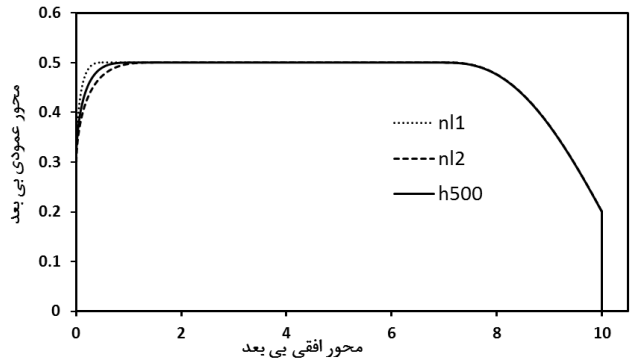
شکل۲۳-بدنه های مربوط به سطوح مختلف پروفیل قسمت دماغه

با حل جریان حول این شکلها نتایج جدول ۶ حاصل می‌گردد:

جدول ۶- نتایج مربوط به سطوح مختلف پروفیل قسمت دماغه

نمونه	CD_{Nose}	$\frac{CD_{fBody}}{CD_{Body}}(\%)$	$\frac{CD_{pNose}}{CD_{pBody}}(\%)$	$\frac{CD_{pBody}}{CD_{Body}}(\%)$	CD_{Body}
Np1	۰/۰۲۸۵	۸۲/۹۰	۶۲/۷۲	۱۷/۱۰	۰/۱۱۲۹
Np2	۰/۰۳۳۲	۸۰/۱۹	۶۹/۱۸	۱۹/۸۱	۰/۱۱۷۱
H500	۰/۰۲۹۷	۸۲/۳۲	۶۴/۴۰	۱۷/۶۸	۰/۱۱۴۰

در شکل ۲۴ بدنه های مربوط به سطوح مختلف طول قسمت دماغه مشاهده می‌شود:



شکل۲۴-.بدنه های مربوط به سطوح مختلف طول قسمت دماغه

با حل جریان حول این شکلها نتایج جدول ۷ حاصل می‌گردد:

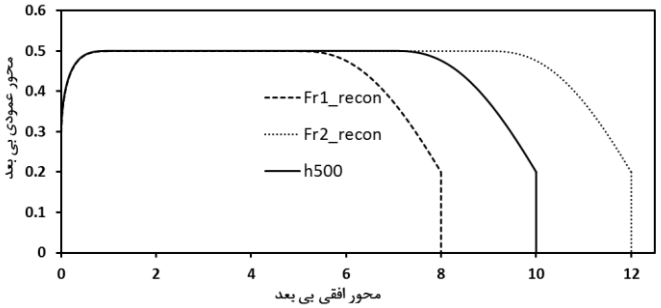
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]

جدول ۷- نتایج مربوط به سطوح مختلف طول قسمت دماغه

نمونه	CD_{Nose}	$\frac{CD_{fBody}}{CD_{Body}}(\%)$	$\frac{CD_{pNose}}{CD_{pBody}}(\%)$	$\frac{CD_{pBody}}{CD_{Body}}(\%)$	CD_{Body}
Nl1	۰/۰۲۷۹	۷۹/۶۸	۶۹/۶۱	۲۰/۳۲	۰/۱۱۸۴
Nl2	۰/۰۳۴۰	۸۲/۸۹	۶۳/۲۶	۱۷/۱۱	۰/۱۱۲۶
H500	۰/۰۲۹۷	۸۲/۳۲	۶۴/۴۰	۱۷/۶۸	۰/۱۱۴۰

در شکل ۲۵ بدنه های مورد بررسی مربوط به سطوح مختلف ضریب لاغری مشاهده می‌شود:



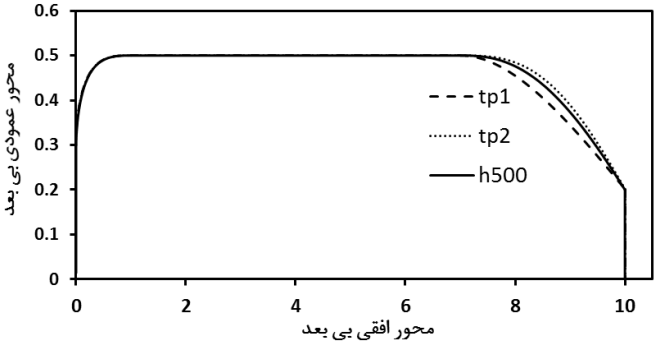
شکل۲۵-.بدنه های مربوط به سطوح مختلف ضریب لاغری

با حل جریان حول این شکلها نتایج جدول ۸ حاصل می‌گردد:

جدول ۸- نتایج مربوط به سطوح مختلف ضریب لاغری

نمونه	CD_{Tail}	$\frac{CD_{fBody}}{CD_{Body}}(\%)$	$\frac{CD_{pTail}}{CD_{pBody}}(\%)$	$\frac{CD_{pBody}}{CD_{Body}}(\%)$	CD_{Body}
Fr1	۰/۰۲۸۸	۷۸/۷۱	۴۳/۱۴	۲۱/۲۹	۰/۰۹۵۲
Fr2	۰/۰۲۶۲	۸۴/۸۹	۳۱/۴۸	۱۵/۱۱	۰/۱۳۳۰
H500	۰/۰۲۷۱	۸۲/۳۲	۳۵/۶۰	۱۷/۶۸	۰/۱۱۴۰

در شکل ۲۶ بدنه های مربوط به سطوح مختلف پروفیل قسمت دم مشاهده می‌شود:



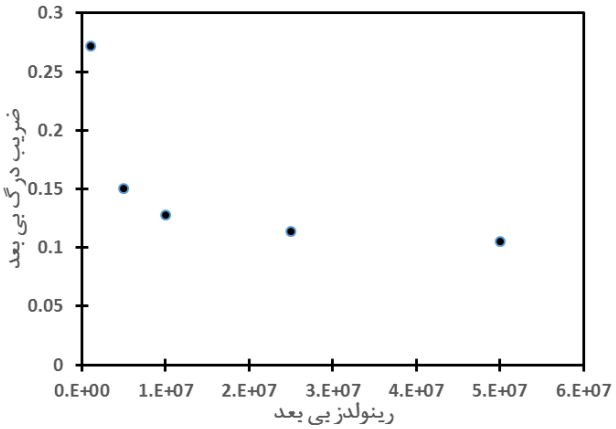
شکل۲۶-بدنه های مربوط به سطوح مختلف پروفیل قسمت دم

با حل جریان حول این شکلها نتایج جدول ۹ حاصل می‌گردد:

جدول ۹- نتایج مربوط به سطوح مختلف پروفیل قسمت دم

نمونه	CD_{Tail}	$\frac{CD_{fBody}}{CD_{Body}}(\%)$	$\frac{CD_{pTail}}{CD_{pBody}}(\%)$	$\frac{CD_{pBody}}{CD_{Body}}(\%)$	CD_{Body}
Tp1	۰/۰۲۶۶	۸۱/۵۱	۳۸/۵۰	۱۸/۴۹	۰/۱۱۳۶۷
Tp2	۰/۰۲۷۵	۸۲/۵۸	۳۴/۷۷	۱۷/۴۲	۰/۱۱۴۳۵
H500	۰/۰۲۷۱	۸۲/۳۲	۳۵/۶۰	۱۷/۶۸	۰/۱۱۴۰۳

برای پارامتر رینولدز علاوه بر دو نمونه۱۶و۱۷ در رینولدزهای مختلفی برای بدنه هیدرولب ۵۰۰ جریان حل شده است و شکل ۲۷ شرایط ضریب درگ در رینولدزهای مختلف برای بدنه هیدرولب۵۰۰ را نشان می‌دهد:



شکل۲۷- نمودارضریب درگ بر حسب رینولدز

همانطور که از شکل۲۷ پیداست، از رینولدز حدود ۲۵میلیون به بعد ناحیه کاملا آشفته است و ضریب درگ مقادیر ثابتی داشته است. مقدار ۲۵ میلیون مقدار معیار برای نمونه‌های ۱تا ۱۵ می-باشد.

۵-۳-مقایسه با رابطه یانگ

در تحقیق مایرینگ[۸]،رابطه۱۲ تحت عنوان رابطه یانگ پیشنهاد شده است که مقدارضریب درگ فشاری به ضریب درگ کل را نشان می‌دهد:

$$\frac{CD_{pBody}}{CD_{Body}} = 0.4\frac{d}{l} \qquad (۱۲)$$

در شکلهای مورد بررسی خانواده هیدرولب ضریب لاغری ۱۰می-باشد. لذا طبق رابطه پیشنهادی مایرینگ داریم:

$$\frac{CD_{pBody}}{CD_{Body}}(\%) = 0.4\times(0.1)\times100 = 4\% \qquad (۱۳)$$

اما با توجه به نتایج در جداول ۳ تا ۹ این مقدار برای شکل‌های هیدرولب حدود ۱۵ تا ۲۷درصد است که در واقع درنظر گرفتن قسمت صاف برای دماغه منجر به افزایش این نسبت (سهم درگ فشاری از درگ کل) شده است. اگر به طور میانگین بدنه‌های هیدرولب دارای نسبت ۲۰٪ باشند، نسبت به بدنه مایرینگ به اندازه ۷۵٪ افزایش سهم درگ فشاری از درگ کل داشته است.

$$\frac{(20\%)-(4\%)}{20\%}\times100 = 75\% \qquad (۱۴)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]

۵-۴-نتایج پارامتریک

در جدول ۲ در بخش ۵-۱ پارامترهای کد شده برای حالت‌های مختلف حل جریان آمده است و در این قسمت یک پس پردازش روی داده‌های خروجی از حل جریان انجام می‌گیرد. بدین صورت که ضریب درگ به صوررت تابعی از فاکتورهای مورد بررسی به صورت دوسطحی درنظر گرفته می‌شود. در جدول۱۰ نتایج ضریب درگ برای نمونه‌های مختلف مورد مطالعه آمده است.

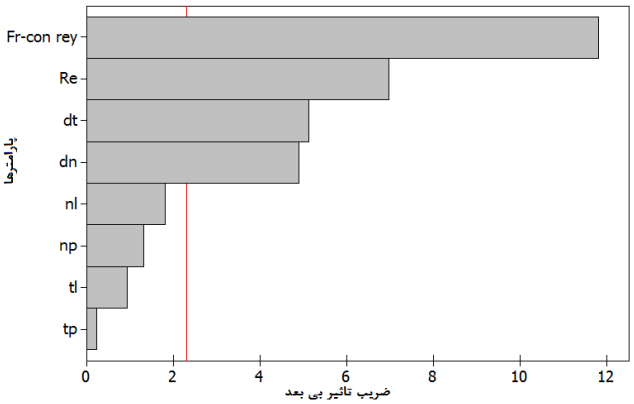
جدول ۱۰- نتایج ضریب درگ برای نمونه های مختلف

ردیف	نمونه	CD
۱	H500	۰/۱۱۴۰۰
۲	Dn1	۰/۱۰۹۹۰
۳	Dn2	۰/۱۲۵۶۰
۴	Np1	۰/۱۱۲۹۰
۵	Np2	۰/۱۱۸۴۰
۶	Nl1	۰/۱۱۸۴۰
۷	Nl2	۰/۱۱۲۶۰
۸	Fr1	۰/۰۹۵۲۰
۹	Fr2	۰/۱۳۳۰۰
۱۰	Tl1	۰/۱۱۵۸۰
۱۱	Tl2	۰/۱۱۲۸۰
۱۲	Tp1	۰/۱۱۳۶۱
۱۳	Tp2	۰/۱۱۴۳۵
۱۴	Dt1	۰/۱۱۰۰۰
۱۵	Dt2	۰/۱۲۶۴۰
۱۶	Re1	۰/۱۲۷۷۰
۱۷	Re2	۰/۱۰۵۴۰

با توجه به داده‌های جدول ۱۰ رگرسیون به صورت دو سطحی انجام شده و معادله رگرسیون به صورت رابطه۱۱ بدست آمد. این معادله ضریب درگ بدنه‌های هیدرولب را برحسب پارامترهای شکل بیان می‌کند.

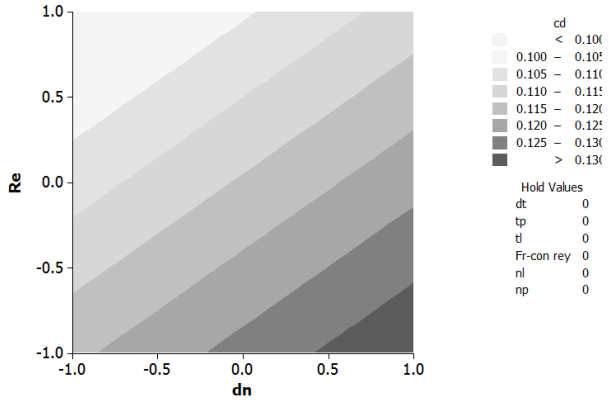
$$CD = 0.116 + 0.00820\,dt + 0.00037\,tp - 0.00150\,tl + 0.0189\,Fr.con.rey - 0.00290\,nl + 0.00210\,np + 0.00785\,dn - 0.0112\,Re \quad (۱۵)$$

نمودار ۲۸ چارت پارتو است که در واقع نشان‌دهنده سهم تاثیر هر پارامتر در فرآیند رگرسیون می‌باشد.



شکل۲۸-نمودار حساسیت فاکتورها در تعیین رگرسیون

در شکل۲۸ همانطور که دیده می‌شود، ضریب لاغری در معادله رگرسیون بیشترین تاثیر را دارد و ضریب پروفیل دم کمترین تاثیر را دارد. طبق معادله رگرسیون، اگر یک بهینه سازی برای پارامترهای هندسی انجام شود، می‌توان در محدوده مورد بررسی پارامترهای موثر، تخمینی از ضریب درگ داشت. در شکل ۲۹ کانتور درگ بر حسب دو فاکتور طول قسمت صاف دماغه و رینولدز دیده می‌شود.

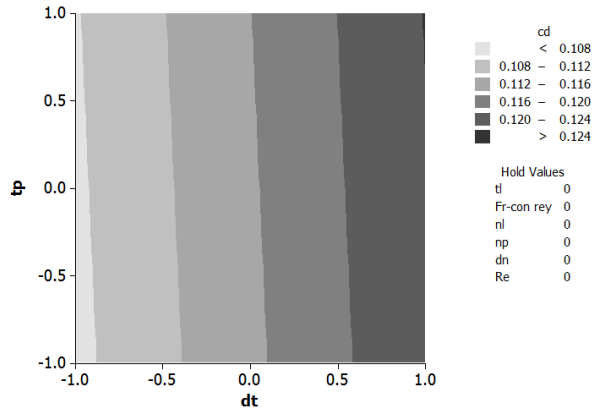


شکل۲۹-کانتورتوزیع ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز و قطر قسمت صاف دماغه

همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش قسمت صاف و افزایش رینولدز، مقادیر ضریب درگ کاهش می‌یابد. در شکل۳۰ کانتور درگ بر حسب دو فاکتور پروفیل دم و قسمت صاف دم دیده می‌شود.

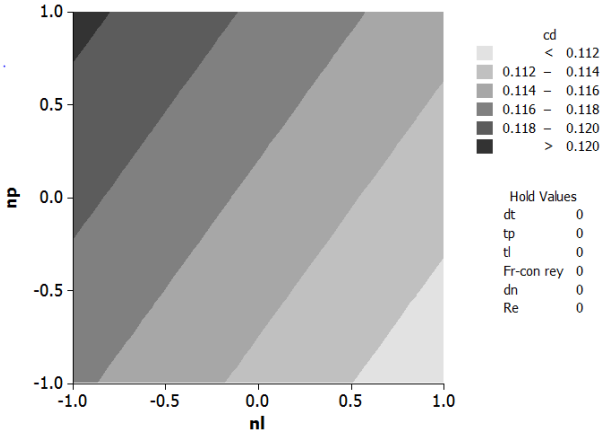
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]



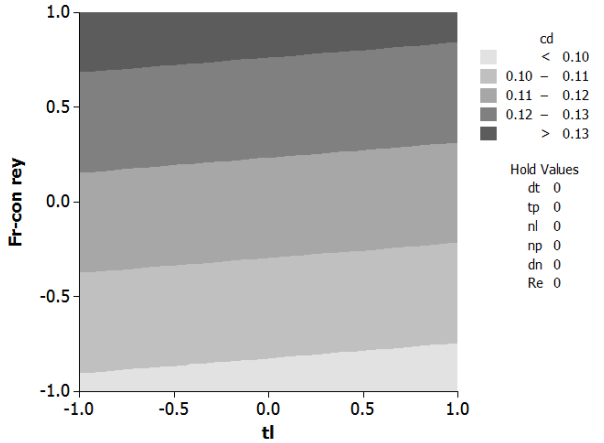
شکل۳۰-کانتور توزیع ضریب درگ برحسب پروفیل دم و قطر قسمت صاف دم

طبق شکل۳۰ در نواحی با قسمت صاف دم کم ضریب درگ کمینه است و ضریب درگ نسبت به پروفیل دم حساسیت کمی دارد. در شکل ۳۱ کانتور درگ بر حسب دو فاکتور طول دماغه و پروفیل دماغه دیده می‌شود.



شکل۳۱-کانتور توزیع ضریب درگ بر حسب پروفیل دماغه و طول دماغه

طبق شکل۳۱ در نواحی با پروفیل دماغه با حجم کم و طول دماغه زیاد ضریب درگ کمینه است. در شکل۳۲ کانتور ضریب درگ بر حسب دو فاکتور طول قسمت دم و ضریب لاغری دیده می‌شود.



شکل۳۲- کانتور توزیع درگ برحسب ضریب لاغری و طول دم

طبق شکل۳۲ در نواحی با طول دم زیاد و ضریب لاغری کم ضریب درگ کاهش می‌یابد.

با توجه به کانتورهای بالا ضریب درگ پایین که هدف اولیه است دربازه مورد بررسی پروفیل دماغه با حجم پایین تر دارای درگ کمتری است و در قسمتی که قطر صاف دماغه کم است، ضریب درگ دارای مقادیری کمی می‌باشد و رینولدزهای بالا دارای ضریب درگ کمتر است و ضریب درگ نسبت به قطر قسمت صاف دم حساسیت کمتری نسبت به قطر قسمت صاف دم دارد و در طول دماغه کمتر و نسبت لاغری بالاتر ضریب درگ بیشتر است و همچنین در نواحی که طول دم بیشتر است، ضریب درگ کم است. اگر یک نتیجه کلی از تحلیل‌های بالا ارائه شود، این است که با خط جریانی شدن بدنه و کاهش حجم، ضریب درگ کاهش می‌یابد.

۵-۵- مطالعات غیر پارامتریک

در جدول۱۱ مقادیر پارامترها به صورت غیر پارامتریک آمده است تا کمی ملموس تر باشند و تاثیر افزایش یا کاهش آن پارامتر بر ضریب درگ معلوم گردد. در جدول۱۱، dn/D نسبت قطر قسمت صاف دماغه به قطر بیشینه بدنه، dt/D نسبت قطر قسمت صاف دم به قطر بیشینه بدنه، ln/D نسبت طول قسمت دماغه به قطر بیشینه بدنه، lt/D نسبت طول قسمت دم به قطر بیشینه بدنه، Vn حجم قسمت دماغه بر حسب مترمکعب و Vt حجم قسمت دم برحسب مترمکعب می‌باشد.

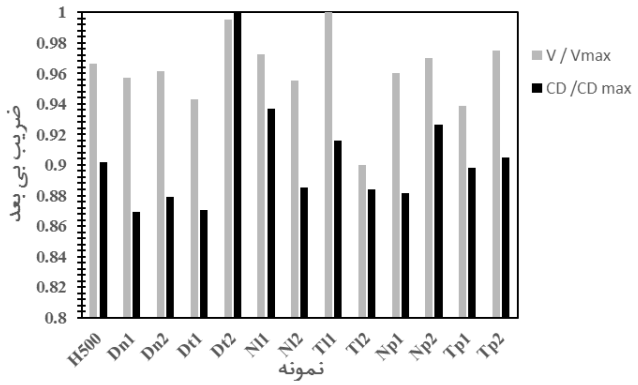
جدول (۱۱): پارامترهای نمونه های مختلف

نمونه	Vt (m^3)	Vn (m^3)	lt/D	ln/D	dt/D	dn/D
H500	۰/۲۰۳۵۵۱	۰/۰۸۷۸۰۹	۳	۱	۰/۴	۰/۶
Dn1	۰/۲۰۳۵۵۱	۰/۰۷۹۳۷۳۷	۳	۱	۰/۴	۰/۲
Dn2	۰/۲۰۳۵۵۱	۰/۰۹۲۷۴۹۲	۳	۱	۰/۴	۰/۸
Dt1	۰/۱۸۲۰۰۹	۰/۰۸۷۸۰۸۶	۳	۱	۰/۲	۰/۶
Dt2	۰/۲۲۹۲۱۶	۰/۰۸۷۸۰۸۶	۳	۱	۰/۶	۰/۶
Nl1	۰/۲۰۳۵۵۱	۰/۰۴۳۹۰۴۳	۳	۰/۵	۰/۴	۰/۶
Nl2	۰/۲۰۳۵۵۱	۰/۱۳۱۷۱۳	۳	۱/۵	۰/۴	۰/۶
Tl1	۰/۱۳۵۵۶۷	۰/۰۸۷۸۰۸۶	۲	۱	۰/۴	۰/۶
Tl2	۰/۲۷۱۱۳۵	۰/۰۸۷۸۰۸۶	۴	۱	۰/۴	۰/۶
Np1	۰/۲۰۳۵۵۱	۰/۰۸۵۱۴۹۳	۳	۱	۰/۴	۰/۶
Np2	۰/۲۰۳۵۵۱	۰/۰۹۰۷۶۰۷	۳	۱	۰/۴	۰/۶
Tp1	۰/۱۸۶۲۰۹	۰/۰۸۷۸۰۸۶	۳	۱	۰/۴	۰/۶
Tp2	۰/۲۱۱۰۲۸	۰/۰۸۷۸۰۸۶	۳	۱	۰/۴	۰/۶

همچنین نمودار شکل ۳۳ برای بدنه‌های مختلف میزان حجم داخلی و ضریب درگ را به صورت نرمال نشان می‌دهد. در این نمودار هرچه فاصله بین حجم و ضریب درگ بی بعد بیشینه باشد، آن بدنه مناسب تر خواهد بود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]



شکل۳۳- .نمودار مقایسه ضریب درگ و حجم نرمال نمونه های بررسی شده

با توجه به نمودار شکل۳۳ دیده می‌شود پروفیل هیدرولب۵۰۰ دارای حجم قابل قبول و نیز ضریب درگ نسبتا پایین می‌باشد و این دو محور فاصله نسبتا زیادی از هم دارند. آنچه اهمیت دارد استفاده از نمودار ۳۳ برای انتخاب پروفیل بدنه مناسب در طراحی-های آتی می‌باشد.

اگر طبق نتایج جدول ۱۱ بخواهیم یک رابطه‌ای برای ضریب درگ بدنه‌های هیدرولب در محدوده مورد بررسی بیابیم، رگرسیون برای تخمین اولیه بدنه‌های مشابه می‌تواند در بازه محدودی مورد استفاده قرار گیرد. برای اعتبار سنجی رگرسیون و تعیین مقدار تقریبی خطا در تخمین ضریب درگ رگرسیون بدون نتایج بدنه H500 انجام می‌گیرد و در آن ضریب درگ این بدنه حاصل از رگرسیون با مقدار حاصل از حل عددی مقایسه می‌گردد. رابطه۱۲ نتیجه رگرسیون را نشان می‌دهد:

$$CD = -834.801 + 0.00003777\,dn/d + 0.0283553\,dt/d + 83.398\,Ln/d + 83.4831\,Lt/d - 849.485\,Vn - 850.358\,Vt + 850.465\,V \qquad (16)$$

در رابطه۱۲،V حجم کلی بدنه برحسب مترمکعب می‌باشد. در جدول ۱۲ مقدار خطای ضریب درگ حاصل از رگرسیون با مقدار حاصل از نتایج عددی برای بدنه هیدرولب۵۰۰ مقایسه شده است:

جدول ۱۲- مقدار ضریب درگ تخمینی H500 و خطای آن

ضریب درگ حاصل از رگرسیون	۰/۱۱۶۰
ضریب درگ حاصل از حل عددی	۰/۱۱۴۰
خطای حاصل بر حسب درصد	٪ ۱/۸

باتوجه به نتایج ضریب درگ در جدول۱۲، تخمین ضریب درگ با استفاده از رگرسیون انجام شده در مقایسه با ضریب درگ بدست آمده از روش عددی قابل قبول بوده است. خطای تخمین در حدود ۱/۸درصد بوده است و نشان می‌دهد با استفاده از رابطه رگرسیون بدون تست تجربی و یا حل به روش عددی نسبت به طرح‌های آتی یک تخمین قابل قبول از ضریب درگ داشت.

۶-جمع بندی

در این تحقیق به بررسی بهینه‌سازی مستقیم در بدنه های زیرسطحی خانواده هیدرولب پرداخته شد. بعد از معرفی پارامترهای موثر بدنه هیدرولب، به بررسی تست تجربی حول بدنه هیدرولب۵۰۰ پرداخته شد. سپس در یک محدوده ای از پارامترهای هندسی مانند طول قسمت صاف، پروفیل دماغه، ضریب لاغری نمونه‌هابی مختلفی به صورت عددی حل شد. نتایج تجربی و عددی بدنه هیدرولب۵۰۰ با هم مقایسه شد و نتایج نشان داد که روش عددی دارای دقت قابل قبول می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده از روش عددی برای بدنه های مختلف، بهینه سازی با معادله رگرسیون صورت گرفت و یک کانتور پیوسته از ضریب درگ بر حسب پارامترهای مورد بررسی در محدوده مورد بررسی بدست آمد. نتایج به دست آمده از روش بکارگرفته شده نشان می‌دهند که پارامتر نسبت لاغری و پس از آن پارامتر رینولدز و قطر قسمت صاف دم به عنوان تاثیرگذارترین و نیز پروفیل دم به عنوان کم اهمیت ترین پارامترها در معادله رگرسیون درگ بدنه‌های هیدرولب در محدوده مورد بررسی می‌باشند. معادله رگرسیون ارائه شده توانست مقدار درگ بدنه H500 را با خطای تقریبی ۱/۸ درصدتخمین بزند. این معادله رگرسیون قابلیت این را دارد که در محدوده مورد مطالعه برای طراحی‌های آتی یک تخمین اولیه از درگ را ارائه دهد. همچنین مقایسه بدنه H500 با سایر نمونه نشان می‌دهد که بدنه H500 دارای حجم و درگ قابل قبولی می-باشد. وجود قسمت صاف دماغه و دم که برای جای‌گذاری سنسورها و پروانه و... نیاز است، باعث افزایش سهم درگ فشاری از ضریب درگ کل به اندازه ۷۵درصد نسبت به بدنه‌های پیشنهادی مایرینگ شده است که اهمیت در نظر گرفتن پروفیل فشار در این بدنه‌ها را نشان می‌دهد.

کلید واژگان

1-David Taylor Model Basin
2- Computational Fluid Dynamics
3- Concurrent subspace design algorithm
4- M&MDO
5- Multiple Objective Genetic Optimization
6- Surrogated model
7- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
8- Infeasibility Driven Evolutionary Algorithm
9- Multi-fidelity
10- Surrogate-based
11- Surrogate-Based Optimization
12- Design of Experiment
13-Diameter of nose

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]

14-Nose profile
15-Nose length
16-Fitness ratio
17-Tail length
18-Tail profile
19-Diameter of tail
20- Realizable k-e
21- Function Wall
22- SIMPLE
23- Full factorial
24- Fractional factorial

۷- مراجع

1- Alam, K., Tapabrata, R., Sreenatha ,G. A., (2014), *A brief taxonomy of autonomous underwater vehicle design literature*, Ocean Eng, Vol.88, p.627-630.

2- Sahu, B.K., Bidyadhar, S., (2014*). The state of art of autonomous underwater vehicles in current and future decades*, First international conference on automation, control, energy and systems (ACES)

3- Nouri, N. M., Zeinali, M., Jahangardy, Y, *(2015) AUV hull shape design based on desired pressure distribution*, Journal of Marine Science and Technology, p.1-13.

4- Taylor, D.W., (1915), *Calculations for Ships' Forms and the Light Thrown by Model Experiments upon Resistance, Propulsion, and Rolling of Ships*, Transactions of the International Engineering Congress, September 20 – 25.

5- Lyon, H.M ., (1932), *The Lffect of Turbulence on the Drag of Airship Models*, Aeronautical Research Comittee (Great Britain) R & MI 1511.

6- Gertler, M., Landweber, L., (1950), *Mathematical formulation of bodies of revolution*, DTMB Report 719.

7- Gertler, M., (1950), *Resistance experiments on a systematic series of streamlined bodies revolution for application to the design of high speed submarins*, DTMB Report 297.

8- Carmicheal, B. H.,(1966), *Underwater vehicle drag reduction through choice of shape*, In AIAA Second Propulsion Joint Specialist Conference, Colorado Springs, Colorado.

9- Granvill, (1969), *Geometrical characteristics of streamlined shapes*, DDC Report 2962.

10- Parsones, J.S., Goodson, Raymond, (1972), *Shaping of Axisymmetric Bodies for Minimum Drag in Incompressible Flow*, Purdue University Report 4.

11- Myring, D.F., (1972), *A theoretical study of the effects of body shape and mach number on the drag of bodies of revolution in subcritical axisymmetric flow*, Procurement Executive, Ministry of Defenoe Farnboroug HeMnte.

12- Packwood, A.R., Huggins, A., (1994), *After body shaping and transition prediction for a laminar flow underwater vehicle*, Ocean Engng, Vol.21, No.5, p.445-459.

13- Sarkar, T., Sayer, P. G., Fraser, S. M., (1997), *Flow simulation past axisymmetric bodies using four different turbulence models*, University of Strathclyde, Glasgow, UK, Elsevier Science, Vol.21, No.12, p.783-792.

14- Lutz, T.h., (1997), *Drag reduction and shape optimization of airship bodies*, Institute for Aerodynamics and Gas Dynamics University of Stuttgart, Germany, Vol.35, No.3, p.345-351.

15- Lutz, T.h, Wagner, S., (1998), *Numerical shape optimization of natural laminar flow bodies*, In Proceedings of 21st ICAS Congress.

16- Yamaguchi, S., (2002), *A study on Shape Optimization for an Underwater Vehicle*, ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium Daejeon , Korea, p.17–20.

17- Wang, P., (2007), *Application of Concurret Subspace Design to Shape Design of AUV*, IEEE Computer Society, College of Marine, China, Vol.3, p.1068–1071*.*

18- Martz, M.A., (2008), *Preliminary Design of an Autonomous Underwater Vehicle using a Multiple-Objective Genetic Optimizer*, Ocean Engineering, Blacksburg, Virginia*.*

19- Haitao, G., (2009), *Surrogate Models for Shape Optimization of Underwater Glider*, International Conference on Computer Modeling and Simulation, IEEE, p. 3-6.

20- Xia, D. , Liu, J., (2009), *Shape selection on the flow drag characteristic passing a streamline fishlike body*, School of Mechatronics Engineering Harbin Institute of Technology, IEEE, p. 1-4.

21- Hussain, A. A., (2010), *Design of an underwater glider platform for shallow-water applications*, International Journal of Intelligent Defense Support Systems, Vol.3, No.3-4, p.186-20.

22- Suman, K.N, (2010), *Hydrodynamic Performance Evaluation of an Ellipsoidal Nose for for a High Speed Underwater Vehicle*, JJMIE, Vol.4, No.5, p. 641 – 652.

23- Alam, K., (2011), *Design of a Toy Submarine Using Underwater Vehicle Design Optimization Framework*, IEEE, School of Engineering and Information Technology University of New South Wales, Australia, p.23-29.

24- Leifsson, L., Slawomir, K., (2013),*Hydrodynamic Shape Optimization of Axisymmetric Bodies Using Multi-fidelity Modeling*, Simulation & Modeling Methodologies, Technologies & Appl., AISC 197, p.209–223 , Iceland.

25- Shereena, S.G, (2013), *CFD study of drag reduction of axisymmetric underwater vehicle using air jet*, Engineering Application of Computational Fluid Mechanics, Vol.7, No.2, p.193-209.

26- Huang, T.T., (1978), *Stern boundary layer flow on axisymmetric bodies*, Twelfth Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, p.125_167.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]

27- Shih, Tsan-Hsing, (1995), *A New k-epsilon eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows*, Computers & Fluids, Vol.24, No.3, p.227-238.
28- Launder, Edward, B., Spalding, D.B., (1974), *The numerical computation of turbulent flows*, Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol.3, NO.2, p.269-289.
29- Antony. J.,(2003), *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, Elsevier Science & Technology Books.
30- Korhonen, K., Mirja, P., Korhonen, O., (2016), *Evaluation of a novel spraying method for preparing Eudragit-polymer-drug thin matrix films by design of experiment*, Journal of Drug Delivery Science and Technology.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.1.9]