

## ارزیابی توانمندی روش شبکه متحرک برای تحلیل هیدرودینامیکی شناور پروازی تک پله‌ای

عباس دشتی منش<sup>۱</sup>، رضا خسروانی<sup>۲</sup>، احمد رضا کهنسال<sup>۳</sup>

a.dashtimanesh@pgu.ac.ir

- ۱- استادیار مهندسی دریا، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر  
 ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی دریا، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر  
 ۳- استادیار مهندسی دریا، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

### چکیده

بکارگیری پله در کف بدنه شناورهای تندرو پروازی می‌تواند منجر به کاهش مقاومت شود. علاوه بر این، با استفاده از پله، کارایی بدنه‌های پروازی در آب مواج بهبود خواهد یافت زیرا نیروی لیفت در سرتاسر کف بدنه توزیع شده که می‌تواند منجر به پایداری پورپویزینگ در امواج گردد. در این مقاله، جریان سیال سه بعدی اطراف بدنه پله دار شبیه‌سازی می‌شود. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود در ترکیب روش حجم سیال حل می‌شوند. همچنین، در شبیه‌سازی ارائه شده، بدنه دارای دو درجه آزادی سینکیج و تریم دینامیکی می‌باشد. بنابراین، یک حلگر اندرکنش دینامیکی جسم و سیال بر اساس روش مش مورفینگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در طی فرایند حل عددی دامنه محاسباتی ثابت می‌ماند و شبکه‌بندی اطراف بدنه شروع به جابجایی می‌کند. نتایج بدست آمده برای مقاومت، سینکیج و تریم دینامیکی، طول خیس چاین و طول خیس کیل بدنه پله‌دار در سرعت‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه و اعتبارسنجی شده‌اند. همچنین، راجع به طول خشک پس از پله و تغییرات زاویه خط اسپری در سرعت‌های مختلف بحث شده است. نتایج بدست آمده بیانگر آن است که مدل عددی ارائه شده را می‌توان برای طراحی بهینه شناورهای پروازی پله‌دار مورد استفاده قرار داد.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی عددی، شناور پروازی یک پله، آب آرام، مش متحرک.

۹۵/۰۸/۲۷

تاریخ دریافت مقاله:

۹۶/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله:

## ۱- مقدمه

یکی از پارامترهای مؤثر در بهبود کارایی شناورهای پروازی استفاده از یک یا چند ناپیوستگی عرضی در کف بدنه است که پله نامیده می‌شوند. اگر پله دارای اندازه مناسب باشد و در موقعیت مناسب قرار بگیرد، جریان عبوری از کف بدنه، از بخش جلویی پله جدا شده و سطح خیس کاهش خواهد یافت. در نتیجه مقاومت کاهش یافته و سرعت افزایش می‌یابد. اگرچه بدنه‌های پله‌دار پیشینه بسیار طولانی دارند اما تنها تحقیقات معدودی راجع به آن‌ها صورت پذیرفته است. از سوی دیگر، بسیاری از این مطالعات آزمایشگاهی یا تحلیلی بوده و کمتر از روش‌های عددی برای شبیه‌سازی بدنه‌های پله‌دار استفاده شده است.

کلمنت و بلونت [۱] از اولین محققینی بودند که مطالعات آزمایشگاهی منسجمی را برای بررسی مقاومت بدنه شناورهای پله‌دار پایه‌ریزی نمودند. آن‌ها آزمایشات خود را بر روی ۵ نوع شناور استاندارد انجام دادند. گارلند [۲] نیز با انجام یکسری آزمایش‌ها برای نیروی دریایی آمریکا دریافت که کاهش مقاومت مربوط به بدنه‌های پله‌دار منجر به افزایش ماکزیمم سرعت شناور یا کاهش در اندازه و قدرت موتور می‌شود. با توجه به نحوه جدایش جریان از پله‌ها و خشک شدن کامل بدنه تا ترانسوم، کلمنت و کوئلبل [۳] نیز استفاده از یک هیدروفویل پاشنه پایدارکننده را پیشنهاد دادند. این هیدروفویل برای تأمین لیفت و حفظ پایداری پیچ مورد استفاده قرار گرفت.

در چند سال اخیر، مطالعات آزمایشگاهی روند هدفمندتری را در زمینه بدنه‌های پله‌دار در پیش گرفته‌اند. ساویتسکی و مورابیتو [۴] تلاش نمودند تا با یکسری آزمایشات گسترده روابط تجربی را برای پیش‌بینی نحوه جدایش جریان از پله‌ها استخراج نمایند. این روابط تاکنون توسط محققین مختلفی نظیر سواهن [۵] و قدیمی و همکاران [۶] برای توسعه کدهای پیش‌بینی کارایی بدنه‌های پله‌دار مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، لی و همکاران [۷] مطالعاتی برای ارائه یک درک سیستماتیک از اثرات جابجایی و محل پله در شناور پروازی دو پله انجام داده‌اند. سالاری و همکاران [۸] تأثیر هوادهی به پله‌های عرضی شناورهای تندرو سرشی بر کاهش قله منحنی مقاومت آن‌ها را در آزمایشگاه بررسی کردند. نتایج

نشان می‌دهند که در قبل از مرحله سرشی، بدنه پله دار دارای مقاومت بیشتری به میزان ۳۰ تا ۴۰ درصد بوده و پس از مرحله سرش، مقاومت بدنه پله دار حدود ۵٪ کمتر است. تانتون و همکاران [۱۰ و ۹] نیز در دانشگاه ساوتهمپتون آزمایشات گسترده‌ای را بر روی بدنه‌های یک پله و دو پله در آب آرام و موج انجام داده و مقاومت، سینکیج دینامیکی و تریم دینامیکی را برای این شناورها اندازه‌گیری کردند. این آزمایش‌ها که در شرایط مختلف انجام شده‌اند، داده‌های بسیار مناسبی را برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی فراهم آورده‌اند.

از این‌رو، فو و همکاران [۱۱] بر روی محاسبه عددی هیدرودینامیک شناور پروازی پله‌دار در آب آرام و موج مطالعه کردند. نتایج در آب آرام در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در مقایسه با بدنه‌های منشوری معمول، شناورهای پله‌دار دارای تریم بیشتر و مقاومت کمتر در اعداد فرود بالا می‌باشند. اخیراً، قاسمی و همکاران [۱۲] و لطفی و همکاران [۱۳] شبیه‌سازی عددی بدنه‌های یک پله تانتون و همکاران [۸] را انجام دادند و به نتایج مناسبی دست یافتند. آن‌ها از نرم‌افزار انسیس استفاده کردند ولی بجای حل معادلات جسم صلب و استفاده از مش متحرک برای دستیابی به حالت تعادل شناور در آب آرام، روش‌های ساده کننده‌ای را بکار گرفتند و مدل عددی خود را به‌صورت پایدار ارائه نمودند.

همچنین، در زمینه شناورهای پله‌دار می‌توان به مدل ریاضی دشتی‌منش و همکاران [۱۴] اشاره کرد. آنها زاویه تریم، سینکیج دینامیکی و مقاومت را برای شناور دوپله بدست آورده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند.

در این مقاله تلاش می‌شود تا یک مدل عددی توسعه داده شود که قادر است با حل معادلات دینامیک جسم صلب و استفاده از مش متحرک به پیش‌بینی ویژگی‌های هیدرودینامیکی شناورهای پله‌دار بپردازد. در واقع، مدل ارائه شده بی‌نیاز از روش‌های تحلیلی و یا مقادیر تجربی برای پیش‌بینی عددی کارایی شناور است. بنابراین، مدل ارائه شده را می‌توان برای هر بدنه دلخواه مورد استفاده قرار داد. نیروی مقاومت، مقدار تریم و سینکیج دینامیکی، طول خیس چاین و کیل و ویژگی‌های فیزیکی بدنه‌های پله‌دار در سرعت‌های مختلف در این مقاله مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته‌اند.

$$\mu_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

در این معادلات  $\sigma_k$ ،  $\sigma_\varepsilon$ ،  $C_{1\varepsilon}$ ،  $C_{2\varepsilon}$  و  $C_\mu$  دارای مقدار ثابت می‌باشند.

### ۲-۲- معادلات حاکم بر جریان دوفازی

این شبیه‌سازی برای شرایط دوفازی در سطح آزاد انجام شده است. یکی از روش‌های حل مسائل دوفازی روش حجم سیال است. با استفاده از این روش می‌توان سطح مشترک بین دو سیال را مدل‌سازی نموده و پدیده‌های پیچیده سیالاتی نظیر اسپری و جدایش جریان سیال را مدل‌سازی نمود. این روش اولین بار توسط هرت و نیکولز [۱۸]، پیشنهاد گردید. در این روش یک تابع اسکالر بین صفر و یک به نام تابع کسر حجمی تعریف شده و برای تشخیص هر یک از دو فاز از آن استفاده می‌شود. معادله جابجایی کسر حجمی به صورت زیر نوشته می‌شود،

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (CV) = 0 \quad (6)$$

که  $C$  یک پارامتر اسکالر است و مقداری بین ۰ تا ۱ دارد. اگر سلول حاوی سیال مایع باشد  $C=1$  و اگر حاوی سیال گاز باشد  $C=0$  است. سلول‌هایی با مقدار  $C$  بین ۰ و ۱، سطح مشترک آب و هوا را تشکیل می‌دهند. در این روابط چگالی و ویسکوزیته با رابطه (۷) محاسبه می‌شوند،

$$\rho = C\rho_i + (1-C)\rho_g \quad (7)$$

ویسکوزیته نیز با جایگزینی به جای چگالی از فرمول (۷) بدست می‌آید.

### ۲-۳- معادلات حاکم از حرکت جسم صلب

حرکت عمومی جسم صلب را می‌توان به یک حرکت انتقالی با یک نقطه مرجع و یک چرخش تقسیم کرد. مرکز جرم جسم به عنوان نقطه مرجع انتخاب می‌شود [۱۹]،

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{U}_G}{dt} \quad (8)$$

$\vec{F}$  نیروی کل،  $m$  جرم جسم در حال حرکت و  $\vec{U}_G$  سرعت مرکز جرم هستند. از سوی دیگر، گشتاور وارد بر مرکز ثقل جسم با رابطه

### ۲- معادلات حاکم

معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس برای سیال ویسکوز و تراکم ناپذیر به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۵].

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} - \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

که در فرمول‌های بالا  $p$ ،  $u$ ،  $\mu$  و  $\rho$  به ترتیب فشار، سرعت، ویسکوزیته و چگالی می‌باشند. برای مدل‌سازی سطح آزاد که روش حجم سیال به کار گرفته شده است، سیال آب در این شبیه‌سازی دارای چگالی  $997 \text{ kg/m}^3$  و ویسکوزیته  $1/185 \text{ kg/ms}$  و هوا دارای چگالی  $1/899 \times 10^{-4} \text{ kg/ms}$  و ویسکوزیته  $1/83 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$  می‌باشد.

### ۲-۱- معادلات اغتشاش

در این معادلات از مدل  $k-\varepsilon$  استفاده شده است. در این مدل فرض می‌شود که ویسکوزیته آشفته به انرژی سینماتیکی آشفته،  $k$  و نرخ اتلاف آشفته،  $\varepsilon$ ، وابسته است. معادلات دقیق  $k-\varepsilon$  حاوی بسیاری از عبارتهای ناشناخته و غیر قابل محاسبه است. برای یک رویکرد بسیار عملی‌تر مدل آشفته  $k-\varepsilon$  استاندارد [۱۶] استفاده شده که بر اساس آن، درک این معادلات آسان گردیده و برای بسیاری از محاسبات ارائه می‌شوند. برای انرژی سینماتیک آشفته داریم [۱۵].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho\varepsilon \quad (3)$$

و برای نرخ اتلاف آشفته خواهیم داشت [۱۷]:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

که  $u_i$  نشان‌دهنده مؤلفه سرعت در جهت‌های مختلف،  $E_{ij}$  نشان‌دهنده مؤلفه‌های نرخ تغییر شکل و  $\mu_t$  ویسکوزیته گردابه‌ای هستند.

جدول (۱) شرایط مرزی.

نام مرز	نوع مرز	مقدار مرز
ورودی حوضچه کشش	سرعت ورودی	سرعت عمودی
خروجی حوضچه کشش	فشار خروجی	فشار هیدرواستاتیک آب
دیواره جانبی حوضچه کشش	سرعت ورودی	سرعت مماسی
صفحه تقارن حوضچه کشش	صفحه تقارن	سرعت مماسی
دیواره بالایی حوضچه کشش	سرعت ورودی	سرعت مماسی
دیواره پایینی حوضچه کشش	سرعت ورودی	سرعت مماسی

با توجه به شکل دامنه محاسباتی، اگر طول دامنه را  $L$  در نظر گرفته شود، ابعاد دامنه محاسباتی در راستای طول، به اندازه طول شناور از ورودی دامنه و ۶ برابر طول شناور از خروجی دامنه بوده و در راستای ارتفاع، به اندازه طول شناور از بالای دامنه و ۳ برابر طول شناور از پایین دامنه می باشد. همچنین، عرض دامنه به اندازه ۱/۵ برابر طول شناور در نظر گرفته شده است.

در این مقاله شبیه سازی با استفاده از حلگر حجم محدود انجام شده است. به دلیل تقارن طولی بدنه و برای کاهش زمان محاسباتی، شبیه سازی تنها برای نصف بدنه انجام گردیده است. در این شبیه سازی از مدل دوفازی آب و هوا برای نمایش سطح آزاد و از مدل  $k-\epsilon$  برای مدل سازی جریان آشفته استفاده شده است. علاوه بر این، معادلات حرکت جسم صلب حل شده و برای شناور دو درجه آزادی تریم و سینکیج دینامیکی در نظر گرفته شده است. دوران جسم حول مرکز ثقل آن در نظر گرفته شده و زمان آزاد سازی جسم<sup>۱</sup> (مدت زمانی که شناور پس از آن مجاز به حرکت خواهد بود)، برای این شبیه سازی ۰/۱ ثانیه در نظر گرفته می شود. همچنین، گام زمانی در این شبیه سازی ۰/۰۰۱ ثانیه می باشد.

$$\vec{T}_G = [J] \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} + \vec{\omega} \times ([J] \cdot \vec{\omega}) \quad (9)$$

داده می شود که  $\vec{T}_G$  گشتاور کل حول مرکز جرم،  $\vec{\omega}$  سرعت زاویه ای و  $[J]$  تانسور ممان اینرسی حول مرکز جرم هستند. با استفاده از تانسور انتقال  $[R]$ ، یک انتقال هماهنگ بین فضا و سیستم جسم به وجود می آید:

$$\frac{d[R]}{dt} = [\Omega] \cdot [R] \quad (10)$$

که  $[\Omega]$  ماتریس متقابل ایجاد شده از سرعت زاویه ای جسم است.

### ۳- حل عددی

#### ۳-۱- شرایط مرزی و شرایط اولیه

دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده برای حل این مسئله به صورت شکل (۱) می باشد. دامنه محاسباتی دارای طول ۱۵ متر، عرض ۳ متر و ارتفاع ۸ متر بوده که با توجه به شکل، شرایط مرزی و اندازه ابعاد مشخص می باشد. برای این شبیه سازی شرایط مرزی، به صورت جدول (۱) تعریف شده است. برای مرزهایی که سرعت ورودی در نظر گرفته شده است، برای ورودی دامنه فقط سرعت عمودی وجود داشته و در دیگر مرزها سرعت مماسی در نظر گرفته شده است. همچنین، برای خروجی دامنه که فشار خروجی در نظر گرفته شده، فشار هیدرواستاتیکی آب وجود دارد.



شکل (۱) دامنه محاسباتی.

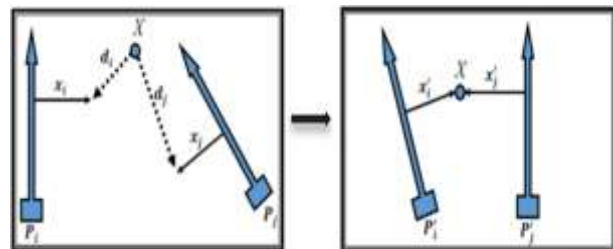
<sup>1</sup> Release Time

## ۳-۲- شبکه بندی

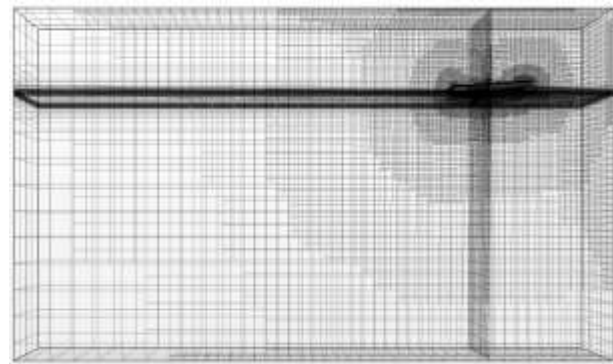
در این شبیه سازی برای تحلیل مسئله و شبکه بندی از تکنیک مش مورفینگ استفاده شده است. بدین ترتیب که در طی فرایند حل عددی دامنه محاسباتی ثابت می ماند و مش اطراف بدنه شروع به جابجایی می کند. در تکنیک مش مورفینگ، رئوس مش به عنوان نقاط کنترلی انتخاب گردیده و مش مورفر از نقاط کنترل و جابجایی مرتبط با آنها برای تولید میدان درونیابی در سراسر منطقه استفاده می کند. از این نقاط می توان برای جابجایی مش در دامنه محاسباتی استفاده کرد. ضمن اینکه هر نقطه کنترلی با بردار فاصله مرتبط است که جابجایی شبکه بندی دامنه محاسباتی را در یک گام زمانی مشخص می کند. شکل (۲) چگونگی تشکیل میدان درونیابی را نشان می دهد.

به طور کلی، مش زدن و انتخاب مش مناسب یکی از مهم ترین مراحل حل در شبیه سازی عددی مسائلی است که در آنها دینامیک جسم صلب در نظر گرفته می شود. باید دقت داشت که در نقاط مهم مانند شکستگی ها، چاین و پله باید مش ریزتر، بیشتر و دقیق تر باشد و هر چه فاصله از بدنه شناور بیشتر شود، به دلیل اهمیت کمتر آن نواحی مش بزرگ تر و کمتر خواهد شد (شکل (۳)).

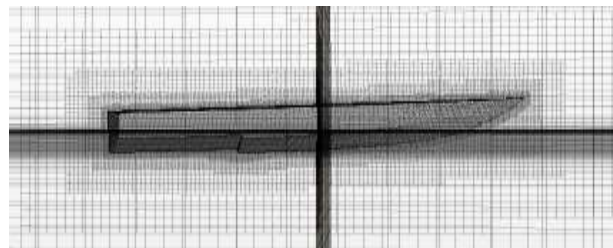
برای این مش، از مدل های سورفیس ریمشر<sup>۱</sup>، تریمر<sup>۲</sup> و پریسم لایر<sup>۳</sup> استفاده شده است. به منظور بهبود کیفیت کلی سطح موجود و بهینه سازی مدل های مش حجمی، سورفیس ریمشر برای سه گوشه کردن سطح مورد استفاده قرار می گیرد. مدل تریمر داری یک حد بالایی است که اندازه سلول های قالب بعدی را کنترل می کند.



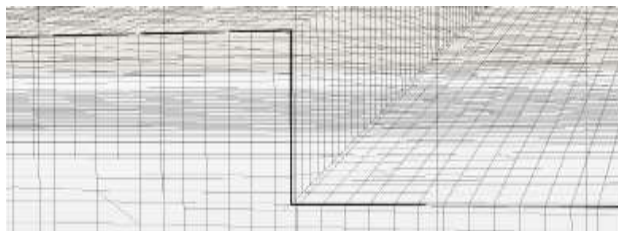
شکل (۲) فرآیند تشکیل میدان درونیابی در مش مورفینگ.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۳) مش بندی، الف) مش کلی دامنه محاسباتی، ب) مش روی بدنه و ج) مش روی پله.

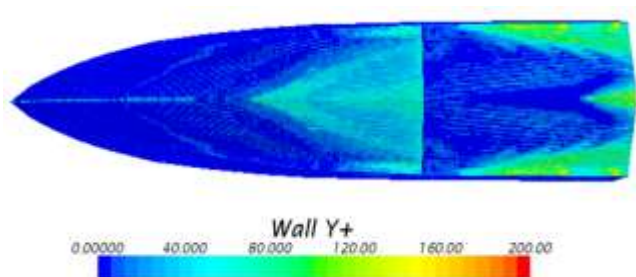
انتخاب یک حد بالا از شدت تغییر ظاهری سلول ها و همچنین تولید سلول بد کیفیت جلوگیری می کند. مدل پریسم لایر مش برای تولید سلول های منشوری متعامد روی سطوح دیواره یا مرزها استفاده می شود. این لایه به منظور بهبود دقت حل در نواحی لایه مرزی ضروری است. به طور کلی، تعداد مش در این شبیه سازی ۹۴۰۹۱۴ می باشد.

از سوی دیگر، مقدار  $Y+$  می تواند معیار خوبی برای مشخص نمودن کیفیت حل عددی باشد. در واقع معیار  $Y+$  چگونگی مدل شدن لایه مرزی را نشان می دهد. بدین ترتیب که اگر مقدار  $Y+$  کمتر از ۳۰۰ باشد [۱۶]، حل عددی مناسب است و

<sup>3</sup> Prism Layer

<sup>1</sup> Surface Remesher

<sup>2</sup> Trimmer



شکل (۴) نمودار  $Y+$  در سرعت  $۸/۱۳$  متر بر ثانیه.

#### ۴- نتایج عددی

در این بخش، ابتدا حل عددی ارائه شده مورد اعتبارسنجی قرار می‌گیرد و سپس، نتایج بدست آمده مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت. جهت اعتبارسنجی مدل عددی ارائه شده، از نتایج آزمایشگاهی تانتون و همکاران [۹] استفاده خواهد شد. آن‌ها بدنه‌ای یک پله که در شکل (۵) نشان داده شده است را در آب آرام مورد آزمایش قرار دادند. مشخصات شناور یک پله در جدول ۲ ارائه گردیده است. همچنین، آزمایش‌ها در سرعت‌های  $۴/۰۸$ ،  $۶/۲۵$ ،  $۸/۱۳$ ،  $۱۰/۱۳$  و  $۱۲/۰۵$  متر بر ثانیه انجام شده و مقادیر مقاومت، تریب، سینکج دینامیکی، طول چابین خیس و طول کیل خیس اندازه‌گیری شدند. در اینجا نتایج حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه خواهد شد. همچنین مقادیر طول خشک شدن و زاویه خط اسپری برای شناور محاسبه شده‌اند.

جدول (۲) مشخصات شناور مدل C1.

مشخصات	مقدار
$L(m)$	۲
$B(m)$	۰/۴۶
$T(m)$	۰/۱
$\Delta(n)$	۲۴۳/۴
$\beta[^\circ]$	۲۲/۵
$LCG[\%L]$	۰/۳۳

هرچه این مقدار کمتر و به صفر نزدیک‌تر شود میزان دقت بیشتر می‌شود. ولی از سویی برای اینکه این مقدار کمتر شود نیاز به تعداد مش زیاد می‌باشد که باعث می‌شود زمان حل بسیار طولانی گردد. بنابراین باید به گونه‌ای مش ایجاد گردد که هم مقدار  $Y+$  و زمان حل منطقی بوده و هم دقت جواب‌ها بالا باشد. مقدار  $Y+$  با فرمول (۱۱) بدست می‌آید،

$$y^+ = \frac{u^* y}{U_{fw}} \quad (11)$$

که  $y$  ضخامت اولین لایه از مش،  $U_{fw}$  ویسکوزیته سینماتیکی و همچنین،

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (12)$$

که  $\rho$  چگالی آب است و همچنین،

$$\tau_w = \frac{C_f \rho V_s^2}{2} \quad (13)$$

و  $V_s$  نیز سرعت می‌باشد.  $C_f$  ضریب اصطکاک با فرمول (۱۵) بدست می‌آید،

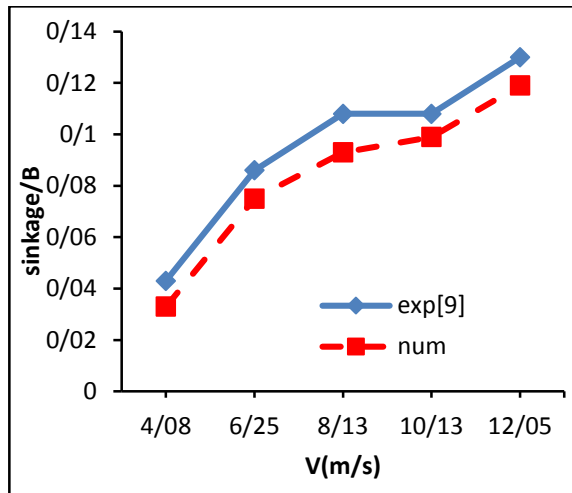
$$C_f = \frac{0.075}{(\log(\text{Re}) - 2)^2} \quad (14)$$

همچنین عدد رینولدز به صورت زیر به دست می‌آید،

$$\text{Re} = \frac{V_s L_m}{U_{fw}} \quad (15)$$

که  $L_m$  نشان‌دهنده طول خیس است.

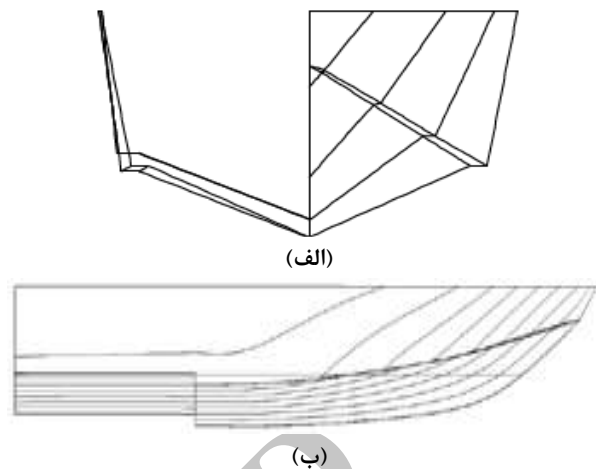
در این شبیه‌سازی برای سرعت‌های مختلف مقدار  $Y+$ ، تقریباً از ۰ تا ۲۰۰ تغییر می‌کند. تغییرات مقدار  $Y+$  در سرعت  $۸/۱۳$  متر بر ثانیه در شکل ۳ آورده شده است. با توجه به شکل (۴) و اینکه توزیع مقادیر  $Y+$  در کل بدنه کیفیت مش را مشخص می‌کند، می‌توان گفت که مش زده شده برای این حل عددی مناسب بوده است. با توجه به اینکه مقدار  $Y+$  ویژگی‌های مش را بررسی می‌کند، بنابراین امروزه در مقالات مختلف به‌عنوان جایگزین مناسبی برای بررسی استقلال حل از مش مطرح شده است. در اینجا، جهت اختصار تنها نمودار مقدار  $Y+$  برای یک سرعت میانی در شبیه‌سازی‌های عددی آورده شده است.



شکل (۷) مقایسه نتایج حل عددی برای سینکیج دینامیکی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی.

ولی در دیگر سرعت‌ها درصد خطا پایین بوده که برای سرعت‌های ۱۰/۱۳ و ۱۲/۰۵، خطای ۸ و ۷ درصد اتفاق افتاده است. مقادیر مقاومت حل عددی نیز در شکل (۸) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. مطابق انتظار مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت مقدار مقاومت افزایش می‌یابد. میزان خطا نیز با افزایش سرعت، کمی افزایش یافته است. در واقع، درصد خطا در سرعت‌های پایین بسیار کم و منحصر به فرد است. طول چاین خیس (LC) نیز برای سرعت‌های مختلف اندازه‌گیری شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بیشترین درصد خطا در سرعت ۱۲/۰۵ اتفاق افتاده که ۱۲/۴ درصد بوده و کمترین درصد خطا ۰/۵ درصد بوده می‌باشد.

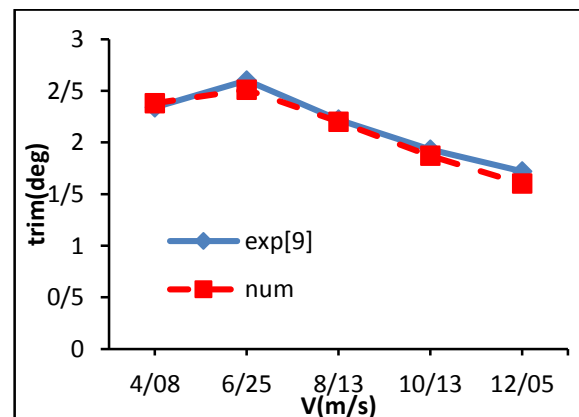
بدست آمده، درصد خطا بسیار پایین می‌باشد به طوری که درصد خطای میانگین ۶/۳۵ درصد می‌باشد. در شکل (۹-الف) نمودار اعتبارسنجی طول چاین خیس نشان داده شده است. همچنین، طول کیل خیس (LK) برای سرعت‌های مختلف بدست آمده است. کمترین درصد خطا در سرعت ۴/۰۸ متربرثانیه رخ داده که ۲/۷ درصد بوده و بیشترین خطا در سرعت ۱۲/۰۵ متربرثانیه اتفاق افتاده که ۱۵/۵ درصد می‌باشد. به طور کلی درصد خطای میانگین برای طول کیل خیس ۱۰/۰۲ درصد می‌باشد. نمودار اعتبارسنجی آن در شکل (۹-ب) ارائه شده است.



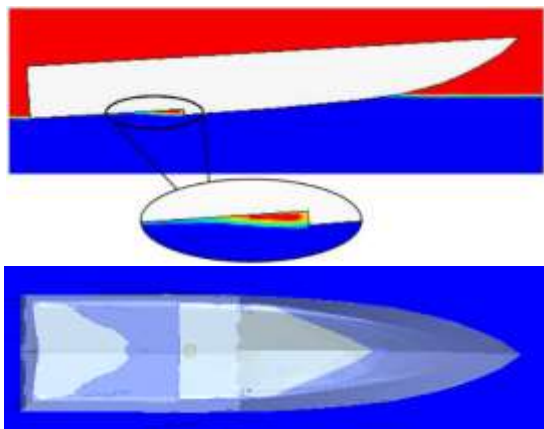
شکل (۵) خطوط بدنه شناور، (الف) نمای روبرو، (ب) نمای جانبی.

در شکل (۶) مقادیر تریم حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. روند کلی بیانگر دقت مناسب حل عددی در پیش‌بینی مقدار تریم است. مقدار خطا در سرعت‌های مختلف متفاوت است. کمترین درصد خطا در سرعت ۸/۱۳ بوده که ۰/۹ درصد و بیشترین درصد خطا در سرعت ۱۲/۰۵ اتفاق افتاده که ۶/۹۷ درصد می‌باشد.

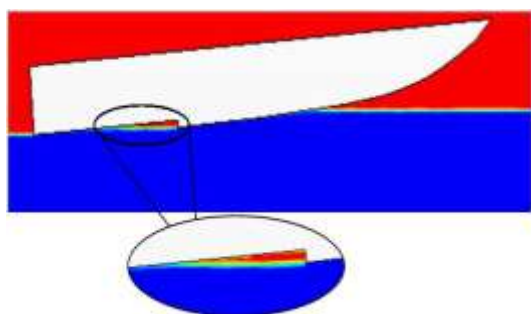
در شکل (۷)، مقدار سینکیج دینامیکی حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌گردد که حل عددی قادر است روند کلی تغییرات سینکیج دینامیکی در سرعت‌های مختلف را به خوبی شبیه‌سازی نماید. باین وجود، درصد خطای بدست آمده در سرعت ۴/۰۸ زیاد بوده و ۲۱ درصد می‌باشد.



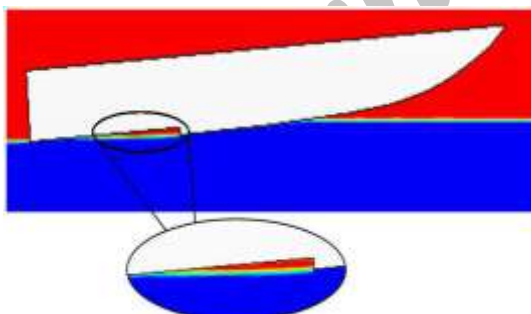
شکل (۶) مقایسه مقدار زاویه تریم حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی.



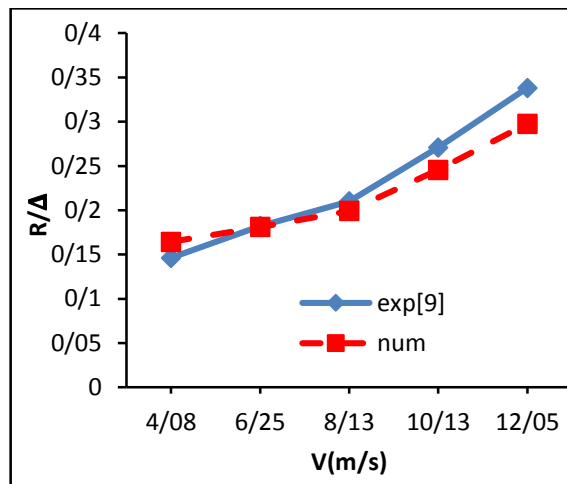
(الف)



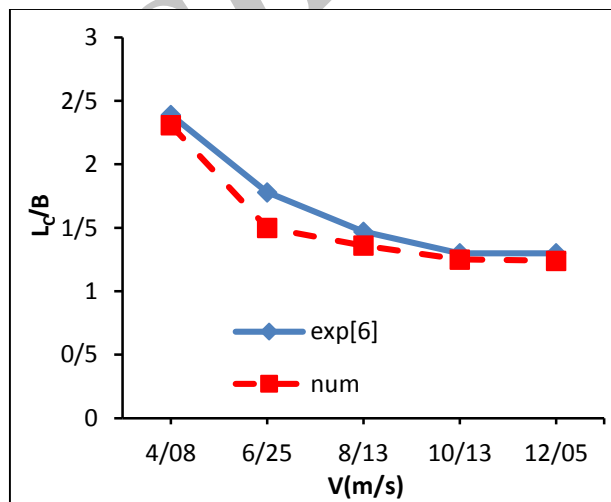
(ب)



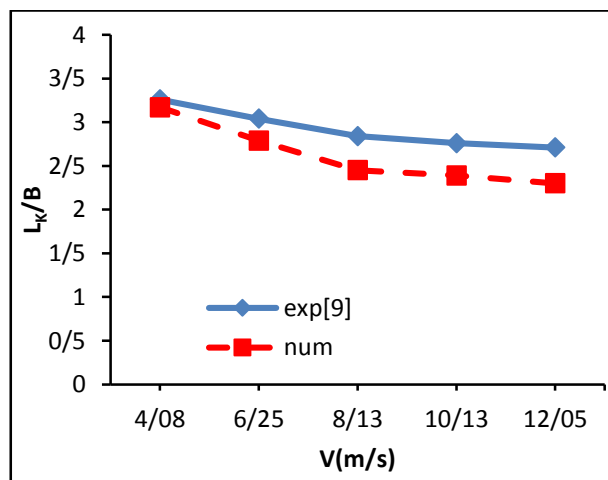
(ج)



شکل (۸) نمودار اعتبارسنجی مقاومت.



(الف)



(ب)

شکل (۹) نمودار اعتبارسنجی الف) طول خیس چاین و ب) کیل.



خشک بیشتر شده که خود از فواید وجود پله در شناور می باشد. با این وجود، خود این موضوع می تواند منجر به برخی ناپایداری های دینامیکی نیز شود.

با توجه به شکل مشاهده می شود که جدایش در قسمت پله اتفاق می افتد. اگر بدنه هارد چاین باشد، خطوط جدایش در امتداد بدنه، در امتداد چاین خواهند بود. جریان سیال در سرعت های بالا از پله جدا شده و در عقب بدنه تا حدودی هوادهی اتفاق می افتد. این هوادهی باعث کاهش سطح خیس و در نتیجه مقاومت گردیده و توزیع لیفت هیدرودینامیکی تغییر می کند.

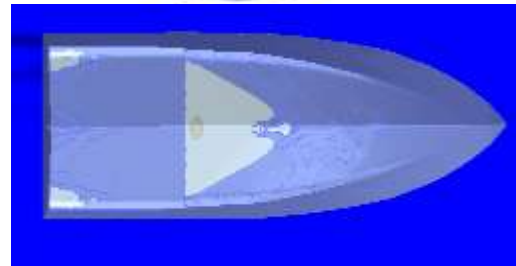
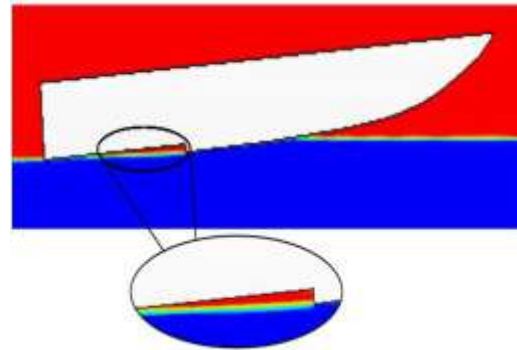
همان گونه که از نمای جانبی محل تقاطع شناور با سطح آزاد آب پیداست، هرچه سرعت افزایش یافته، طول خشک نیز بیشتر شده است. همچنین با توجه به نمای پایین محل تقاطع می بینیم که در سرعت های بالاتر، سطح خشک افزایش یافته است. مقادیر طول خشک برای سرعت های مختلف در شکل (۱۱) ارائه شده است.

با توجه به نتایج بدست آمده برای طول چاین خیس و طول کیل خیس مشاهده گردید که با افزایش سرعت مقدار طول خیس و در نتیجه سطح خیس کاهش می یابد. علاوه بر این، از تقاطع کف بدنه با سطح آزاد آب، زاویه خط اسپری برای سرعت های مختلف بدست آمده است.

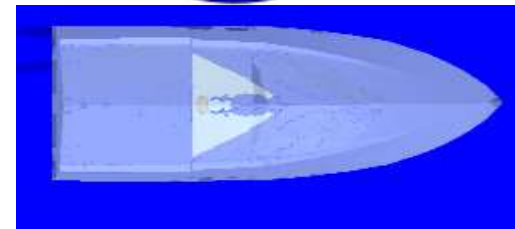
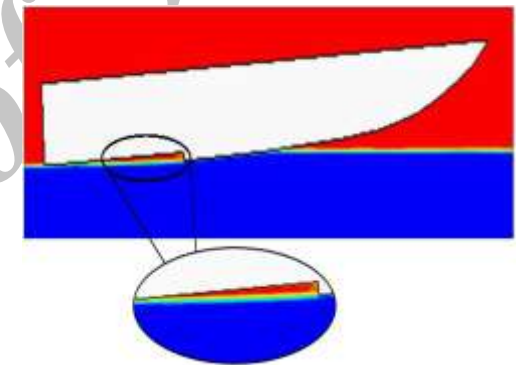
خط مرزی بدنه جلویی در تقاطع با جریان سیال را خط اسپری و زاویه بین خط اسپری و خط مرکزی در نمای پایین را زاویه خط اسپری گویند. شکل (۱۲) نمودار مربوط به زاویه خط اسپری در سرعت های مختلف را نشان می دهد.

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله برای شناور یک پله ای که دارای دو درجه آزادی سینکج دینامیکی و تریم دینامیکی می باشد، شبیه سازی عددی انجام شد. با این کار در سرعت های مختلف انجام و مقدار مقاومت، سینکج دینامیکی، زاویه تریم، طول چاین خیس و طول کیل خیس را برای شناور بدست آمده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید.



(د)



(ه)

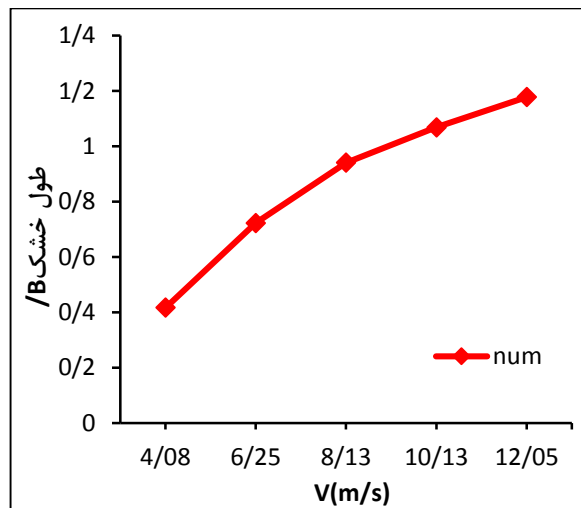
شکل (۱۰) محل تقاطع شناور با سطح آزاد آب برای سرعت (الف) (ب) ۰۴/۰۸ (ج) ۰۶/۲۵ (د) ۰۸/۱۳ (ه) ۰۱۰/۱۳ (و) ۰۱۲/۰۵

همان گونه که در بخش های مختلف شکل (۱۰) مشاهده می شود، وجود پله باعث می شود تا ناحیه پشت آن خشک بماند و این باعث کاهش سطح خیس و در نتیجه کاهش مقاومت می شود. بر روی بدنه مناطق آبی رنگ، مناطق خشک را نشان می دهند و مشاهده می شود که با افزایش سرعت این نواحی

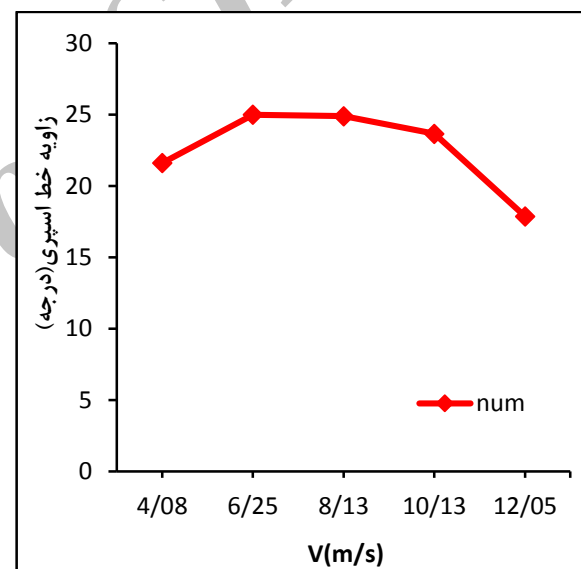
در کف شناور است که با ایجاد یک لیفت اضافی در قسمت عقبی باعث بهبود حرکات شناور و نیز کاهش سطح خیس شده و در نتیجه کاهش مقاومت آن می‌شود. کاهش مقاومت موجب قدرت کمتر و کاهش مصرف سوخت خواهد شد. ضمن اینکه، شناورهای تندرو پله‌دار به دلیل داشتن مقاومت کم و سرعت زیاد، کاربرد نظامی، تفریحی و گردشگری فراوانی داشته و این موضوع می‌تواند یک هدف جدی برای کار در این زمینه ارزیابی گردد. در این شبیه‌سازی از تکنیک مش مورفینگ برای حل مسئله استفاده شد.

#### ۶- مراجع

- [1] Clement, E. P., Blount, D. L., "Resistance Test of Systematic Series of Planing Hulls Forms", SNAME Transaction, Vol.71, pp.491-579, 1963.
- [2] Garland, W. R., "Stepped Planing Hull Investigation", Midshipman First Class, United States Naval Academy, 2010.
- [3] Clement, E. P., Koelbel, J., "Optimized Designs for Stepped Planing Monohulls and Catamarans", High Performance Marine Vehicles, pp.35-43, 1992.
- [4] Savitsky, D., Morabito, M., "Surface Wave Contours Associated with the Forebody Wake of Stepped Planing Hulls", Mar. Technol, pp.1-16, 2010.
- [5] Svahn, D., "Performance Prediction of Hulls with Transverse Steps", M.Sc. Thesis, KTH Centre for Naval Architecture, Stockholm, Sweden, 2009.
- [6] Loni, A., Ghadimi, P., Nowruzi, H., Dashtimanesh, A., "Developing a Computer Program for Mathematical Investigation of Stepped Planing Hull Characteristics", International Journal of Physical Research, Vol.1, No.2, pp.34-47, 2013.
- [7] Lee, E., Pavkov, M., McCue-Weil, L., "The Systematic Variation of Step Configuration and Displacement for a Double-step Planing Craft", Journal of Ship Production and Design, Vol.30, No.2, pp.89-97, 2014.
- [۸] سالاری، م، سیف، م.س. و تیموری، م، "تحلیل تجربی تاثیر هوادهی به پله های عرضی شناورهای تندرو سرشی بر کاهش قله ی منحنی مقاومت آنها"، دو فصل نامه علمی - پژوهشی دریا فنون، صفحه ۲۲-۳۲، ۱۳۹۴.



شکل (۱۱) نمودار طول خشک.



شکل (۱۲) نمودار زاویه خط اسپری.

نتایج بدست آمده برای زاویه تریم با درصد خطای میانگین ۳/۲۳، درصد خطای میانگین سینکیج دینامیکی ۱۱/۱۳، درصد خطای میانگین مقاومت ۷/۹۷، درصد خطای میانگین طول چاین خیس ۶/۳۵ و درصد خطای میانگین طول کیل خیس ۱۰/۰۲، ارائه گردید. همچنین، نمودار طول خشک شدن و زاویه خط اسپری برای شناور رسم شد. در شناورهای پروازی، با افزایش سرعت، مقاومت افزایش می‌یابد و همچنین در شناور پله‌دار هرچه سرعت افزایش می‌یابد، طول خشک و سطح خشک نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، پله به صورت تغییر ارتفاعی

- [19] Goldstein, H., Charles, P., Safko, J., "Classical Mechanics", Boston, MA, Addison Wesley and Company, 2002.
- [9] Taunton, D.J., Hudson, D.A., Sheno, R.A., "Characteristic of a Series of High Speed Hard Chine planing Hulls - Part 1: Performance in Calm Water", International Journal of Small Craft Technology, Vol.152, pp.55-75, 2010.
- [10] Taunton, D.J., Hudson, D.A., Sheno, R.A., "Characteristic of a Series of High Speed Hard Chine Planing Hulls - part II: Performance in Waves", Vol. 153, pp: 1-22, 2011.
- [11] Fu, T. C., O'Shea, T.T., Judge, C. Q., Dommermuth, D., Brucker, K., Wyatt, D. C., "A Detailed Assessment of Numerical Flow Analysis (NFA) to Predict the Hydrodynamics of a Deep-V Planing Hull", 29<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics Gothenburg, Sweden, pp.26-31, August 2012.
- [12] Taj Golah Veysi, S., Bakhtiari, M., Ghassemi, H., Ghiasi, M., "Toward Numerical Modeling of the Stepped and non Stepped Planing Hull", Journal of Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering, Vol.37, No.6, pp.1635-1645, 2014.
- [13] Lotfi, P., Ashrafizadeh, M., Kowsari Esfahani, R., "Numerical Investigation of a Stepped Planing Hull in Calm Water", Ocean Engineering, Vol.94, pp.103-110, 2015.
- [14] Dashtimanesh, A., Tavakoli, S., and P. Sahoo., "Development of a Simple Mathematical Model for Calculation of Trim and Resistance of Two Stepped Planning Hulls with Transverse Step", International Conference on Ships and Offshore Structures, 2016.
- [15] Sheingart, Z., "Hydrodynamics of High Speed Planing Hulls with Partially Ventilated Bottom and Hydrofoils", Massachusetts Institute of Technology, 2014.
- [16] Launder, B. E., Spalding, D. B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.3, No.2, pp.269-289, 1974.
- [17] Versteeg, H. K., Malalasekera, W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Pearson Education, 2007.
- [18] Hirt, C. W., Nichols, B. D., "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", Journal of Computational Physics, Vol.39, pp.201-225, 2002.