



## بهینه‌سازی هندسی بدنه فشار شناور زیر سطحی با در نظر گرفتن تأثیر متقابل یک طرفه سازه-سیال

محسن علی گلی<sup>1</sup>، علی اصغر عطائی<sup>2\*</sup>، مجتبی حقیقی یزدی<sup>2</sup>، علیرضا ریاسی<sup>2</sup>

1- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

\* تهران، صندوق پستی 1439957131، [aataee@ut.ac.ir](mailto:aataee@ut.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

در مقاله‌ی حاضر، نمایه مقطع طولی و عرضی یک زیردریایی، که در عمق مشخصی قرار دارد، بر مبنای فشار هیدرودینامیک که بر بدنه زیردریایی توسط جریان سیال وارد می‌شود، از دیدگاه سازه‌ای و با در نظر گرفتن مقاومت کماتشی بدنه تحت فشار خارجی بهینه‌سازی شده است. محاسبه فشار هیدرودینامیکی با استفاده از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی و بهینه‌سازی هندسه بدنه با استفاده از نرم‌افزار انسیس ورکبنچ انجام شده است. بدنه فشار زیردریایی تقریباً بیشترین فشار را تحمل می‌کند و از این‌رو از جنس کامپوزیت پایه پلیمری در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه هندسه‌ی مورد مطالعه و نوع بارگذاری (بار هیدرودینامیکی) در این مقاله پیچیده است و همچنین روابط تحلیلی برای بررسی تنش در این پژوهش موجود نیست، کماتش با استفاده از محاسبات نرم‌افزاری، بدست آمده و با انجام تحلیل تنش زیردریایی با هندسه اولیه مورد نظر، نیروها و تنش‌های وارده به بدنه، محاسبه شده و از نظر هیدرودینامیکی و سازه‌ای نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌است. با فرض 12 متغیر هندسی و کمینه کردن وزن و نیروی پسا به عنوان توابع هدف، توسط روش‌های بهینه‌سازی، نمایه طولی و عرضی بهینه و این روند تا رسیدن به مقادیر مطلوب تکرار می‌شود. نتایج بدست آمده در این مقاله حاکی از آن است که بکارگیری اشکال غیر دایروی همچون شبه بیضی در طراحی و ساخت زیردریایی می‌تواند جایگزین مقاطع دایروی شود.

دریافت: 1401/05/11

پذیرش: 1401/10/17

### کلیدواژگان

بهینه‌سازی، زیردریایی، کامپوزیت، هیدرودینامیک، متغیر هندسی، نیروی پسا

## Geometrical optimization of submarine pressure hull considering one-way fluid-solid interaction

Mohsen Aligoli<sup>1</sup>, Aliasghar Atai<sup>2\*</sup>, Mojtaba Haghghi-Yazdi<sup>2</sup>, Alireza Riasi<sup>2</sup>

1-School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2-School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\* P.O.B 1439957131, Tehran, Iran, [aataee@ut.ac.ir](mailto:aataee@ut.ac.ir)

### Keywords

Optimization, Submarine, Composite, Hydrodynamics, geometrical variables, drag force.

### Abstract

In this paper, the profile of the longitudinal and transverse sections of a submarine, which is located at a certain depth, based on the hydrodynamic pressure imposed on the submarine body by the fluid flow, from a structural point of view and considering the buckling resistance of the body under external pressure optimized. The calculation of hydrodynamic pressure has done using computational fluid dynamics analysis and body geometry optimization using ANSYS Workbench software. The pressure body of the submarine withstands almost the most pressure and hence it is considered to be made of polymer based composite material. Considering that the studied geometry and the type of loading (hydrodynamic load) in this article are complex, and analytical relationships for stress analysis are not available in this research, buckling is obtained using software calculations and by performing submarine stress analysis with the desired initial geometry, forces and stresses applied to the body have been calculated and hydrodynamically and structurally studied. Assuming 12 geometrical variables and minimizing weight and drag force as objective functions, by optimization methods, optimal longitudinal and transverse profile and this process is repeated until the desired values are reached. The results obtained in this article indicate that the use of non-circular shapes such as pseudo-ellipses in the design and construction of submarines can replace circular sections.

### 1- مقدمه

طولانی در زیر دریا زندگی کند. این سازه‌های پیشرفته، مدیون مسابقه تسلیحاتی جنگ سرد بین دو ابر قدرت شرق و غرب در قرن بیستم است. در حال حاضر زیردریایی‌ها، نشان‌دهنده‌ی توانمندی قابل توجه کشورها در عرصه‌های مختلف علمی و نظامی هستند [1-2]. قابل ذکر است که امروزه پیشرفت علوم در خصوص هیدرودینامیک زیردریایی، باعث بوجود آمدن زیردریایی‌های

به طور کلی زیردریایی، یک وسیله‌ی نقلیه شناور است که می‌تواند در زیر سطح آب حرکت کند و به اعماقی برسد که غواصان به آن دسترسی ندارند. اختراع زیردریایی به انسان اجازه داد تا بتواند همچون موجودات دریایی برای مدت

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Aligoli, M., Atai, A., Haghghi Yazdi, M., Riasi, A., "Geometrical optimization of submarine pressure hull considering one-way fluid-solid interaction," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 2, pp. 1941-1951, 2023.

<https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.554504.1785>

است [10]. بین‌لی و همکاران (2017)، در تحقیقی به بهینه‌سازی لایه‌چینی و تعداد لایه‌ها در بدنه فشار زیردریایی کامپوزیتی پرداخته‌اند. در این پژوهش از بهینه‌سازی دو مرحله‌ای استفاده شده است. ابتدا درصد حجمی الیاف، ضخامت چندلایه، تعداد و ابعاد رینگ‌های تقویت‌کننده و سپس در مرحله دوم تعداد لایه‌ها بهینه‌سازی شده است [11]. پاز و موناژ (2017)، نیز در پژوهشی با عنوان بهینه‌سازی چند منظوره طراحی یک حوضچه زیردریایی، به بررسی مدلی از زیردریایی با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر هندسه، با روش بهینه‌سازی چند هدفه (روش ژنتیک) برای یافتن مجموعه‌ای از گزینه‌های طراحی مناسب که نیاز به کاهش همزمان قطر و مقاومت فشاری دارد، پرداختند. در نهایت، برخی از راه‌حل‌ها برای این مورد طراحی با توجه به معیارهای پذیرفته شده در این مطالعه بدست آمده است [12]. آلمیدا و توناکو (2017)، در تحقیقاتشان به بررسی و طراحی مفهومی زیردریایی مسافری برای سیستم‌های دریایی پرداختند. این مقاله راهکار نوآورانه و جدید برای حمل کارکنان سیستم‌های تولید نفت در دریای خزر را از ساحل به واحدهای خود که در مسیر 300 کیلومتری ساحل هستند، ارائه می‌دهد. در نهایت بهینه‌سازی هیدرودینامیکی بدنه، با استفاده از تجزیه و تحلیل دینامیکی سیالات محاسباتی نیز انجام شده است [13]. کراون و همکاران (2016)، به طراحی بدنه کامپوزیت تحت فشار پرداختند. تحقیقات آن‌ها عموماً توسعه فشار کامپوزیت را ارائه داده و توسعه یک مفهوم بدنه‌ی کامپوزیتی را برای یک بدنه غواصی یا دستگاه شناور استفاده می‌کند. این کار با ارزیابی چندین مفهوم مدل‌سازی با استفاده از تحلیل المان محدود برای وزن و سایر معیارها انجام شده است. همچنین نواقص هندسی نیز مورد توجه قرار داده شده است. این نقص‌ها عموماً نشان داده که تأثیر قابل توجهی بر عمق فروپاشی بدنه کامپوزیتی تحت فشار دارد [14]. مطبوع<sup>1</sup> و همکاران (1396)، به بررسی عددی و تجربی نیروهای هیدرودینامیک وارد بر یک شناور مغروق پرداختند. هدف پژوهش این است که هندسه و بدنه‌ی زیردریایی طوری طراحی و ساخته شده که حداقل میزان انرژی برای پیش‌رانش جهت تولید حرکت داشته باشد. در نتیجه مستلزم این است که نیروی مقاوم آبی که به شناور وارد می‌شود، در سرعت و عمق‌های مختلف حرکت کمینه باشد که انتخاب سرعت بهینه از طریق شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است [15]. صنعتی‌زاده<sup>11</sup> و همکاران (1395)، در مقاله تحلیل کمناش پوسته‌های کامپوزیتی استوانه‌ای با مقطع بیضی تحت اثر بارهای جزئی به روش نوار محدود، به دلیل پایین بودن مدول برشی عرضی مصالح کامپوزیت از نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول استفاده کرده است. توابع تغییر مکان و جابجایی از ترکیب روش المان محدود و نوار محدود به دست آمده است. در این پژوهش با استفاده از تحلیل خطی مقدار ویژه، بارکمناش پوسته‌ی استوانه‌ای کامپوزیتی با مقطع بیضی برای لایه‌بندی‌ها، هندسه و بارگذاری‌های جزئی محاسبه شده و نتایج آن با نتایج نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس مقایسه شده است [16]. میرزایی و بدری<sup>12</sup> (1392)، نیز در پژوهش بهینه‌سازی دینامیکی بدنه زیردریایی و ملحقات آن به کمک روش ژنتیک، بهینه‌سازی دینامیکی بدنه را به صورتی که نیروهای هیدرودینامیکی آن به‌صورت جداگانه مدل‌سازی شده و به‌صورت پارامتری در معادلات پایداری زیردریایی وارد شده است را انجام داده‌اند. همچنین بهینه‌سازی محل قرار گرفتن سطوح کنترل و برجک به عنوان

مدرن شده که شناسایی آن‌ها را مشکل‌تر نیز کرده است. به طور کلی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر زیردریایی تابع عواملی همچون آشفتگی جریان و شکل بدنه زیردریایی می‌باشد. به علت پیچیدگی هندسه‌ی زیردریایی و نیز پیچیده بودن مشخصات سیال اطراف آن، محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر آن بصورت تحلیلی غیرممکن است. بدین جهت تنها از روش عددی و یا تجربی می‌توان نیروهای وارد بر زیردریایی را مورد مطالعه قرار داد [3]. روش‌های عددی به دلیل سرعت بالا، دقت مناسب و همچنین ارزان بودن در مقایسه با روش‌های آزمایشگاهی، کاربرد وسیعی دارد. همچنین در روش‌های عددی، پارامترهای مختلفی قابل تغییر و بررسی است. با استفاده از مدل‌های ریاضی می‌توان نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر جسم را به‌صورت ضرایب هیدرودینامیکی بیان کرد [4]. لذا به طور اساسی در مقاله‌ی حاضر، نمایه<sup>1</sup> مقطع طولی و عرضی یک زیردریایی، که در عمق مشخصی قرار دارد، بهینه‌سازی شده است. تحلیل این مسأله با رویکرد برهم‌کنش سیال-سازه یکطرفه انجام شده است. سپس توسط روش‌های بهینه‌سازی، نمایه طولی و عرضی بهینه می‌شود و این روند تا رسیدن به مقادیر مطلوب تکرار می‌شود. معمولاً بهینه‌سازی‌های صورت گرفته در مطالعات مربوط به زیردریایی، یا بصورت بهینه کردن بدنه برای کم کردن نیروهای پسا و یا بصورت بهینه کردن بدنه برای تحمل بار کمناشی است [5].

بدنه فشار زیردریایی<sup>2</sup>، به دلیل اینکه بیشترین قسمت بدنه را تشکیل می‌دهد، بزرگترین سطحی است که فشار را تحمل می‌کند و از جنس کامپوزیت پایه پلیمری در نظر گرفته می‌شود. مواد کامپوزیتی علاوه بر دارا بودن استحکام کافی برای سازه، باعث سبک‌تر شدن زیردریایی و در نتیجه مانورپذیری بیشتر آن می‌شود [6]. در مورد لایه‌چینی هم از لایه‌چینی متداول برای مواد کامپوزیتی استفاده می‌شود. این لایه‌چینی‌ها باعث ایجاد بیشترین مقاومت از نظر کمناش می‌شود و همچنین تعداد لایه‌های مورد استفاده، باید مقداری باشد که متداول باشد و در مقالات و پژوهش‌های گذشته مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و در حال حاضر بصورت متداول در اینگونه زیردریایی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [7-8]. لذا با انجام تحلیل تنش زیردریایی با هندسه اولیه مورد نظر، نیروها و تنش‌های وارده به بدنه، محاسبه می‌شود و از نظر هیدرودینامیکی و سازه‌ای بررسی می‌شود. سپس توسط روش‌های بهینه‌سازی، نمایه طولی و عرضی بهینه می‌شود و این روند تا رسیدن به مقادیر مطلوب تکرار می‌شود.

## 2- پیشینه تحقیق

سابقه استفاده از کامپوزیت‌های پیشرفته در دهه 1940 در آمریکا و شوروی سابق باز می‌گردد. آن‌ها در رقابتی تنگاتنگ با یکدیگر، موفق به ساخت کامپوزیت پایه پلیمری الیاف بور - رزین اپوکسی برای استفاده در صنعت هوافضا شدند. 20 تا 30 سال پس از آن، کامپوزیت‌های پایه پلیمری به طور گسترده‌ای در صنایع شهری از جمله ساختمان و حمل و نقل بکار برده شد [9]. در پژوهش واسودف<sup>3</sup> و همکاران (2017)، به بهینه‌سازی شکل هندسی یک شناور زیرسطحی پرداخته شده است. این بهینه‌سازی صرفاً از دیدگاه دینامیک سیالات محاسباتی<sup>4</sup> انجام شده است و اثرات چرخش پروانه موتور زیردریایی نیز در نظر گرفته شده است. در این بهینه‌سازی از روش ژنتیک<sup>5</sup> استفاده شده و نمایه طولی زیردریایی به‌صورت پارامتری بهینه‌سازی شده

7 Paz and Munoz  
8 Almeida and Tonacio  
9 Craven  
10 Matbo  
11 Sanatizadeh  
12 Mirzaee and Badri

1 Profile  
2 Pressure hull  
3 Vasudev  
4 Computational Fluid Dynamics (CFD)  
5 Genetic algorithm  
6 Bin Li

در نرم‌افزار انسیس کامپوزیت پری-پست و روند بهینه‌سازی نیز آورده شده است. روند حل مسأله در شکل 1 به صورت نمادین قابل مشاهده است.

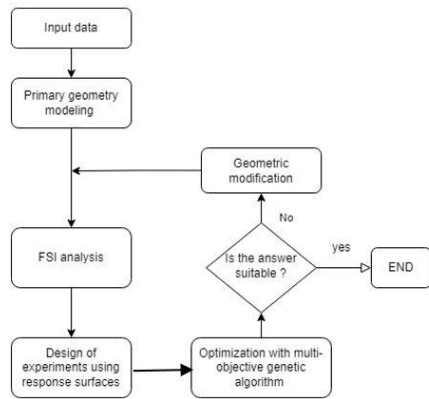


Fig. 1 Problem solving flowchart

شکل 1 روند نامی حل مسأله

3-1- مدل‌سازی هندسه بدنه زیر دریایی

برای مدل‌سازی زیر دریایی نیاز به یک هندسه اولیه است که این هندسه در پژوهشی توسط گروس<sup>3</sup> و همکاران [20] ارائه شده است. این نمایه هندسی بصورت تابع ریاضی برای مقاطع مختلف زیر دریایی نوشته شده است. برای انجام مدل‌سازی ابتدا نقاطی که در این تابع صدق می‌کند محاسبه می‌شوند و سپس توسط نرم‌افزار سالیدورکز<sup>4</sup> مدل‌سازی انجام شده است. در مرحله بعد، مدل سه‌بعدی ایجاد شده به نرم‌افزار انسیس دیزاین مدلر<sup>5</sup> منتقل شده است تا مرز حل دینامیک سیالات محاسباتی ایجاد شود. هندسه زیر دریایی شامل سه قسمت دماغه، بدنه فشار و دم است که تمامی این قسمت‌ها بصورت تابع ارائه شده است. قسمت دم و دماغه زیر دریایی بصورت توابع درجه سه، ارائه شده‌اند. به منظور ترسیم این هندسه در نرم‌افزار مدل‌سازی، ابتدا باید نقاطی که در توابع صدق می‌کند، یافت شوند. به همین منظور با استفاده از نرم‌افزار متلب<sup>6</sup> این نقاط محاسبه و یافت شده است. سپس این نقاط برای انجام مدل‌سازی به نرم‌افزار سالیدورکز منتقل شده‌اند. نقاط ذکر شده در جدول 1 ارائه شده است.

پارامترهای بهینه‌سازی برای برنامه تعریف شده است. همچنین برای مدل‌سازی نیروهای هیدرودینامیکی به روش تجزیه اثرات هر کدام از ملحقات جداگانه در نظر گرفته شده تا در برنامه بهینه‌سازی بتوان بر روی ممان‌های هیدرودینامیکی ملحقات، بهینه‌سازی صورت گیرد [17]. اکبری و همکاران (1400)، شبیه‌سازی و تحلیل هیدرودینامیکی یک شناور نظامی با در نظر گرفتن دو پروانه مخالف چرخنده، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته است. در این تحقیق از فرم بدنه شناور فریگیت DTMB5415 استفاده شده است که در قسمت اول با تغییر دادن زاویه انحنا و جابجایی محل انحنای پاشنه، در چند حالت بهترین شکل پاشنه از نظر هیدرودینامیکی انتخاب شده است [18]. همتی و همکاران (1396)، در این ابتدا به مدل‌سازی و تعیین ممان اینرسی سکوی امیرکبیر پرداخته شده و سپس تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی به همراه مدل موج منطبق بر شرایط غالب در دریای خزر به بررسی تأثیر فرم هندسی سکوی نیمه شناور بر پاسخ سکو پرداخته شده است. در این تحقیق ابتدا چندین پایه با اشکال مختلف و فاصله پایه‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و در انتها بهترین حالت از لحاظ جابجایی و نیروی وارده بر سکوی نیمه شناور به عنوان بهترین حالت گزارش شد [19].

با توجه به پژوهش‌های گذشته، این موضوع قابل مشاهده است که در اکثر پژوهش‌ها تحلیل بر مبنای فشار هیدرواستاتیکی بوده است و فقط بهینه‌سازی در قالب مقطع طولی زیر دریایی و یا پارامترهای دیگر بوده است. نوآوری ارائه شده در مقاله حاضر، تحلیل زیر دریایی تحت فشار هیدرودینامیکی بوده و بهینه‌سازی هم‌زمان هم در مقطع طولی و هم مقطع عرضی انجام گرفته است. در واقع این پژوهش در سه حوزه‌ی مختلف سیالات، جامدات و بهینه‌سازی انجام گرفته است.

3- روش حل مسأله

در شبیه‌سازی عددی پروژه‌ی حاضر، با توجه به این که مقدار جابجایی‌های سازه کوچک است و همچنین به دلیل اینکه در بهینه‌سازی نیاز به تکرار حل برای هندسه‌های مختلف است از روش برهم‌کنش سیال-سازه یک‌طرفه استفاده شده است. در ادامه اقداماتی نظیر مدل‌سازی در چندین محیط مختلف، شبیه‌سازی و روش حل در نرم‌افزار انسیس فلونت<sup>1</sup>، شبیه‌سازی و روش حل

جدول 1 توابع هندسه زیر دریایی

Table 1 Submarine geometry functions

تابع	
$R = R_{MAX} \left\{ 1.126x(0.3x-1)^4 + 0.442x^2(0.3x-1)^3 + 1 - (0.3x-1)^4(1.2x+1) \right\}^{1/2.1}$	دماغه $0 \leq x \leq 1.016$
$R_{MAX} = 0.254m$	
$R = R_{MAX}$	قسمت میانی $1.016 \leq x \leq 3.225$
$R = R_{MAX} \left\{ r_h^2 + r_h k_0 \varepsilon^2 + (20 - 20r_h^2 - 4r_h k_0 - \frac{1}{3}k_1) \varepsilon^3 + (-45 + 45r_h^2 + 6r_h k_0 + k_1) \varepsilon^4 \right. \\ \left. + (36 - 36r_h^2 - 4r_h k_0 - k_1) \varepsilon^5 + (-10 + 10r_h^2 + 4r_h k_0 + \frac{1}{3}k_1) \varepsilon^6 \right\}^{0.5}$	دم (بخش اول) $3.225 \leq x \leq 4.243$
$r_h = 0.1175$	$k_0 = 10$
	$k_1 = 44.6244$
	$\varepsilon = \frac{13.979167 - x}{3.33333}$
$R = 0.1175 R_{MAX} \left[ 1 - (3.2x - 44.73333)^2 \right]^{0.5}$	دم (بخش دوم) $4.243 \leq x \leq 4.356$

4 Solid Works  
5 ANSYS Design Modeler  
6 MATLAB

1 ANSYS Fluent  
2 Ansys Composite PrepPost (ACP)  
3 Groves

مدل‌های  $k-\epsilon$  از آنجا که از فرضیات رینولدز بالا بودن جریان استفاده می‌کنند، برای حل معادلات در نواحی نزدیک دیواره با مشکلات زیادی مواجه می‌شوند. اما مدل  $k-\omega$  را می‌توان برای پیش‌بینی تغییرات متغیرهای آشفتگی<sup>۲</sup> تا لبه دیواره‌های جامد مورد استفاده قرار داد.

### 3-2-1- شرایط مرزی و شبکه‌بندی

برای حل جریان حول این زیردریایی، مرز حل، بصورت یک مکعب مستطیل تعریف شده است. ابعاد این مرز با توجه به استانداردهای موجود و بصورت تجربی تعیین شده است. این مرزها باید به‌گونه‌ای تعیین شود که اثرات حاصل از گردابه‌ها و اغتشاشات جریان را بصورت کامل دربرگیرد و خود باعث بوجود آوردن اغتشاشات نامناسب نشود. فاصله این مرزها در جهت  $x$  از نوک و دم زیردریایی برابر 2 متر و در جهت  $y$  و  $z$  از سطح زیردریایی نیز برابر 2 متر است [23]. البته در استانداردهای موجود، این فاصله‌ها باید در حد 4 برابر قطر رعایت شود. قطر زیردریایی حاضر در بیشترین نقطه برابر 0.5 متر است. شرایط مرزی برای این تحلیل در شکل 4 نشان داده شده است. ضلع سمت چپ به عنوان سرعت ورودی، ضلع سمت راست فشار خروجی، اضلاع بالا و پایین و زیردریایی به عنوان دیوار در نظر گرفته شده‌اند.

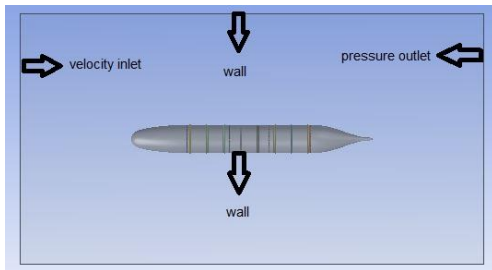


Fig. 4 Submarine Boundary Conditions

شکل 4 شرایط مرزی زیردریایی

برای شرط مرزی ورودی که از نوع سرعت است، با توجه به عدد رینولدز جریان، سرعت به‌صورت زیر محاسبه شده است:

$$Re_L = \frac{\rho u L}{\mu} = 1.2 \times 10^7 \rightarrow u = 2.8 \text{ m/s} \quad (1)$$

که در رابطه بالا  $L$  طول زیردریایی است که برابر با 4.36 متر و با توجه به خصوصیات فیزیکی آب، اعداد زیر قرار داده شده است:

$$\rho = 998.2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}, \mu = 0.001 \frac{\text{Kg}}{\text{m.s}} \quad (2)$$

برای المان‌بندی نیز از نوع مش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. برای المان‌بندی در این تحلیل، از المان‌های هرمی استفاده شده است. این المان‌ها در دیواره‌های مرز حل و سطح زیردریایی بصورت منظم چیده شده‌اند. در المان‌بندی سطوح حل، سایز المان‌ها 0.2 متر و در سطح زیردریایی 0.04 متر است.

### 3-3- شبیه‌سازی و روش حل در کمانش

در این مقاله، برای حل کمانش بدنه زیردریایی، از نرم‌افزار انسیس و از قسمت مقدار ویژه کمانش<sup>۳</sup> استفاده شده است. در این بخش، قسمت‌های مختلف تحلیل توضیح داده خواهد شد.

پس از بدست آوردن نقاط نمایه زیردریایی در قسمت دماغه و دم، این نقاط به نرم‌افزار سالیدورکز منتقل شده‌اند. فواصل طولی این نقاط حدود 3 سانتی‌متر است. این نقاط به وسیله خطی منحنی به هم وصل می‌شود. سپس با چرخش این منحنی حول محور  $x$ ، حجم سه‌بعدی دماغه و دم ایجاد می‌شود. برای ایجاد بدنه فشار، مدل‌سازی بصورت پارامتری انجام شده است. این پارامترها قابلیت تغییر دارند تا بتوانند شرایط مسأله بهینه‌سازی را ارضا نمایند و در بازه تعریف شده تغییر نمایند. همچنین در طول بدنه فشار، 7 رینگ تقویت‌کننده به فاصله 297 mm از هم ایجاد شده است. شعاع خارجی رینگ‌ها 254 mm است که مقطع آن مستطیل با ابعاد  $25 \times 20 \text{ mm}$  در نظر گرفته شده است. وجود این رینگ‌ها باعث افزایش مقاومت زیردریایی نسبت به کمانش می‌شود. در نهایت نمایی کلی از زیردریایی مدل‌سازی شده در شکل 2 قابل مشاهده است. مقطع رینگ‌های تقویت‌کننده در شکل 3 نشان داده شده است.

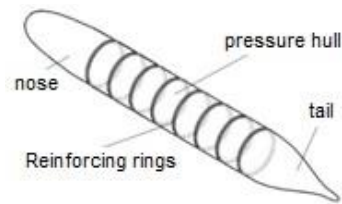


Fig. 2 Isometric view of the submarine

شکل 2 نمای سه‌بعدی زیردریایی

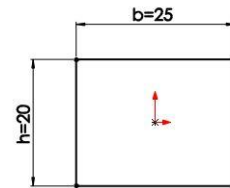


Fig. 3 Section dimensions of reinforcement rings in mm

شکل 3 اندازه مقطع رینگ‌های تقویت‌کننده به میلی‌متر

### 3-2- شبیه‌سازی و روش حل در محیط سیال

هدف این بخش از پژوهش این است که فشارهای اعمالی توسط جریان سیال را که شامل فشار هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی است، محاسبه شود و این میدان فشار برای محاسبه کمانش به قسمت استاتیک سازه منتقل شود. برای محاسبه جواب فشار بر روی بدنه زیردریایی از نرم‌افزار انسیس فلونت استفاده شده است. طول کل این زیردریایی 3.4 متر و بیشترین قطر آن 0.508 متر است. فشار در این قسمت تقریباً 18 مگاپاسکال است که بصورت هیدرواستاتیکی به تمام نقاط زیردریایی اعمال شده است. البته در این فشار، ضریب اطمینان 5.1 در نظر گرفته شده است [21]. زاویه حمله صفر درجه در نظر گرفته شده و عدد رینولدز جریان برابر  $1.2E7$  است [22].

برای حل دینامیک سیالات محاسباتی این جریان، از مدل جریان مغشوش  $k-\omega$  استاندارد استفاده شده است. مدل‌های  $k-\omega$  محبوبیت زیادی دارند زیرا دارای قدرت زیادی در هنگام انترگرال‌گیری از معادلات به سمت دیواره هستند. همچنین مدل  $k-\omega$  نسبت به مدل  $k-\epsilon$  در جریان‌هایی که شامل کاهش سرعت و جدایش ناشی از گرادیان فشار معکوس هستند، بهتر عمل می‌کند. اغلب

3 Eigenvalue Buckling

1 Static Structural  
2 Turbulence

### 1-3-3- فشار اعمالی

فشاری که بر روی قسمت‌های مختلف زیردریایی اعمال می‌شود، نتیجه حل معادلات جریان در نرم‌افزار انسیس فلونت است. پس از حل جریان حول زیردریایی در این نرم‌افزار، فشار موجود بر زیردریایی قابل انتقال به قسمت استاتیک سازه است. این فشار وارد شده از دینامیک سیالات محاسباتی، بصورت میدان فشار است که حاصل جمع برداری فشار عمودی<sup>4</sup> و تنش برشی<sup>5</sup> روی سطح جسم است [24]. در شکل 7 خطوط تراز فشار منتقل شده قابل مشاهده است.

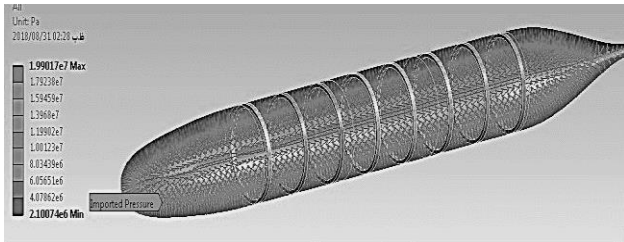


Fig. 7 Pressure contour transmitted (Pa)

شکل 7 کانتور فشار منتقل شده (Pa)

### 4-3- شبیه‌سازی بدنه کامپوزیتی

برای شبیه‌سازی کامپوزیت چندلایه مورد استفاده در بدنه زیردریایی و رینگ‌های تقویت‌کننده، از نرم‌افزار انسیس کامپوزیت پری-پست استفاده شده است. در پژوهش حاضر از مشخصات چندلایه مطرح شده در پژوهش بین‌لی و همکاران استفاده شده است [11]. و در یک بهینه‌سازی اولیه، ضخامت هر لایه از این چندلایه بهینه‌سازی شده است. ضخامت لایه‌ها برابر و از جنس کربن/اپوکسی در نظر گرفته شده است. تعداد لایه‌ها، ضخامت اولیه هر لایه و لایه‌چینی بدنه و رینگ‌های تقویت‌کننده در جدول 2 آمده است.

جدول 2 مشخصات چندلایه

Table 2 laminated composite specifications

تعداد کل لایه‌ها	زاویه لایه‌چینی	ضخامت هر لایه (mm)
10	$[0, 45, 90, -45, 45]_{sym}$	1.8

در این پژوهش از معیار شکست تسای-وو برای مواد کامپوزیت استفاده شده است زیرا در این معیار بین مقاومت فشاری و کششی تمایز قائل می‌شود. این ویژگی تسای-وو باعث شده است تا یکی از متداول‌ترین معیارهای شکست در مواد کامپوزیت باشد. معیار تسای-وو در سه بعد، دارای شش مؤلفه تنش است.

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (3)$$

در این رابطه  $F_i$  و  $F_{ij}$  تانسورهای مقاومت با درجات مختلف بوده و همچنین  $\sigma_4 = \tau_{31}$ ،  $\sigma_5 = \tau_{21}$  و  $\sigma_6 = \tau_{12}$  است. رابطه (1) برای حالت تنش صفحه‌ای با تنش غشایی بصورت زیر است:

$$I_F = F_{11} \sigma_{11}^2 + F_{22} \sigma_{22}^2 + F_{66} \tau_{12}^2 + F_{11} \sigma_{11} + F_{22} \sigma_{22} + 2F_{12} \sigma_{11} \sigma_{22} \quad (4)$$

4 Normal pressure  
5 Shear stress  
6 Tsi-Wu

هندسه مدل‌سازی شده در همه محیط‌ها یکسان است. در المان‌بندی سطح زیردریایی، از المان چهارضلعی هشت‌گه‌ای غیر خطی استفاده شده است که در قسمت میانی بدنه زیردریایی بصورت منظم قرار گرفته شده است. سایز این المان‌ها 0.04 متر در نظر گرفته شده است و تعداد المان‌ها 2530 عدد است. در المان‌بندی رینگ‌های تقویت‌کننده نیز از المان‌های مکعبی هشت نقطه‌ای استفاده شده است. در رینگ‌ها سایز المان‌ها برابر با 0.01 متر است. تعداد المان‌ها برای هر رینگ 930 عدد است. به دلیل حجم زیاد محاسبات و محدودیت‌های سخت‌افزاری از المان مکعبی بجای المان‌های مثلثی استفاده شده است. شکل‌های 5 و 6، المان‌بندی زیردریایی و رینگ‌های تقویت‌کننده را در محیط جامدات نشان می‌دهد.

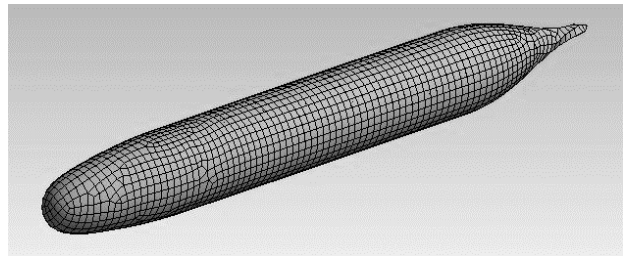


Fig. 5 Submarine mesh

شکل 5 المان‌بندی زیردریایی

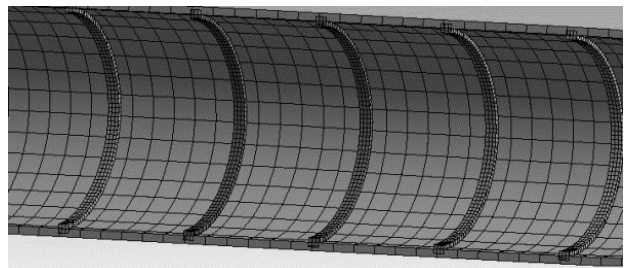
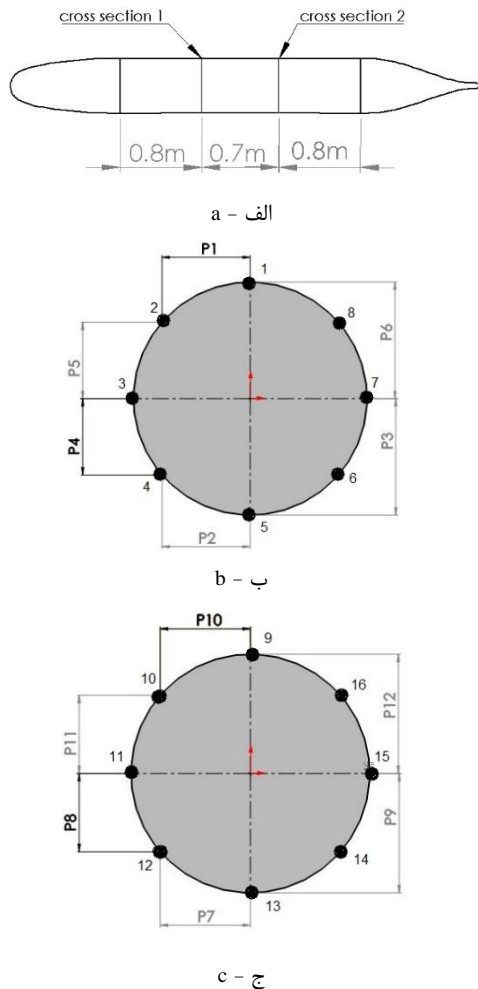


Fig. 6 Reinforcement rings mesh

شکل 6 المان‌بندی رینگ‌های تقویت‌کننده

با اینکه زیردریایی در عمل مانورهای مختلفی را انجام می‌دهد، اما به عنوان یک بررسی متفاوت با تحقیقات قبلی که شرایط فشار هیدروستاتیک را در نظر گرفته بودند و عملاً زیردریایی را در یک عمق مشخص، بصورت ثابت لحاظ نموده بودند، در این تحقیق، یکی از مانورهای حرکتی زیردریایی به صورت حرکت رو به جلو با سرعت ثابت در نظر گرفته می‌شود و از نیروهای ایجاد شده بر اثر ضربه صرف نظر شده است و نتایج با در نظر گرفتن نیروی حاصل از فشار هیدرودینامیکی محاسبه شده است. همانطور که در قسمت نتایج ملاحظه خواهد شد، در نظر گرفتن همین مانور ساده در بحث بهینه‌سازی بدنه زیردریایی، علیرغم تغییرات جزئی در هندسه آن، تأثیر قابل توجهی در عملکرد جامداتی-سیالاتی آن خواهد داشت. بنابراین دو نقطه از زیردریایی انتخاب شده است که یک نقطه در قسمت ابتدایی و نقطه دیگر در انتهای زیردریایی قرار دارد. حرکت نقطه ابتدای زیردریایی در همه جهات گرفته شده و از قید تکیه‌گاه ثابت<sup>1</sup> استفاده شده است. حرکت نقطه‌ای انتهای زیردریایی نیز با استفاده از قید جابجایی<sup>2</sup> در جهات Y و Z گرفته شده است. با توجه به این شرایط مرزی و حرکت رو به جلو، زیردریایی تحت فشار هیدرودینامیک قرار دارد.

1 Fixed Support  
2 Displacement  
3 Imported pressure



**Fig. 8** (a) Location of cross sections (b) Design variables in cross – section 1 (c) Design variables in cross section 2

شکل 8 الف) محل قرارگیری مقاطع عرضی، ب) متغیرهای طراحی در مقطع عرضی 1، ج) متغیرهای طراحی در مقطع عرضی 2

همچنین قیود اعمالی در این مسأله بهینه‌سازی عبارت‌اند از: ضریب بار کمانش و ضریب اطمینان عدد معیار آسیب. ضریب بار کمانش از حل کمانش بدنه زیردریایی تحت بار هیدرودینامیکی بدست می‌آید. ضریب اطمینان عدد معیار آسیب نیز با استفاده از معیار تسای-وو که برای قسمت کامپوزیتی زیردریایی محاسبه می‌شود، بدست می‌آید.

#### 4- اعتبارسنجی حل

##### 1-4- اعتبارسنجی نتایج حاصل از حل دینامیک سیالات محاسباتی

برای اعتبارسنجی مقاله حاضر، از نتایج مطرح شده در پژوهشی که کیم<sup>6</sup> و همکاران [22] ارائه داده‌اند استفاده شده است. در این مقاله ضریب فشار زیردریایی بصورت تجربی در یک تونل باد اندازه‌گیری شده است و همچنین با استفاده از حل دینامیک سیالات این نتایج اعتبارسنجی شده است. زیردریایی بررسی شده در این تونل باد، کاملاً از نظر هندسی مشابه زیردریایی در مقاله حاضر است. در شکل 9 نتایج حاصل از حل دینامیک سیالات محاسباتی قابل مشاهده است.

که پارامترهای مقاومت به شکل زیر هستند:

$$F_{11} = \frac{1}{X_t X_c} \quad F_{22} = \frac{1}{Y_t Y_c} \quad F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \quad F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{F_{11} F_{22}} \quad F_{66} = \frac{1}{S^2} \quad (5)$$

شکست زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار IF به 1 برسد و از آن تجاوز کند.

#### 3-5- بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ<sup>1</sup> استفاده شده است. این روش شامل یک طراحی آزمایش<sup>2</sup> است که به وسیله یک روش، نقاط طراحی انتخاب می‌شود که در این پژوهش از روش طراحی مرکب مرکزی<sup>3</sup> استفاده شده است. سپس جواب مسأله در این نقاط محاسبه می‌شود و از جواب‌ها یک رویه گذرانده می‌شود. این رویه‌ی حاصل از جواب‌ها، سطح پاسخ<sup>4</sup> نامیده می‌شود. پس از ایجاد این سطح، به وسیله روش‌های بهینه‌سازی مانند روش ژنتیک<sup>5</sup>، نقاط بهینه‌ی این سطح پیدا شده و جواب بهینه مسأله محاسبه می‌شود. سپس پاسخ واقعی نقاط حاصل از بهینه‌سازی محاسبه می‌گردد.

در مقاله حاضر، دو مرتبه بهینه‌سازی انجام شده است. در بهینه‌سازی اولیه، فقط ضخامت لایه‌ها به عنوان متغیر طراحی انتخاب شده تا بتوان به چندلایه کامپوزیتی مطلوب رسید. در بهینه‌سازی کلی، هندسه‌ی زیردریایی، بهینه‌سازی می‌شود. در هر مقطع 8 نقطه فرض شده است. هر یک از دونقطه‌ی زیر با یکدیگر قرینه هستند:

$$(1,5), (2,8), (3,7), (4,6), (9,13), (10,16), (11,15), (12,14)$$

با توجه به قرینه بودن نقاط ذکر شده و اینکه نقاط (1,5,9,13) دارای عرض صفر و نقاط (3,7,11,15) دارای طول صفر است، از 16 متغیر طول و عرض نقاط فرض شده، تعداد این متغیرها در هر مقطع عرضی 6 عدد می‌شود و با توجه به اینکه 2 مقطع عرضی در نظر گرفته شده است، در مجموع 12 متغیر وجود دارد. در شکل 8 محل قرارگیری مقاطع و متغیرهای طراحی در مقطع عرضی زیردریایی نشان داده شده است.

این متغیرها نقطاتی هستند که به وسیله یک اسپلاین به هم متصل شده‌اند و در دو مقطع از بدنه زیردریایی به فاصله 0.7 متر از هم وجود دارند. این مقاطع عرضی نیز به وسیله یک اسپلاین به هم متصل شده‌اند که در صورت تغییر هندسه این مقاطع عرضی، مقطع طولی نیز تغییر خواهد داشت. پس هم مقطع عرضی و هم مقطع طولی بهینه‌سازی می‌شوند. این نقاط در هر دو مقطع عرضی در نظر گرفته شده یکسان هستند. این متغیرها در توزیع فشار روی بدنه و در نتیجه در بار کمانش و ضریب اطمینان استحکامی تأثیر گذارند و لذا به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین جهت انجام فرایند بهینه‌سازی، برای هر کدام از متغیرهای طراحی به منظور طراحی آزمایش، حدود پایین و بالا در نظر تعریف شده است که در جدول 8 قابل مشاهده است. همچنین 263 حالت برای طراحی آزمایش با استفاده از روش فول فاکتوریل بدست آمده که با توجه به تعداد زیاد حالت‌ها، از ذکر جزئیات جدول طراحی آزمایش صرف نظر شده است.

4 Response Surfaces  
5 Genetic Algorithm  
6 Kim

1 Response Surface Optimization  
2 Design of Experiment  
3 Central Composite Design

جدول 4 خطای محاسبه کمانش

Table 4 Buckling error

خطا (%)	ضریب بار کمانش تجربی	ضریب بار کمانش محاسبه شده
3.4	0.6	0.62

3-4- استقلال حل از شبکه

برای اینکه تحلیل از دقت خوبی برخوردار باشد، باید اندازه المان‌ها به حدی باشد که در صورت کوچک‌تر کردن آن‌ها، دقت حل بیشتر نشود. به همین منظور در نمودار زیر ضریب پسا با توجه به اندازه المان‌ها رسم شده است. با توجه به نمودار مشخص شده است که در صورتی که اندازه المان‌ها کمتر از 0.04 متر شود، ضریب پسا ثابت خواهد ماند.

5- نتایج

1-5- نتایج حاصل از حل دینامیک سیالات محاسباتی

فشار محاسبه شده روی زیردریایی بصورت کانتور در شکل زیر ارائه شده است. این فشار همان فشاری است که برای تحلیل کمانش استفاده می‌شود. در قسمت میانی زیردریایی فشار کمتر از 20 مگاپاسکال است، زیرا در این قسمت -ها به دلیل ایجاد جدایش جریان، گرادیان فشار منفی وجود دارد. فشار هیدرودینامیکی با توجه به اینکه زیردریایی مورد مطالعه، تحقیقاتی بوده و ابعاد و همچنین سرعت کمی دارد، کم است ولی اگر شناور مورد مطالعه دارای سرعت زیادی باشد، این فشار هم به تناسب بیشتر خواهد شد. در شکل 12 بردار سرعت حول زیردریایی آورده شده است.

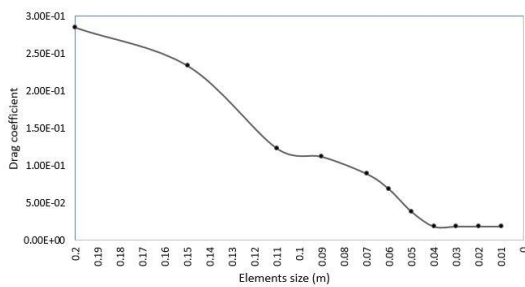


Fig. 10 Drag coefficient diagram by element size

شکل 10 نمودار ضریب پسا بر حسب اندازه المان

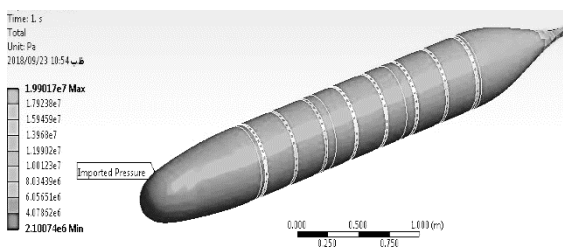


Fig. 11 Calculated pressure on submarine

شکل 11 فشار محاسبه شده بر روی زیردریایی

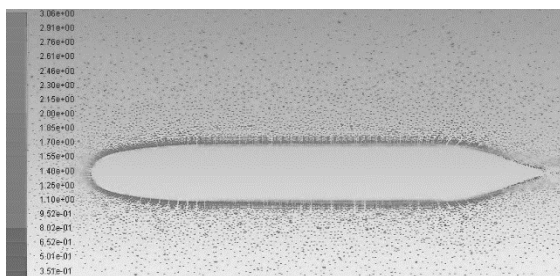
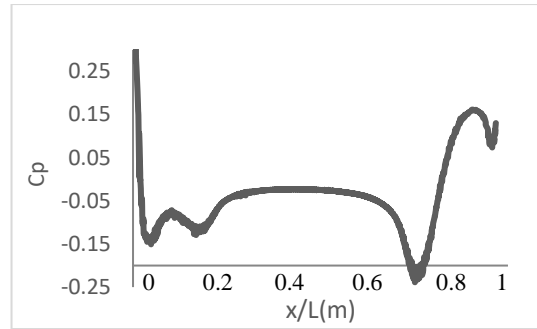
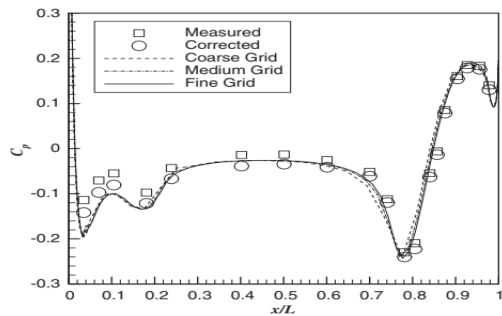


Fig. 12 Velocity vector around submarine (m/s)

شکل 12 بردار سرعت حول زیردریایی (m/s)



a - الف



b - ب

Fig. 9 (a) CP diagram resulting from submarine CFD solving that studied in this research (b) CP chart from experimental results [20]

شکل 9 الف) نمودار  $C_p$  حاصل از حل جریان روی زیردریایی مورد مطالعه در این پژوهش ب) نمودار  $C_p$  حاصل از نتایج آزمایشگاهی [22]

در شکل 9 الف) مشاهده می‌شود که مقادیر محاسبه شده با مقادیر موجود در شکل 9 ب) همپوشانی مطلوبی دارد. در جدول 3 خطای  $C_p$  در سه نقطه محاسبه شده است.

جدول 3 خطای محاسبه  $C_p$

Table 3 CP Calculation Error

مکان (m)	مقدار محاسبه دینامیک سیالات محاسباتی	مقدار محاسبه تجربی	خطا (%)
X=0.78	-0.119	-0.115	3.4
X=2.178	-0.023	-0.021	8.6
X=4	0.154	0.160	12.5

با توجه به مقدار خطاهای موجود در جدول 3، روش محاسبه و همچنین اندازه المان‌ها در محاسبات دینامیک سیالات محاسباتی مناسب بوده است.

2-4- اعتبارسنجی حل کمانش

با توجه به نتایج موجود در مرجع [25] که کمانش یک پوسته استوانه‌ای را که تحت فشار هیدرواستاتیکی است مورد بررسی قرار داده است، با استفاده از نرم‌افزار مقدار ویژه کمانش، کمانش این پوسته تحلیل شده است. این پوسته دارای 24 لایه است که در مجموع ضخامت پوسته 2.52 میلی‌متر می‌شود. با توجه به روش حل اتخاذ شده، تحلیل کمانش این پوسته انجام شده و نتایج با داده‌های تجربی موجود در مرجع [25] مقایسه شده است. طبق محاسبه انجام شده برای کمانش این پوسته، ضریب بار کمانش بدست آمده 0.621 است. در جدول 4، خطای محاسبه نسبت به مقدار تجربی آمده است. با توجه به این مقدار روش تحلیل در این پژوهش صحیح است و نتایج حاصله از اعتبار برخوردارند.

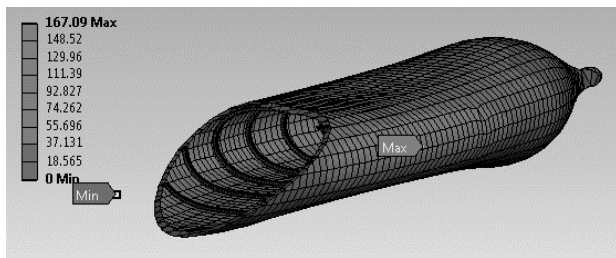


Fig. 13 First Mode of buckling with steel pressure hull

شکل 13 مود اول کمانش با بدنه فشار فولادی

2-2-5- نتایج کمانش زیردریایی کامپوزیتی قبل از بهینه شدن ضخامت بدنه فشار این زیردریایی و رینگ‌های تقویت‌کننده از جنس کربن/اپوکسی هستند و ضخامت هرلایه 1.8 میلی‌متر است. لایه‌چینی نیز بصورت  $[0,45,90,-45,45]_{sym}$  است. ضریب اطمینان به دست آمده در این تحلیل که با استفاده از معیار تسای-وو محاسبه شده برابر 0.9 است. ضریب بار کمانش خطی محاسبه شده برای مود اول 0.52 است. با توجه به اینکه ضریب اطمینان کوچک‌تر از 1 است، زیردریایی قبل از کمانش تسلیم می‌شود. با توجه به این نتایج، باید ضخامت مورد بهینه‌سازی قرار گیرد که در قسمت‌های بعدی نتایج ارائه خواهد شد. در جدول 6 خواص مکانیکی کربن/اپوکسی ارائه شده است.

جدول 6 خواص مکانیکی کربن/اپوکسی [24]

Table 6 Mechanical properties of carbon/epoxy [24]

واحد	مقدار	نماد	خاصیت
mm	0.105	t	ضخامت
GPa	162	E11	
GPa	9.6	E22	مدول الاستیک
GPa	9.6	E33	
-	0.298	$U_{12}$	
-	0.298	$U_{13}$	ضریب پواسون
-	0.47	$U_{23}$	
GPa	6.1	G12	
GPa	6.1	G13	مدول برشی
GPa	3.5	G23	

2-3- نتایج کمانش زیردریایی کامپوزیتی پس از بهینه شدن ضخامت پس از اینکه ضخامت بهینه شد، مقدار بهینه ضخامت برابر 2.17 میلی‌متر است. این ضخامت به عنوان ضخامت اصلی برای تحلیل کمانش برای انجام بهینه‌سازی هندسی بدنه زیردریایی قرار داده شد. ضریب اطمینان محاسبه شده با استفاده از معیار تسای-وو برابر با 1.11 است. با توجه به اینکه این عدد بزرگ‌تر از 1 است، شکست اتفاق نمی‌افتد. در شکل 14 ضریب اطمینان لایه 8م قسمت کامپوزیتی قابل مشاهده است.

## 2- نتایج حاصل از حل کمانش

### 2-1- نتایج کمانش زیردریایی قبل از کامپوزیتی شدن بدنه فشار

طبق نتایج بدست آمده از تحلیل، ضریب اطمینان شکست با استفاده از معیار فون مایز نسبت به تنش نهایی برابر با 5 است. این عدد نشان دهنده این است که این زیردریایی با جنس فولاد مقاومت بالایی در مقابل شکست دارد و با توجه به ضریب اطمینان یک و نیم برابری که در هنگام بارگذاری اعمال شده است، در اعماق بیشتری از سطح دریا قابلیت حرکت دارد. ضریب کمانش محاسبه شده برابر با 1.1425 است. در جدول 5 خواص مکانیکی فولاد قابل مشاهده است.

جدول 5 خواص مکانیکی فولاد

Table 5 Mechanical properties of steel

واحد	مقدار	خاصیت
$Kg/m^3$	7850	چگالی
GPa	200	مدول الاستیک
-	0.3	ضریب پواسون
GPa	76.9	مدول برشی
MPa	250	استحکام تسلیم
MPa	450	استحکام نهایی

نتایج بدست آمده با در نظر گرفتن اثرات تغییر شکل‌های بزرگ (large deflection) در تحلیل استاتیکی می‌باشد که به وسیله تحلیل کمانش غیرخطی محاسبه شده است. لذا برای محاسبه فشار بحرانی برای کمانش غیرخطی از فرمول 6 استفاده می‌شود:

$$P_{cr} = P_{static} + \lambda P_{buckling} \quad (6)$$

در رابطه بالا،  $P_{static}$  فشار اعمال شده در بخش Static Structural نرم-افزار و  $P_{buckling}$  فشار اعمال شده در بخش Eigenvalue Buckling نرم‌افزار است. به دلیل اینکه هر دو فشار یکسان است و عملاً با هم فرقی نمی‌کنند، پس رابطه بالا به شکل زیر قابل تغییر است:

$$P_{cr} = (1 + \lambda)P \quad (7)$$

در نتیجه برای ضریب بار کمانش محاسبه شده داریم :

$$P_{cr} = (1 + 1.1425)P = 2.1425P \quad (8)$$

در این تحلیل چون فشار اعمال شده در سرتاسر زیردریایی یکسان نیست، فشار بحرانی کمانش نیز عدد یکسانی نخواهد بود. به عنوان مثال در نقطه‌ای که فشار اعمالی بیشینه است، فشار بحرانی کمانش به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{MAX} = 19.85 \text{ MPa}, \quad (9)$$

$$P_{CR} = 2.1425 \times 19.85 = 42.53 \text{ MPa} \quad (10)$$

که این عدد 17٪ استحکام تسلیم فولاد است. در شکل 12 برشی از بدنه زیردریایی که نشان دهنده مود اول کمانش است قابل مشاهده است.



جدول 7 مسأله بهینه‌سازی ضخامت هر لایه از کامپوزیت

Table 7 Optimizing the thickness of each layer of the composite

هدف بهینه‌سازی	پارامتر طراحی	قیود بهینه‌سازی
کمینه <sup>۱</sup> کردن وزن	ضخامت هر لایه از کامپوزیت	1 > ضریب اطمینان 0 > ضریب بار کمانش

با توجه به اینکه متغیر طراحی در این مسأله یک پارامتر است، در مجموع 5 حالت در طراحی آزمایش انتخاب شده است. بازه‌ی تغییرات ضخامت بین 1.75 تا 3 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای هر کدام از این 5 حالت، ضریب بار کمانش و ضریب اطمینان محاسبه شده و با استفاده از این جواب‌ها یک سطح پاسخ تشکیل می‌شود. در نهایت با توجه به نقاط بدست آمده و شرایط مسأله بهینه‌سازی، بهینه‌سازی به روش ژنتیک انجام شده و نقاط داوطلب<sup>۲</sup> از بین نقاط موجود در سطح پاسخ، محاسبه شده است. با توجه به اینکه هرچه ضخامت افزایش پیدا کند، ضریب بار کمانش و ضریب اطمینان نیز افزایش پیدا خواهد کرد، و با توجه به اینکه وزن به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است و سعی بر کمینه کردن وزن است، اولین نقطه‌ای که قیود را ارضا کند به عنوان نقطه‌ی بهینه انتخاب می‌شود. اولین نقطه‌ای که این شرایط را داراست نقطه 2.17 است. سپس کمانش قسمت کامپوزیتی با ضخامت 2.17 میلی‌متر محاسبه شد. نتایج در جدول 8 ارائه شده است.

جدول 8 کمانش قسمت کامپوزیتی با ضخامت 2.17 میلی‌متر

Table 8 Buckling of the composite part with a thickness of 2.17mm

ضخامت	ضریب اطمینان	ضریب بار
2.17 mm	1.11	0.96

5-3-2- نتایج بهینه‌سازی هندسی بدنه زیردریایی

برای بهینه‌سازی هندسی بدنه‌ی زیردریایی، 12 متغیر طراحی هندسی در نظر گرفته شده است. در این مسأله بهینه‌سازی وزن و نیروی پسا به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند که هر کدام از آن‌ها باید به مقدار کمینه خود برسند. در اولین اقدام طراحی آزمایش به وسیله روش ذکر شده در بخش قبل انجام شد. به دلیل وجود متغیرهای متعدد طراحی، 283 حالت برای طراحی آزمایش ایجاد شد و پس از حل، وزن، ضریب اطمینان، ضریب بار کمانش و نیروی پسا برای هر حالت محاسبه شد. از این اعداد محاسبه شده رویه‌ای تحت عنوان سطح پاسخ تشکیل و با استفاده از روش ژنتیک چند هدفه، پاسخ بهینه محاسبه می‌شود. این محاسبات با استفاده از مقادیر پیش فرض پارامترها که در محیط نرم‌افزاری لحاظ شده اجرا گردیده است و برای حل این مسأله، نیازی به تغییر آنها نبود. تغییر هر کدام از پارامترهای هندسی در بدنه زیردریایی، باعث به وجود آمدن تغییرات در ضریب اطمینان و ضریب کمانش می‌شود.

نقاط داوطلب پنج عدد در نظر گرفته شده است. از بین این نقاط، نقطه‌ای که بهترین شرایط را داراست انتخاب شده است. با توجه به اعداد موجود، نقطه‌ی شماره 2 به عنوان نقطه بهینه انتخاب شد. زیرا نسبت به نقاط دیگر، نیروی پسا کمتری را داراست. در جدول 9 مقایسه بین هندسه بهینه و هندسه اولیه زیردریایی قابل مشاهده است.

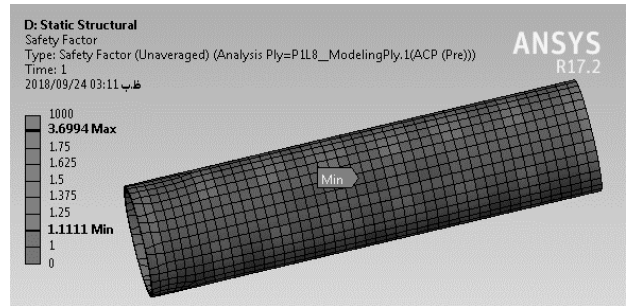


Fig. 14 Safety factor of the 8th layer of the composite part of the submarine

شکل 14 ضریب اطمینان لایه 8ام قسمت کامپوزیتی بدنه زیردریایی

در شکل 14 مشاهده می‌شود که با توجه به کانتور، اکثر نقاط دارای ضریب اطمینانی بالاتر از 1.11 و در حدود 1.375 و بالاتر قرار دارد. نقطه‌ای که دارای ضریب اطمینان 1.11 است در لایه 8 ام قرار دارد که کانتور ضریب اطمینان این لایه در شکل قابل مشاهده است.

ضریب بار کمانش خطی مود اول برابر 0.9496 است. با توجه به اینکه ضریب بار بحرانی برابر است با  $\lambda + 1$ ، کمانش اتفاق نمی‌افتد. با توجه به ضریب بار کمانش در مود اول، بار بحرانی کمانش بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{cr} = (1 + 0.9496)P = 1.9496P \quad (11)$$

مشابه قبل، در این تحلیل نیز چون فشار اعمال شده در سرتاسر زیردریایی یکسان نیست، فشار بحرانی کمانش نیز عدد یکسانی نخواهد بود. به عنوان مثال در نقطه‌ای که فشار اعمالی بیشینه است، فشار بحرانی کمانش به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{MAX} = 19.85 \text{ MPa}, \quad (12)$$

$$P_{cr} = 1.9496 \times 19.85 = 38.70 \text{ MPa} \quad (13)$$

با توجه به مقادیر بدست آمده زیردریایی دچار کمانش نخواهد شد. در شکل 15 مود اول کمانش نشان داده شده است.

5-3-3- نتایج بهینه‌سازی

5-3-1- نتایج بهینه‌سازی ضخامت لایه کامپوزیتی

پس از حل دینامیک سیالات محاسباتی و انتقال میدان فشار به قسمت جامدات نوبت حل مسأله بهینه‌سازی فرا می‌رسد. در جدول 7 خلاصه مسأله بهینه‌سازی قابل مشاهده است.

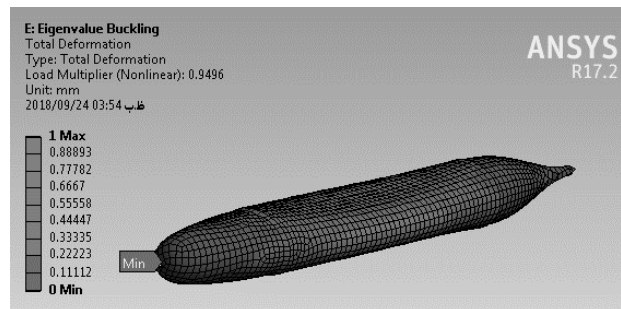


Fig. 15 First mode of submarine buckling with optimized composite pressure hull

شکل 15 مود اول کمانش زیردریایی با بدنه فشار بهینه شده کامپوزیتی

در شکل 16 (ب-ب) مشخص است که قسمت میانی زیردریایی، باریک‌تر شده است و مقطع زیردریایی به شکلی شبیه به بیضی تبدیل شده است. در شکل 17 نیز مقاطع عرضی بهینه‌سازی شده قابل مشاهده است.

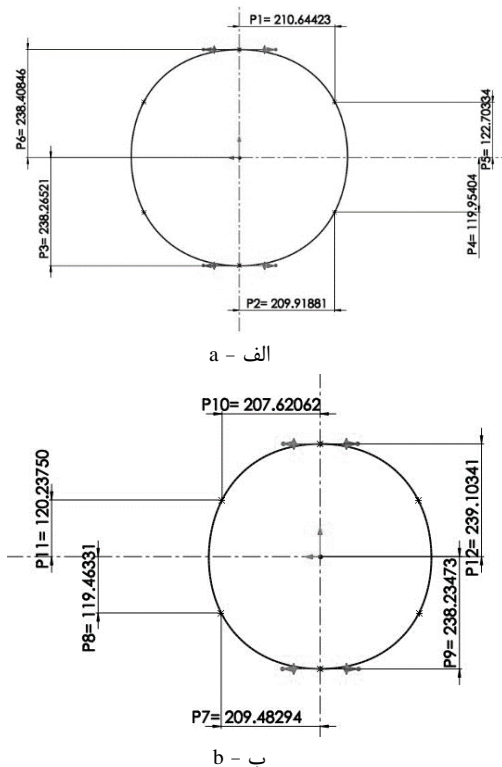


Fig. 17 (a) Cross section 1 (b) Cross section 2 (dimensions in mm)

شکل 17 الف) مقطع عرضی 1، ب) مقطع عرضی 2 (اندازه‌ها به میلی‌متر هستند)

همانطور که در شکل 17 قابل مشاهده است، مقاطع عرضی دایروی پس از بهینه‌سازی تقریباً شبیه به بیضی شده است. با توجه به نتایج ارائه شده، بهینه‌سازی هندسی بدنه زیردریایی هم در مقطع عرضی و هم در مقطع طولی انجام شده است.

#### 6- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر سعی بر این بوده است تا هندسه بدنه یک زیردریایی تحت فشار هیدرودینامیکی و با نگاه به استحکام سازه، بهینه‌سازی شود.

با توجه به نتایج بدست آمده، با بهینه‌سازی هندسه، بدنه‌ی زیردریایی دچار تغییراتی شد که باعث شد وزن آن 5.35٪ و نیروی پسا وارده بر آن 10.1٪ کاهش پیدا کند و نمایه هندسه نمایه هندسه زیردریایی هم در مقطع طولی و هم در مقطع عرضی بهینه‌سازی شود. این کاهش وزن و نیروی پسا برای زیردریایی گامی ابتدایی و مؤثر در راستای افزایش مانورپذیری و کارایی بیشتر آن به حساب می‌آید. در این پژوهش یک مانور حرکتی ساده زیردریایی در نظر گرفته شد و توصیه می‌شود دیگر مانورهای زیردریایی در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج بدست آمده در این مقاله همچنین این موضوع را روشن کرد که در طراحی و ساخت زیردریایی می‌توان بجای مقاطع دایروی از اشکال هندسی دیگر مانند بیضی و یا شکل‌های هذلولوی بهره گرفت. در این مقاله با انجام بهینه‌سازی، امکان استفاده از مواد کامپوزیتی برای قسمتی از بدنه فراهم شد که نقش بسزایی در کاهش وزن بیشتر زیردریایی ایفا کرد.

جدول 9 مقایسه هندسه بهینه و اولیه

Table 9 Comparison of optimal and basic geometry

تغییر %	هندسه بهینه	هندسه اولیه	
5.35	132.5	140	وزن (Kg)
10.1	326	359	نیروی پسا (N)
1	1.09	1.11	ضریب اطمینان
30	0.6624	0.9496	ضریب بار کمانش

با توجه به جدول 9 کاهش ضریب بار کمانش و ضریب اطمینان دارای توجیه است. زیرا با کاهش وزن و تغییر هندسه به حد بهینه خود سازه ضعیف‌تر شده و وضعیت بهینه و مقادیر مرزی نزدیک شده است. همچنین تغییرات وزن و نیروی پسا مطلوب بوده و با کاهش مناسبی همراه بوده است. نیروی پسا محاسبه شده جمع نیروی پسا بر اثر ویسکوزیته و فشار می‌باشد که مقدار آن به ترتیب برابر است با 149 و 177 نیوتون. مشخصات هندسی نقطه بهینه در جدول 10 به شرح زیر است:

جدول 10 مشخصات هندسی نقاط اولیه و بهینه

Table 10 Geometrical specifications of primary and optimal points

پارامتر	اندازه بهینه (mm)	اندازه اولیه (mm)	حد بالا (mm)	حد پایین (mm)
P12	239.1	254	264	244
P11	120.2	127	137	117
P10	207.6	219.8	230	210
P9	238.2	254	264	244
P8	119.5	127	137	117
P7	209.5	219.8	230	210
P6	238.5	254	264	244
P5	122.7	127	117	137
P4	119.9	127	117	137
P3	238.2	254	264	244
P2	209.9	219.8	230	210
P1	210.6	219.8	230	210

همانطور که در جدول 10 ملاحظه می‌شود، اندازه پارامترهای طراحی نسبت به مقادیر ابتدایی تغییر اندکی داشته‌اند اما همین تغییر اندک باعث بهبود ضریب کمانش و نیروی پسا و همچنین کاهش وزن شده است. در شکل 16 هندسه‌ی زیردریایی قبل و بعد از بهینه شدن قابل مشاهده است.

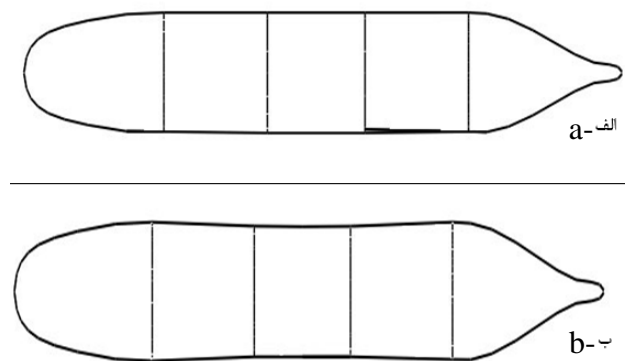


Fig. 16 (a) Primary Geometry (b) Optimized Geometry

شکل 16 الف) هندسه اولیه، ب) هندسه بهینه

## 7- مراجع

- Industry, Tehran, Faculty of Civil Engineering, Tarbiat Dabir Shahid Rajaei University., 2015.
- [17] Mirzaee, D., Badri, M., "Dynamic optimization of the submarine hull and its accessories using genetic algorithm," In Persian, 15th Marine Industry Conference, 2015.
- [18] Akbari, K., Bardideh, H., "Numerical hydrodynamic analysis of military float with double parallel propeller and heel shape effect," In Persian, Engineering of high-speed vessels, Vol. 20, No. 58, pp. 3-9, 2021.
- [19] Hemmati, M., Kazemi, S., "Optimizing the geometric form of a semi-floating platform by numerical method," In Persian, 19th Marine Industry Conference, 2017.
- [20] Groves, N.C., Huang, T.T. and Chang, M.S., "Geometric characteristics of DARPA suboff models," Dtrc/Shd-1298-01, pp. 82, 1989.
- [21] Gao, T., Wang, Y., Pang, Y. and Cao, J., "Hull shape optimization for autonomous underwater vehicles using CFD," Engineering applications of computational fluid mechanics, Vol. 10, No. 1, pp. 599-607, 2016.
- [22] Kim, J., Park, I. and Van, S., "RANS computations of hydrodynamic forces and moments acting on a submarine," the 6th international conference on hydrodynamics, pp. 83-88, 2004.
- [23] Vasudev, K.L., Sharma, R. and Bhattacharyya, S.K., "Shape optimisation of an AUV with ducted propeller using GA integrated with CFD," Ships and Offshore Structures, Vol. 13, No. 2, pp. 194-207, 2018.
- [24] Hur, S.H., Son, H.J., Kweon, J.H. and Choi, J.H., "Post buckling of composite cylinders under external hydrostatic pressure," Composite Structures, Vol. 86, No. 1-3, pp. 114-124, 2008.
- [25] "History of submarines," In Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=History\\_of\\_submarines&oldid=1085644730](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=History_of_submarines&oldid=1085644730), available in January 18, 2019.
- [1] Aras, M. and Basar, F., "Analysis Movement of Unmanned Underwater Vehicle using the Inertial Measurement Unit," International Journal of Emerging Science and Engineering (IJESE), Vol. 1, No. 10, pp. 47-53, 2013.
- [2] Herman, H. E., "Electrostatic sensing for underwater object detection and localization," PhD thesis, UCLA, USA, 2013.
- [3] Taylor, L., Pankajakshan, R., Jiang, M., Sheng, C., Briley, W., Whitfield, D., Davoudzadeh, F., Boger, D., Gibeling, H. and Gorski, J., "Large-scale simulations for maneuvering submarines and propulsors," In 29th AIAA, Plasmadynamics and Lasers Conference, pp. 2930, 1998.
- [4] Blachut, J. and Smith, P., "Buckling of multi-segment underwater pressure hull," Ocean Engineering, Vol. 35, No. 2, pp. 247-260, 2008.
- [5] de Almeida, F.S., "Optimization of laminated composite structures using harmony search algorithm," Composite Structures, Vol. 221, pp. 110852, 2019.
- [6] Tianfeng, Z. and Xianhong, F., "Upheaval buckling solution for submarine pipelines by segmented ditching and hot water flushing," Ocean Engineering, Vol. 102, pp. 129-135, 2015.
- [7] Valentinis, F. and Woolsey, C., "Nonlinear control of a subscale submarine in emergency ascent," Ocean Engineering, Vol. 171, pp. 646-662, 2019.
- [8] Xu, Z., Hu, Z., Zhao, L., Zhang, Y., Yang, Z., Hu, S. and Li, Y., "Application of temperature field modeling in monitoring of optic-electric composite submarine cable with insulation degradation," Measurement, Vol. 133, pp. 479-494, 2019.
- [9] Mouritz, A.P., Gellert, E., Burchill, P. and Challis, K., "Review of advanced composite structures for naval ships and submarines," Composite Structures, Vol. 53, No. 1, pp.21-42, 2001.
- [10] Vasudev, K.L., Sharma, R. and Bhattacharyya, S.K., "Shape optimisation of an AUV with ducted propeller using GA integrated with CFD," Ships Offshore Struct, Vol. 13, No. 2, pp. 194-207, 2018.
- [11] Li, B., Pang, Y.J., Cheng, Y.X. and Zhu, X.M., "Collaborative optimization for ring-stiffened composite pressure hull of underwater vehicle based on lamination parameters," International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 9, No. 4, pp. 373-381, 2017.
- [12] Paz, J.D.M. and Muñoz, O.D.T., "Multiobjective Optimization of a Submarine Hull Design," Ship Science & Technology, Vol. 7, No. 14, pp. 27-42, 2017.
- [13] de Almeida, T.L. and Tonacio, V.C., "Passenger Submarine Concept Design for Oil Production Offshore Systems," Ship Science and Technology, Vol. 4, No. 8, pp. 9-23, 2011.
- [14] Craven, R., Graham, D. and Dalzel-Job, J., "Conceptual design of a composite pressure hull," Ocean Engineering, Vol. 128, pp. 153-162, 2016.
- [15] Matbo, F. and Zare, H., "Numerical and experimental study of hydrodynamic forces on a submarine," In Persian, The First International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, Tehran, Baqer al-Uloom Research Organization (AS), 2015.
- [16] Sanatizadeh, M., Rasoulan, E., "Buckling analysis of cylindrical composite shells with elliptical cross section under the effect of partial loads by finite strip method," In Persian, The First National Conference on the Application of Composites in the Construction