

شبیه‌سازی عددی جریان حول شناور پروازی پله‌دار (دوپله) در آب آرام

پرویز قدیمی^۱، سعید پناهی^۲

pghadimi@aut.ac.ir

۱- استاد دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- کارشناس ارشد هیدرومکانیک کشتی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

یکی از روش‌های موثر برای کاهش درگ در شناورهای پروازی استفاده از پله در کف بدنه شناور است. پله سبب کاهش سطح تماس بدنه شناور با آب شده و به تبع آن کاهش درگ شناور را به همراه خواهد داشت. در این مقاله، اثر استفاده از دو پله عرضی بر روی عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور پروازی چاین‌دار به روش عددی حجم محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. معادلات متوسط زمانی ناوراستوکس همراه با مدل اغتشاشی استاندارد k-ε کوپل شده با معادلات تسخیر حجمی سطح آزاد برای شبیه‌سازی جریان آشفته در اطراف بدنه شناور به کمک نرم افزار انسیس سی‌اف‌ایکس حل می‌شوند. به منظور اعتبارسنجی مدل عددی ارائه شده در این مقاله، ابتدا نتایج عددی محاسبه شده با نتایج آزمایشگاهی تانتون و همکاران مقایسه می‌شوند. سپس نتایج عددی بدست آمده برای نیروی درگ، توزیع فشار روی بدنه، سطح خیس شده، اسپری آب از چاین و الگوی موج اطراف بدنه شناور در سرعت‌های مختلف ارائه و مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند. شناور پروازی دوپله مورد بررسی در مقایسه با مدل تک‌پله و بدون پله دارای مقاومت کمتری بوده که ناشی از جدایش جریان از پله و همچنین کاهش سطح خیس شده کف شناور می‌باشد. این پارامتر، به خودی خود باعث کاهش مؤلفه مقاومت اصطکاکی می‌شود. از طرفی دیگر، برخی اثرات منفی بر روی عملکرد هیدرودینامیکی در آب آرام مشاهده می‌شود که می‌توان به بزرگتر شدن ارتفاع سطح آزاد در پشت شناور و افزایش فشار هیدرودینامیکی در قسمت سپینه، اشاره نمود. در عین حال، لازم به ذکر است که شناور دوپله دارای بازه تغییرات کوچکتری از زاویه تریم بوده و در مقایسه با حالت تک‌پله و بدون پله، کنترل رفتار طولی شناور را به طرز قابل توجهی، بهبود می‌بخشد.

واژگان کلیدی: شناور پروازی پله‌دار، حرکت پایدار، آب آرام، نیروی درگ، جریان اطراف شناور.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۶/۰۳/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۱/۱۰

۱- مقدمه

کسب درک صحیح از پدیده جریان حول شناور پروازی از مواردی است که همواره مورد نظر محققان می‌باشد. امروزه تلاش‌های زیادی توسط محققین برای کاهش پسا و در نتیجه افزایش سرعت شناورهای پروازی از طریق تغییر فرم بدنه صورت گرفته است. شکل‌های مختلفی همچون چاین، استریک^۱، پد^۲، اسپری ریل^۳، اینترسپتور^۴، تونل و پله^۵ تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است. از میان این روش‌ها، استفاده از پله در کف بدنه شناور به عنوان یکی از موثرترین روش‌ها شناخته شده است. در حقیقت پله با کاهش میزان سطح تماس بدنه با آب بر روی دو یا چند سطح پروازی کوچک به جای یک سطح بزرگ می‌تواند باعث بهبود عملکرد شناور تندرو، کاهش مقاومت و همچنین کاهش حرکات شناور به منظور مانور بهتر شود. از آنجایی که در این حالت نیروی لیفت بر روی چند سطح در طول بدنه توزیع می‌شود، پایداری طولی افزایش می‌یابد. با این وجود خطر واژگون شدن شناور در صورت بسته شدن مسیر هوا توسط امواج نیز وجود دارد. اگر هوادهی متوقف شود، جریان معکوس در پشت پله رخ می‌دهد که منجر به افزایش بیش از حد نیروی درگ می‌گردد. در نتیجه سرعت بطور ناگهانی کاهش یافته و ممکن است

شناور واژگون شود. برای جلوگیری از این مشکل هوا اغلب از طریق دریچه‌هایی در بالای خط آب به داخل مکش می‌شود و یا از طریق لوله‌هایی در سطح عرشه تامین می‌شود.

یکی از روش‌های متداول و کم هزینه از لحاظ زمان در زمینه تحلیل شناورهای تندرو، روش‌های تجربی می‌باشد. از جمله مطالعات انجام شده در این حیطه می‌توان به آزمایشات ساویتسکی در سال ۱۹۶۴ اشاره نمود. وی مطالعات جامعی بر روی بدنه‌های منشوری با زاویه ددرایز متغیر انجام داد و روابطی منحصر به فرد براساس تست مدل برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر شناور بدست آورد [۱]. فریدزما [۳ و ۲] حرکات شناور در صفحه قائم را مورد بررسی قرار داد. برای این امر، وی یک سری شناور منشوری را معرفی کرده و مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را در موج منظم و

نامنظم روی بدنه‌های مذکور انجام داد. ساویتسکی و برآون [۴] به منظور تکمیل روابط پیشین، مطالعات خود را به تحلیل شناورهای پروازی در آب آرام و موج تعمیم دادند. مقاومت ترانسوم شناور، تاثیر تریم‌فلپ‌ها، اثر انحنای کف بر کارایی شناور و دریامانی پارامترهای مورد بررسی در این مقاله می‌باشد. کاتایاما و همکاران [۵] در چند سال اخیر به تست مدل شناورها در ابعاد زیر یک متر و بررسی اثرات مقیاس‌بندی بر روی نیروها و حرکات آنها پرداخته‌اند. در طول آزمایشات نیروهای لیفت، درگ، و گشتاور تریم اندازه‌گیری شده و سطح خیس شده و ناحیه پاشش ثبت گردیده‌اند.

ساویتسکی و همکاران [۶] با در نظر گرفتن درگ اسپری جارویی^۶ مجدداً عملکرد شناورهای پروازی را مورد بررسی قرار دادند. ایشان در مطالعه خود با توسعه مدل و افزودن اسپری جارویی برای بدست آوردن مقاومت کل شناور برحسب زاویه ددرایز، زاویه تریم و سرعت روش جدیدی را ارائه نمودند. سپس ساویتسکی و مورابیتو [۷] طی آزمایشات گسترده بر روی بدنه‌های منشوری و یک حاصل از پله را مورد بررسی قرار داده و روابطی برای ارتفاع پروفیل موج در پاشنه شناور استخراج نمودند. تاونتون و همکاران [۸] در دانشگاه ساوثهمپتون آزمایشاتی بر روی ۴ مدل بدنه پروازی در نسبت طول به عرض‌های مختلف انجام دادند.

نتایج بدست آمده تریم دینامیکی، هیو دینامیکی، بالا آمدگی مرکز ثقل و سطح خیس شده کیل و چاین می‌باشند. لی [۹] مطالعات خود را بر روی NSWC15E با دو پله به ازای موقعیت‌های مختلف طولی پله انجام دادند. نتایج بدست آمده از این مدل تست به ازای تغییرات وزن جابجایی شناور ارائه گردید. سالاری و همکاران [۱۰] به بررسی تاثیر هوادهی به پله‌های عرضی شناورهای تندرو بر قله منحنی مقاومت-سرعت پرداخته و گزارش نمودند که هوادهی به پشت پله راهکار مناسبی برای کاستن قله منحنی مذکور در شروع مرحله سرشی می‌باشد. همچنین، سیف و همکاران [۱۱] حرکات شناور پروازی را از طریق روش‌های آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. هدف آنها نیز

⁴ Interceptor

⁵ Step

⁶ Whisker

¹ Strake

² Pad

³ Spray Rail

در زمینه شناورهای پروازی پله‌دار صورت گرفته است. از جمله آنها می‌توان به مطالعات ساوان در سال ۲۰۰۹ اشاره نمود که به بررسی عملکرد شناور پروازی پله‌دار (یک پله) پرداخته است، با ذکر اینکه تحلیل وی بدنه‌های پروازی دو پله را شامل نمی‌شود. از این رو با توجه به محدودیت‌های مذکور برآن شدیم که مقداری مطالعات را به شکلی فراتر بسط دهیم. ابزار مناسب به منظور دستیابی به این مهم می‌تواند روش‌های عددی باشد، که با تولید یک آزمایشگاه مجازی ما را به غایت نهایی خود سوق می‌دهد.

از جمله جدیدترین مطالعات انجام شده می‌توان به شبیه‌سازی عددی شناورهای پروازی با استفاده از کد دینامیک سیالات محاسباتی^۲ کاپیتو [۱۹] اشاره کرد. روش کلاسیک حجم محدود به منظور حل معادلات ناویراستوکس استفاده شده و به صورت کوپل با معادلات حجم سیال مدلسازی انجام گرفته است. از کوتا [۲۰] با بکارگیری معادلات RANS^۳ حرکات شناور را در حالت پایدار و غیر پایدار^۴ مدلسازی نمود. شبیه‌سازی در آب آرام، موج منظم و نامنظم صورت پذیرفته است. ساوند و همکاران [۲۱] تاثیر زاویه ددرایز را بر روی عملکرد شناور پروازی در حالت پایدار مورد بررسی قرار دادند. شبیه‌سازی با حلگر نرم‌افزارهای STAR-CCM+ و OpenFOAM انجام گرفته و مزیت‌های هر رویکرد آنالیز شده است.

سان و فالتینسن [۲۲] به شبیه‌سازی شناور پروازی در آب موج پرداختند. تئوری دو و نیم‌بعدی به منظور فراهم آوردن شبیه‌سازی در حوزه زمان به صورت غیرخطی و همزمان روش المان مرزی برای حل مسئله شرایط مرزی در صفحات عرضی به صورت دو بعدی اعمال شده است. جرم افزوده و ضرایب دمپینگ بدست آمده و همچنین موج القایی حرکات هیو و پیچ ارائه گردیده است.

بریزولارا و سرا [۲۳] به بررسی دقت کدهای دینامیک سیالات محاسباتی و مطالع مشخصه‌های هیدرودینامیکی شناور پرداختند. بدین منظور یک حلگر تهیه گردیده تا بدنه پروازی منشوری گوه‌ای شکل را مورد تحلیل قرار دهد. فشار در قسمت خیس بدنه، تنش‌های مماسی، خط ریشه اسپری و شکل موج حول بدنه از نتایج بدست‌آمده از این شبیه‌سازی می‌باشند.

مقایسه نتایج ناشی از تست مدل در حوضچه کشش با نتایج بدست‌آمده توسط ساویتسکی بود.

از دیگر روش‌های موجود به منظور بررسی عملکرد هیدرودینامیکی شناور پروازی روش‌های دو و نیم بعدی می‌باشند. میلیوتزکی [۱۲] و اشنایدرز [۱۳] تئوری محدودی را صرفاً برای محاسبه نیروهای وارد بر شناورهای پروازی به هنگام برخورد به آب انجام دادند. زارنیک [۱۴] یک مدل ریاضی غیرخطی را به منظور حل دینامیک شناورهای پروازی در حوزه زمان ارائه نمود. روابط وی اساساً برای شناور با سه درجه آزادی انجام شد. وی ابتدا مدلش را برای دینامیک در آب با موج منظم و سپس آن را برای امواج نامنظم نیز گسترش داد. آکرز [۱۵] نیز تلاش نمود رابطه جرم افزوده زارنیک را بهبود دهد. وی در محاسباتش دو فرض متفاوت را برای نیروهای هیدروستاتیکی در نظر گرفت. وی در نهایت به نرم‌افزاری جامع با نام پاورسی دست یافت.

کیهارا [۱۶] به مدلسازی جریان حول بدنه‌های منشوری پروازی پرداخت. در این مطالعه روش دو و نیم‌بعدی برای سطح آزاد جریان به شکل غیرخطی با در نظر گرفتن ریزش^۱ سیال استفاده گردیده است. قاسمی و غیائی [۱۷] از یک روش ترکیبی برای پیش‌بینی مشخصه‌های هیدرودینامیکی شناور پروازی استفاده نمودند. ایشان به منظور مدلسازی از روش المان مرزی مبتنی بر تئوری پتانسیل برای مؤلفه مقاومت القایی فشاری، و از روش تئوری لایه مرزی برای مقاومت اصطکاکی و همچنین از روش تجربی برای مقاومت اسپری بهره بردند.

ینگجه و همکاران [۱۸] به مدلسازی شناور تندرو در مود شتاب رو به جلو به‌مراه کمینه کردن زمان برای رسیدن به سرعت نهایی، پرداختند. آنها کاربرد جدیدی از تئوری کنترل بهینه را به منظور افزایش دادن عملکرد سرعت در شناور، ارائه کردند و از روابط نیمه‌تجربی قراردادی برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی و همینطور به منظور توسعه مدل دینامیکی حرکت شناور استفاده گردید.

از آنجایی که کلیه این روش‌ها دارای محدودیت‌های خاصی می‌باشد، که اکثر این محدودیت‌ها مربوط به فرم بدنه شناور و بازه عملکردی آن است. با این وجود یک سری پیشرفت‌ها

³ Reynolds Averaged Navier Stokes

⁴ Unsteady

¹ Splash

² Computational Fluid Dynamics

در حوضچه کشش بدست آمد و سپس بوسیله روش FVM^۵ مدلسازی حرکت شناور دارای دو درجه آزادی هیو و پیچ ارائه گردید. نتایج تست مدل حاکی از عملکرد مقاومتی ضعیف شناور در ناحیه هامپ می‌باشد.

بختیاری و همکاران [۳۰] به صورت عددی شناور پروازی پله‌دار (یک پله) را مدلسازی کرده و نتایج خود را تحت عنوان مقاومت، توزیع فشار، سطح خیس‌شده، اسپری آب، پروفیل ویک و موج تولید شده حول شناور ارائه کردند.

منصوری و همکاران [۳۱] اینترسپتوری را برای کنترل تریم بهینه و مینیمم مقاومت طراحی کردند. ایشان با هدف مطالعه ابعاد اینترسپتور به ازای ارتفاع و اسپن‌های متفاوت با بهره‌گیری از روش حجم محدود و مش متحرک سعی بر بهینه‌سازی پارامترهای تریم و مقاومت داشتند. نتایج آنها حاکی از آن است که ضخامت لایه مرزی^۶ در استرن بسیار مهم‌تر از پارامترهای دخیل دیگر بوده و به طور کلی طبق طراحی صورت گرفته ارتفاع اینترسپتور نایستی بیشتر از ۶۰ درصد ضخامت لایه مرزی در ترانسوم باشد. آن‌ها همچنین بر اساس عدد رینولدز جریان اشکال مختلفی را برای سایز اینترسپتور بهینه و کاربردش در قایق تندرو ارائه کردند.

قاسمی و همکاران [۳۲] به شبیه‌سازی عددی زاویه پله و اثر آن بر روی عملکرد هیدرودینامیکی شناور پروازی پرداختند. ایشان با در نظر گرفتن شناور به صورت دو درجه آزادی درگ، تریم دینامیکی، سینکیج، طول کیل خیس‌شده، طول چاین خیس‌شده، توزیع فشار حول بدنه را ارائه نموده و اثر زاویه پله را مورد بحث و بررسی قرار دادند. در این مقاله، اثر دو پله عرضی بر روی عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور پروازی به روش عددی حجم محدود مبتنی بر المان محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از نرم‌افزار انسیس سی‌اف‌ایکس^۷ استفاده می‌شود. جریان سطح آزاد در اطراف بدنه شناور توسط معادلات RANS همراه با مدل اغتشاشی $k-\varepsilon$ کوپل شده با معادلات حجم سیال مدلسازی می‌شود.

به منظور اعتبارسنجی مدل عددی ارائه‌شده، ابتدا مقاومت شناور در سرعت‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی موجود

وانگ و همکاران [۲۴] روش عددی RANS به‌مراه VOF^۱ را برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی به کار گرفتند. لازم به ذکر است که شناور به صورت شش درجه آزادی مورد بررسی قرار گرفت. روش آن‌ها همچنین تاثیر موج را بر روی مولفه‌های هیدرو دینامیکی و ویژگی‌های پیشروی شناور تحت پوشش قرار داد.

ماتویو و همکاران [۲۵] با استفاده از روش پانل^۲ و در نظر گرفتن چشمه‌های هیدرودینامیکی مدلسازی یک شناور پروازی پله‌دار را انجام دادند. مطالعه پارامتری برای بدنه مورد نظر با زوایای ددرايز متفاوت و دو رژیم سرعت مختلف انجام پذیرفت. پیشروی شناور، نسبت نیروهای لیفت به درگ و مولفه‌های مقاومت به صورت مجزا ارائه شده‌اند.

نجفی و همکاران [۲۶] تاثیر اینترسپتور بر روی ضرایب هیدرودینامیکی شناور کاتاماران را شبیه‌سازی نمودند. هدف اصلی پژوهش آنها بدست‌آوردن ضرایب هیدرو دینامیکی ناشی از حرکات طولی از طریق حل دینامیک سیالات محاسباتی بوده و همچنین ارزیابی وجود و عدم وجود اینترسپتور بر روی این ضرایب، که به صورت گسترده‌ای در کنترل حرکت شناور، مؤثر می‌باشد.

دلوکا و همکاران [۲۷] با کد RANS به صورت غیرپایدار روی سه بدنه متفاوت شبیه‌سازی خود را انجام دادند. نتایج آنها حاکی از آن است که قابلیت اطمینان شبیه‌سازی عددی شناور پروازی وابستگی شدیدی به پیش‌بینی مقاومت، ویژگی‌های پیشروی و الگوی موج دارد.

بریزولارا و ورننگو [۲۸] با استفاده از روش VLM^۳ عملکرد هیدرودینامیکی شناورهای کمبردار^۴ را در حالت پایا و به صورت سه بعدی ارائه کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که توزیع طولی کمبر در کف شناور پروازی می‌تواند باعث بالانس لیفت تولیدشده توسط زاویه حمله شده و در واقع انحناى موجود باعث بدست‌آمدن بیشترین کارایی هیدرودینامیکی گردد که این دلیل خود اهمیت بالای طراحی کمبرها را نشان می‌دهد.

جیانگ و همکاران [۲۹] آنالیز مشخصه‌های یک شناور تریماران تونل‌دار را به دو شکل آزمایشگاهی و عددی را انجام دادند. در ابتدا مقاومت، بالآمدگی مرکز ثقل و تریم

^۵ Finite Volume Method

^۶ Boundary Layer Thickness

^۷ Ansys-CFX

^۱ Volume of Fluid

^۲ Panel Method

^۳ Vortex Lattice Method

^۴ Camber

۲-۲- معادلات تسخیر حجمی سطح آزاد

به منظور شبیه‌سازی تغییرشکل‌های پیچیده در سطح مشترک آب و هوا، از مدل VOF استفاده می‌گردد. در این حالت معادله انتقال زیر برای محاسبه نسبت حجمی آب به هوا در هر گام زمانی حل می‌شود.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \bar{v} \cdot (\alpha \bar{u}) = 0 \quad (5)$$

مقادیر α نیز یشرح ذیل می‌باشد.

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{سلول داخل هوا} \\ 0 & \text{سلول داخل آب} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{سلول روی سطح آزاد} \end{cases}$$

در مدل مورد بررسی، چگالی و لزجت موثر در هر سلول از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$\rho_{eff} = \alpha \rho_{air} + (1 - \alpha) \rho_{water} \quad (6)$$

$$v_{eff} = \alpha v_{air} + (1 - \alpha) v_{water} \quad (7)$$

۳- دامنه حل و شرایط مرزی

برای آنالیز معتبر و بدست‌آوردن جواب‌های منطقی، باید شرایط مرزی و شرایط حل مسئله را به صورت دقیق تنظیم کنیم. برای درک بهتر شرایط مرزی، نمایی از دامنه محاسباتی و ابعاد مورد نظر در شکل (۱) نمایش داده شده است. در گام بعدی، شرایط مرزی اعمال شده در نرم‌افزار برای مسئله مورد بررسی مطابق جدول (۱) نمایش داده می‌شود.

جریان اطراف شناور را می‌توان نسبت به صفحه مرکزی بدنه مقارن فرض کرد. بنابراین محاسبات جریان سیال تنها به یک نیم‌دامنه در یک طرف صفحه مرکزی کاهش می‌یابد.

جدول (۱) شرایط مرزی دامنه حل.

جزئیات	نوع شرط مرزی در نرم‌افزار	مرز
Normal speed	Inlet	ورودی هوا و آب
Static pressure	Outlet	خروجی هوا و آب
Free slip	Wall	پایین و مرزهای جانبی
Relative pressure	Opening	بالا
No slip	Wall	شناور
-----	Symmetry	تقارن

مقایسه می‌شوند. سپس نتایج عددی بدست آمده برای توزیع فشار روی بدنه، سطح خیس‌شده، اسپری جریان در مقاطع عرضی مختلف بدنه و پروفیل سطح آزاد ترانسوم شناور ارائه و عملکرد هیدرودینامیکی شناور مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- معادلات حاکم بر مسئله

در این مقاله شناور پروازی با دو پله عرضی در حالت پایدار و آب آرام مورد تحلیل قرار می‌گیرد. شناور دارای سرعت ثابت بوده که برای پیش‌بینی هیدرودینامیک شناور پروازی در آب آرام، شناور به عنوان یک جسم صلب به صورت ثابت در نظر گرفته شده و جریان بدان وارد می‌گردد. بنابراین نیاز است که معادلات حاکم بر جریان آشفته سطح آزاد اطراف شناور به صورت کوپل شده با معادلات روش تسخیر حجمی سطح آزاد حل شوند.

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات حاکم بر جریان سیال عبارتند از معادله پیوستگی و معادله ناویراستوکس، که پس از اعمال روش متوسط گیری رینولدز به این معادلات خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

که در آن ρ چگالی سیال، t زمان و u سرعت جریان است.

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i' u_j'}) + g_i \quad (2)$$

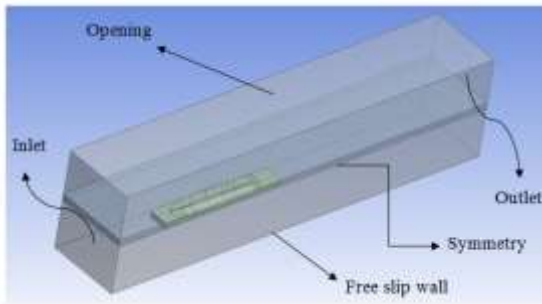
که در آن P فشار، $\rho \overline{u_i' u_j'}$ بیانگر تنش‌های رینولدز و g شتاب جاذبه است. بر اساس نظریه لزجت آشفته که تنش‌های رینولدز و گرادیان‌های سرعت را با هم مرتبط می‌سازد، معادله (۲) به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + g_i \quad (3)$$

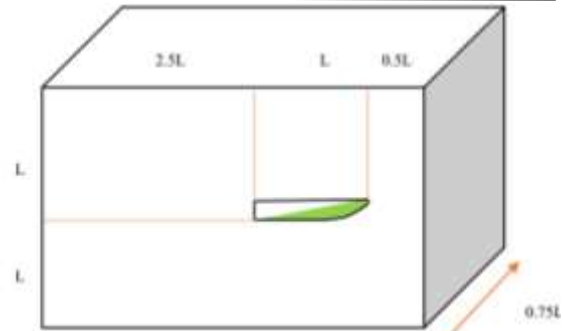
که در آن μ_{eff} لزجت موثر نامیده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (4)$$

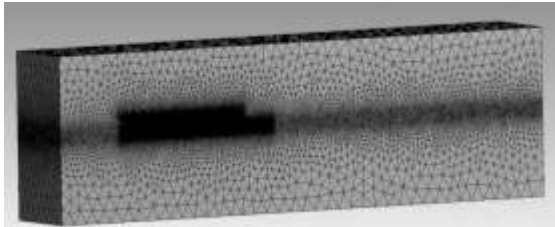
برای مدلسازی اغتشاش از مدل دومعادله‌ای $k - \varepsilon$ استفاده می‌شود که در آن، k معرف انرژی جنبشی جریان آشفته و ε نرخ اضمحلال لزجت انرژی جنبشی آشفته نامیده می‌شود.



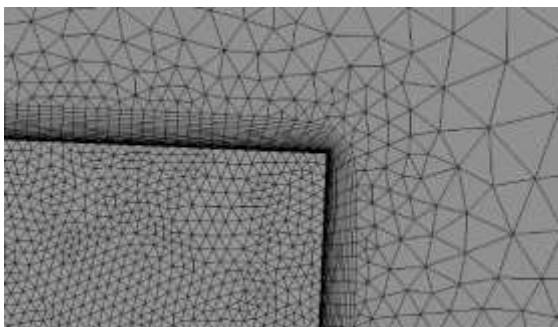
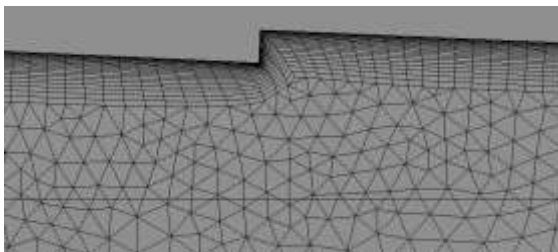
شکل (۲) دامنه حل و شرایط مرزی.



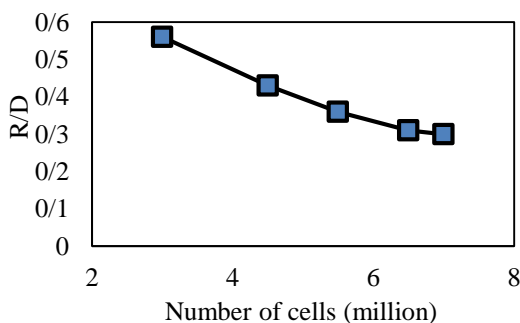
شکل (۱) نمای کلی دامنه محاسباتی.



شکل (۳) نمای کلی شبکه بندی اطراف بدنه.



شکل (۴) نمای نزدیک شبکه بندی اطراف بدنه.



شکل (۵) مقادیر مقاومت نسبت به تعداد المان ها.

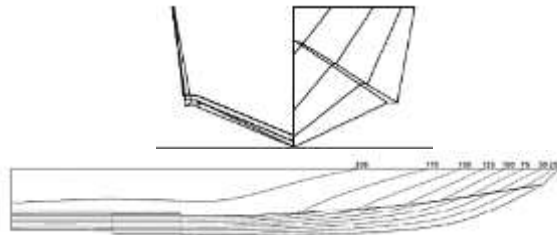
فاصله مرزهای این دامنه از بدنه شناور به گونه ای انتخاب می شود که امکان اعمال شرایط مرزی سازگار با شرایط واقعی روی مرزها وجود داشته باشد. دامنه حل همراه با شرایط مرزی اعمال شده در شکل (۲) نشان داده شده است. شبیه سازی های عددی، به ازای سرعت های مختلف ۴/۰۵، ۵/۱۰، ۶/۲۵، ۷/۱۱، ۸/۱۳، ۹/۱۸ و ۱۰/۱۳ انجام شده است. همچنین، تریم و هیو دینامیکی به عنوان ورودی مسئله در تمامی سرعت ها به شناور اعمال می گردد.

۴- شبکه بندی

مهم ترین مرحله در تمام تحلیل های عددی تولید شبکه محاسباتی است. نوع شبکه و اندازه المان ها در دقت و همگرایی حل تاثیر فراوانی دارد. به دلیل پیچیده بودن هندسه دامنه حل، از یک شبکه بندی غیرسازمان یافته شامل سلول های چهاروجهی برای گسسته سازی دامنه استفاده می شود.

در این تحلیل، ابتدا دو زیردامنه یکی حول شناور و دیگری حول سطح آزاد جریان به منظور بالا بردن دقت حل و ریزتر کردن شبکه در نقاط حساس در نظر گرفته می شود. مش مرزی لبه ها بر روی زیردامنه های تعریف شده اعمال گردیده است. همچنین با توجه به فیزیک مسئله، ضروری است که از مش لایه مرزی روی بدنه شناور استفاده شود تا مدل سازی با درصد خطای کمتری نسبت به حالت واقعی انجام پذیرد. تعداد شبکه ها در دامنه حل به طور متوسط در هر حل تقریباً برابر با ۷ میلیون شبکه بوده است.

در شکل (۳)، نمای کلی شبکه بندی دامنه حل نمایش داده شده است. شکل (۴) نیز شبکه بندی انجام شده حول پله و پاشنه شناور را به ترتیب نمایش می دهد. به منظور بررسی استقلال از شبکه بندی حل بدست آمده، محاسبات در چند شبکه محاسباتی با تعداد سلول های مختلف انجام شده است.



شکل (۶) خطوط بدنه مدل.

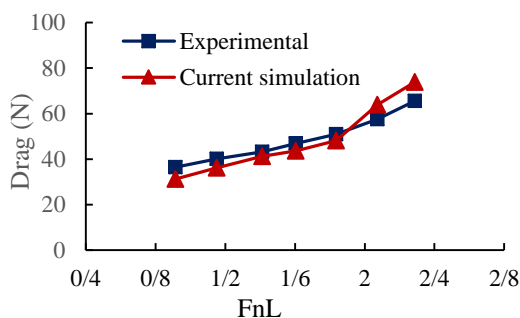
این نمودار انطباق خوبی را بین نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همچنین خطای نسبی شبیه‌سازی‌های انجام شده در سرعت‌های مختلف در جدول (۳) ارائه شده است. علاوه بر این، خطای نسبی متوسط عددی برای نیروی درگ برابر با ۹/۲۴٪ است.

۵-۳- نتایج عددی

پس از اعتبارسنجی مقاومت هیدرودینامیکی شناور توزیع فشار، سطح خیس‌شده‌ی کف شناور، جدایش جریان از چاین در مقاطع عرضی و همچنین الگوی موج اطراف شناور ارائه خواهد شد. پیش‌بینی درست نیروهای هیدرودینامیکی مستلزم تخمین صحیح توزیع فشار روی بدنه می‌باشد. از این رو سعی شده با مش‌بندی مناسب در نقاط حساس تغییرات فشار به خوبی استخراج شود.

جدول (۳) خطای نسبی در محاسبه‌ی مقاومت.

خطای نسبی	سرعت (متر بر ثانیه)
۰/۱۱۸۹۹۳	۴/۰۵
۰/۰۹۵۴۱۷	۵/۱۰
۰/۰۵۹۷۰۷	۶/۲۵
۰/۰۶۸۳۶۲	۷/۱۱
۰/۰۷۱۴۶۱	۸/۱۳
۰/۰۱۰۹۶۴	۹/۱۸
۰/۱۲۳۵۹۶	۱۰/۱۳



شکل (۷) مقایسه نیروی درگ شبیه‌سازی حاضر با نتایج آزمایشگاهی.

به عنوان نمونه، تغییرات نسبت نیروی پسا به جابجایی برحسب تعداد سلول‌های محاسباتی در سرعت ۱۰/۱۳ متر بر ثانیه در شکل (۵) نشان داده شده است.

۵-۵- بحث و نتیجه‌گیری

۵-۱- مشخصات مدل

مطالعه حاضر بر روی یک مدل بدنه شناور سرشی پله‌دار، به نام مدل C2، انجام می‌شود. این مدل در سال ۲۰۱۰ توسط تاونتون و همکاران [۸] آزمایش شده است. مشخصات هندسی این مدل در جدول (۲) آورده شده است. یک تصویر دوبعدی از نمای از بغل و روبروی این مدل نیز در شکل (۶) نمایش داده شده است.

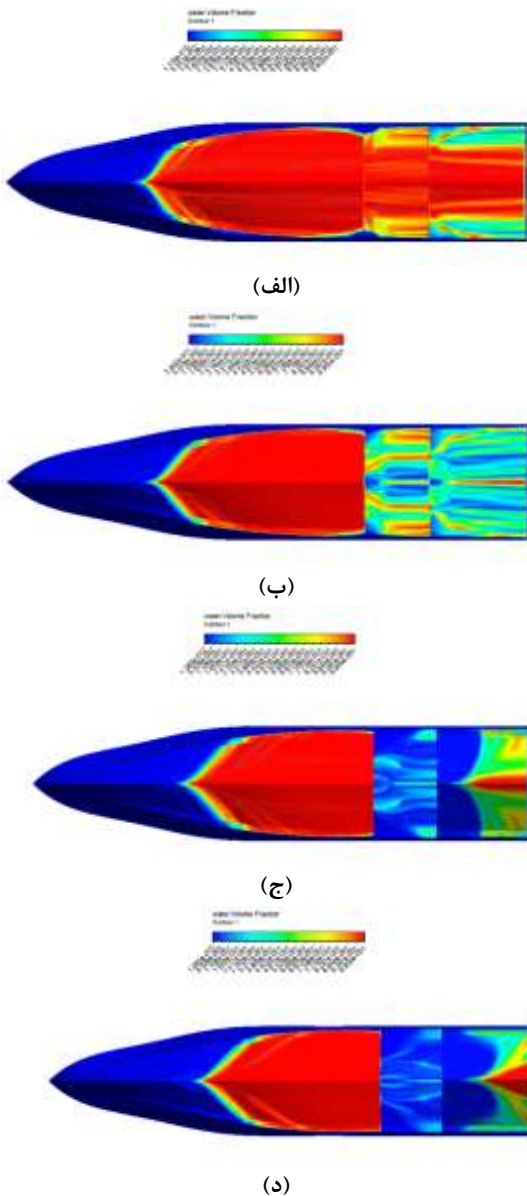
۵-۲- صحت سنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل عددی حاضر، نتایج عددی بدست‌آمده ارائه و با تاونتون و همکاران [۸] مورد مقایسه قرار گرفته است. پس از مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی، مدل عددی اعتبارسنجی شده برای تحلیل شناور در سرعت‌های مختلف بر روی عملکرد هیدرودینامیکی شناور، بکار گرفته می‌شود و نتایج آن در بخش بعد ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرد. نتایج عددی بدست‌آمده برای نیروی درگ در اعداد فرود طولی مختلف به ترتیب در شکل (۷) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است.

جدول (۲) مشخصات مدل مورد بررسی.

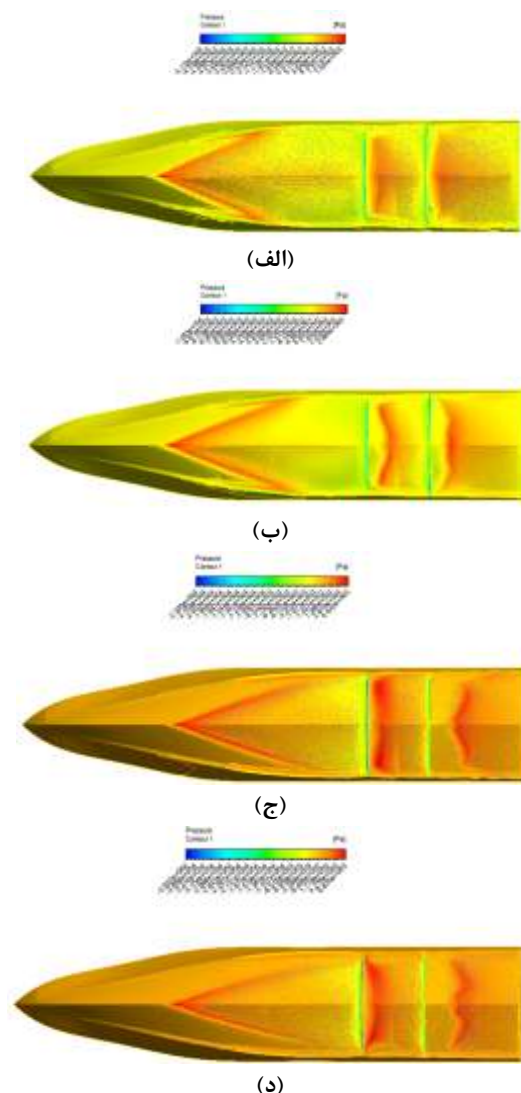
اندازه	پارامتر
۲	طول (متر)
۰/۴۶	عرض (متر)
۰/۰۹	آبخور (متر)
۲۴۳/۴	وزن جابجایی (نیوتن)
۲۲/۵	زاویه ددرایز (درجه)
۴/۳۵	نسبت طول به عرض
۶/۸۶	نسبت طول به ریشه سوم حجم جابجایی
۰/۶۲ و ۰/۴۸	فاصله استپ‌ها بترتیب از پاشنه (متر)
۰/۰۱	ارتفاع استپ‌ها (متر)
۱/۲۷	ممان اینرسی پیچینگ (کیلوگرم-متر مربع)
۰/۷۴۲	فاصله طولی مرکز ثقل از پاشنه (متر)
۰/۰۹۹	فاصله عمودی مرکز از کف (متر)

این است که مقدار فشار در مجاورت چاین در حالت پله‌دار بزرگتر می‌شود که ناشی از جدایش سیال از لبه پله می‌باشد. با توجه به نتایج بدست‌آمده، هنگامی که این اتفاق رخ می‌دهد، جریان از نمای بالا ضخیم‌تر نمایش داده شده که این خود فشار بیشتری را در نزدیکی چاین تولید می‌کند. اگرچه بایستی متذکر شد که روی چاین میزان فشار برابر صفر بوده که این مهم با مشاهدات قبلی مورابیتو نیز مطابقت دارد. در شناورهای پله‌دار به دلیل وجود پله درصد کسر حجمی آب و هوا در کف شناور نسبت به شناورهای بدون پله متفاوت هست. شکل (۹) کسر حجمی آب و هوا در ناحیه کف شناور پله‌دار را نشان می‌دهد.

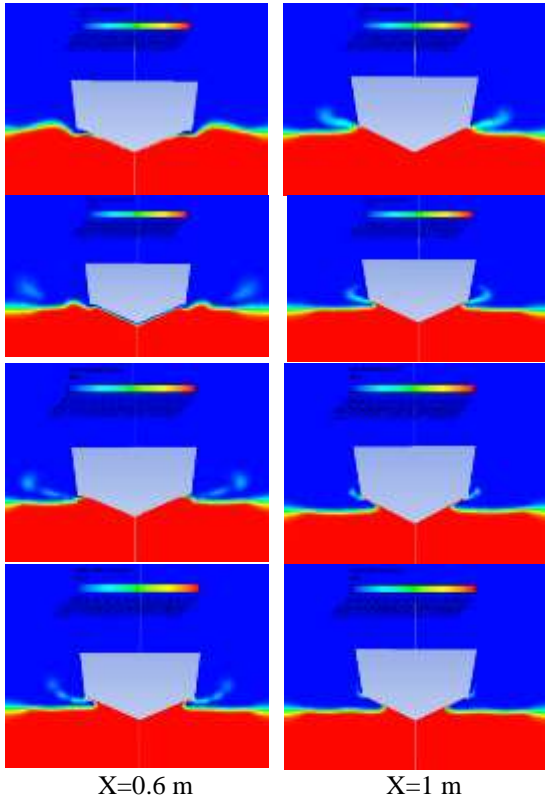


شکل (۹) کانتور سطح خیس شده در سرعت‌های (الف) ۴/۰۵، (ب) ۶/۲۵، (ج) ۸/۱۳ و (د) ۱۰/۱۳ متر بر ثانیه.

در شکل (۸) توزیع فشار در سنترلاین شناور نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های فوق به دلیل فیزیک حاکم بر مسئله و جدایش جریان در ناحیه پله دارای دو نقطه سکون و در پی آن دو ناحیه پر فشار موجود می‌باشد. همچنین می‌توان دید که با افزایش سرعت جریان جدایش بیشتری نیز اتفاق می‌افتد. در عین حال، ناحیه فشاری پشت هر یک از پله‌ها به ازای افزایش سرعت رفته رفته کاهش می‌یابد، که دلیل آن نیز افزایش جدایش جریان می‌باشد. لازم به ذکر است که در حالت بدون پله، به دلیل عدم وجود جدایش در مقایسه با حالت پله‌دار، ناحیه فشار بسیار بزرگتری را می‌توان مشاهده نمود. یکی از تفاوت‌های عمده شناورهای دوپله با تک‌پله و بدون پله که در این قسمت می‌توان به آن اشاره نمود،



شکل (۸) توزیع فشار در سرعت‌های (الف) ۴/۰۵، (ب) ۶/۲۵، (ج) ۸/۱۳ و (د) ۱۰/۱۳ متر بر ثانیه.



شکل (۱۰) جدایش و اسپری آب از چاین در سرعت‌های مختلف بترتیب ۰/۴۱، ۰/۶۲، ۰/۷۵، ۰/۹۱۴ و ۱/۰۱۳ متر بر ثانیه.

مشاهدات نشان می‌دهد که مکانیزم کلی جریان حول سینه در مدل‌های دوپله، تک‌پله و بدون پله مشابه بوده و تغییرات هنگامی ظاهر می‌شوند که صفحات سیال به طور مستقیم در قطرات پاشش^۳ دچار شکستگی یا بریک‌آپ^۴ می‌شوند. با توجه به توپولوژی موج ایجاد شده حول سینه شناور، می‌توان اظهار داشت که نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی پیشین تطابق خوبی دارد.

همچنین، برای مدل دوپله در عدد فرود ۰/۹۱۴، ماکزیمم بالآمدن سطح آزاد برابر با ۰/۰۷۵ بوده که این مقدار برابر با ۰/۰۶۲ در مدل بدون پله می‌باشد. علاوه بر این، ماکزیمم ارتفاع آب پشت مدل دوپله برابر با ۰/۰۷۵ بوده که این مقدار برای شناور بدون پله برابر با ۰/۰۴۱ بدست آمده است. دلیل نتایج حاصله نیز این است که شکل سطح آزاد پشت ترانسوم شناور پروازی تابع زاویه تریم آن صفحه می‌باشد. در شناور دوپله، بدنه پشت پله دارای زاویه تریم محلی^۵ به جای زاویه تریم حاصل از بدنه جلویی می‌باشد.

اگر مقدار کسر حجمی برابر یک باشد یعنی تمام حجم سلول را آب در بر گرفته است. نتایج بیانگر کاهش ناحیه خیس بدنه پس از پله با افزایش سرعت می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت، سطح خیس شده کاهش و طول هوادهی پشت پله افزایش می‌یابد. با توجه به شکل در اعداد فرود کوچکتر، پله تأثیر قابل ملاحظه‌ای را در جدایش جریان نزدیکی چاین نداشته است. همچنین، در اعداد فرود بالا، قسمت میانی شناور (دقیقاً بین دو پله) دارای سطح خیس کمتری می‌باشد. هنگامی که کیل قسمت پاشنه خیس شده باشد، عدد فرود به طور نسبی بالا خواهد بود و با توجه به نتایج، فشار زیادی را در قسمت پاشنه به همراه خواهد داشت.

با بررسی کانتور جریان حول پاشنه در می‌یابیم که پدیده چرخشی شدن سیال^۱ در قسمت خیس نشده پشت پله اتفاق می‌افتد، که این ورتکس‌ها در سرعت‌های بالاتر بیشتر به چشم می‌آیند. در نواحی خیس نشده پشت استپ، یکی از ورتیسیتیه‌های داخل حباب هوا در سطح مشترک هوا و آب محو شده و به نوعی دیگر از ورتکس تبدیل شده و در داخل ویک آب توسعه می‌یابد. جدایش و اسپری آب از چاین از دیگر نتایج مورد بررسی خواهد بود. در شکل (۱۰) کسر حجمی آب و هوا در دو مقطع عرضی شناور پله‌دار نشان داده شده است. با توجه به شکل، میزان بالآمدگی جریان حول بدنه در سرعت‌های مختلف متفاوت بوده و در مقایسه با حالت شناور بدون پله کاهش میزان بالآمدگی جریان حول مقاطع عرضی‌ای را شاهد خواهیم بود که دقیقاً پشت پله قرار گرفته است. عبارتی دیگر، کاهش میزان ریزآپ^۲ در مقایسه با حالت بدون پله محسوس خواهد بود. به دلیل حرکت شناور آب اطراف بدنه تغییر شکل یافته و از الگوی نسبتاً منظمی پیروی می‌کند. شکل (۱۱) این الگوی موج اطراف بدنه شناور را نمایش می‌دهد. همان طوری که دیده می‌شود با افزایش سرعت، زاویه پخش موج کمتر و میزان فرو رفتگی موج پشت پاشنه بیشتر می‌شود که این تغییرات با فیزیک واقعی حرکت شناور در آب تطابق دارد. همانطور که توقع می‌رود، فیزیک شکل‌گیری و شکستگی یک صفحه سیال آشفته با در نظر گرفتن اسپری سینه یکی از مسائل پیچیده جریان چندفازی می‌باشد.

⁴ Break up

⁵ Local Trim Angle

¹ Vortical Flow Phenomena

² Rise up

³ Spray Droplet

شده‌اند. این شناور را در شرایط سینک و تریم قرار میدهند تا جایی که بتواند تعادل خود را در سرعت‌های بالا به ازای کاهش مقاومت اصطکاکی حفظ نماید. کنترل مناسب روی شبکه‌ها، کاهش اندازه کلی دامنه محاسباتی از جمله مواردی است که بایستی مشکلات ناشی از اندرکنش مرز و جریان و کاهش زمان محاسبات را حل کند و همچنین فرض عدم تأثیر مخرب عمق کم را ارضاء نماید. در این مقاله، آثار دو پله عرضی بر روی عملکرد هیدرو دینامیکی یک شناور پروازی چاین دار به روش عددی حجم محدود مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور جریان سطح آزاد آشفته در اطراف بدنه شناور با استفاده از معادلات RANS همراه با مدل آشفتگی Standard k- ϵ کوپل شده با معادلات VOF به کمک نرم افزار انسیس سی اف ایکس شبیه سازی گردید. به منظور اعتبارسنجی مدل عددی حاضر، نتایج عددی محاسبه شده در سرعت‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه گردید. سپس نتایج عددی بدست آمده برای پارامترهای هیدرو دینامیکی اصلی شناور در سرعت‌های مختلف ارائه و کانتورهای سطح خیس شده، توزیع فشار، پاشش جریان و الگوی موج اطراف بدنه مورد بحث و بررسی قرار گرفتند. با توجه به نتایج محاسبات می توان موارد زیر را ارائه نمود:

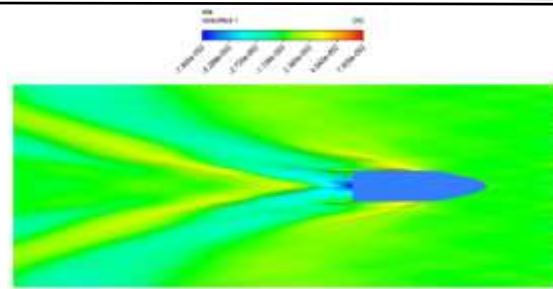
۱- نیروی درگ بدست آمده تطابق خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد و خطای نسبی متوسط در حدود ۹ درصد می باشد.

۲- سطح خیس شناور با افزایش سرعت شناور کاهش می یافت که این موضوع با فیزیک واقعی مسئله تطابق خوبی دارد.

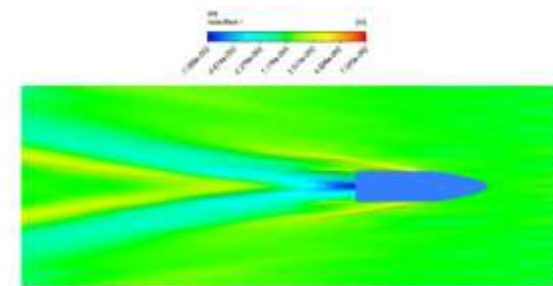
۳- با توجه به نتایج بدست آمده در اعداد فرود پایین تر، پله نقش مثبتی را ایفا نمی کند، اما با افزایش سرعت شناور، کاهش پارامتر سطح خیس شده بشدت محسوس می باشد. ۴- الگوی موج اطراف بدنه ترسیم شده و مشاهده گردید که با افزایش سرعت شناور زاویه پخش موج کمتر و میزان فرو رفتگی موج پشت پاشنه بیشتر می شود.

۵- شناور پروازی دوپله در مقایسه با مدل های تک پله و بدون پله از نیروی مقاومت کمتری برخوردار بوده که این مهم در اعداد فرود طولی بزرگتر از ۱/۸۳۵ به شدت محسوس است.

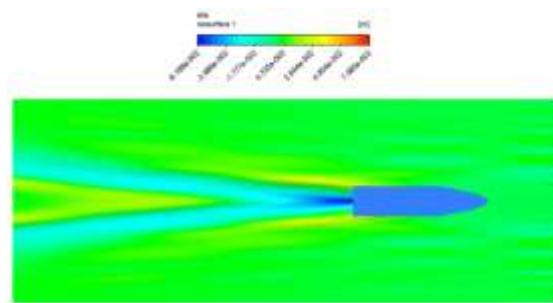
۶- با توجه اینکه افزایش پله باعث کاهش درگ اصطکاکی



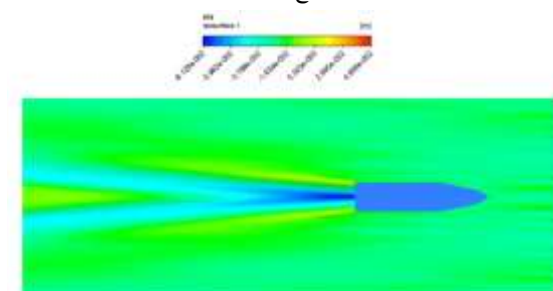
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۱۱) الگوی موج تولید شده اطراف بدنه شناور در سرعت‌های (الف) ۴/۰۵، (ب) ۶/۲۵، (ج) ۸/۱۳ و (د) ۱۰/۱۳ متر بر ثانیه.

همچنین، طبق نتایج وقتی که جریان از پشت ترانسوم جدا می شود، ترانسوم را با زاویه تریم بزرگتری رها کرده که این امر خود سبب افزایش ارتفاع آب در آن ناحیه می شود.

۴-۵- جمع بندی نتایج

شناورهای پروازی به عنوان یک فرم بدنه مناسب و بادوام به منظور استفاده از مزیت‌های فشار هیدرو دینامیکی تولید

μ_{eff} [kg/ms]	ویسکوزیته موثر	می‌شود، اما با این وجود افزایش درگ فشاری را نیز به همراه خواهد داشت.
μ_t [kg/ms]	ویسکوزیته توربولنت	
τ [N/m ²]	تنش برشی	۷- با توجه به کانتور فشار ارائه شده می‌توان گفت که شناور دوپله دارای سه پیک فشار ماکزیمم بوده و مقادیر فشار در نقاط مذکور در مقایسه با حالات تک‌پله و بدون پله که به ترتیب دارای دو و یک پیک فشار هستند، کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌گردد که در ناحیه نزدیک به ترانسوم در شناور بدون پله، فشار هیدروستاتیک از حساسیت بالایی برخوردار می‌باشد که در تولید نیروی لیفت نیز تاثیر بسزایی خواهد داشت. این در حالی است که در شناور دوپله فشار هیدروستاتیک نقش موثری را ایفا نمی‌کند.
$\rho u'_i u'_j$ [N/m ²]	تنش‌های رینولدز	
ε	نرخ اضمحلال لزجت انرژی جنبشی آشفته	
α	ضریب انتقال حجمی	

۷- مراجع

- [1] Savitsky, D. "Hydrodynamic Design of Planing Hulls", Marine Technology, Vol.1, pp.71-95, 1964.
- [2] Fridsma, G., "A Systematic Study of the Rough Water Performance of Planing Boats (regular waves-part I), Davidson Laboratory, 1969.
- [3] Fridsma, G., "A Systematic Study of the Rough Water Performance of Planing Boats (irregular waves-part II), Davidson Laboratory, 1971.
- [4] Savitsky, D., and Brown, W., "Procedure for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water", Marine Technology, Vol.13, pp.381-400, 1978.
- [5] Katayama, T. Hayashita, S. Suzuki, K., and Ikeda, Y., "Development of Resistance Test for High-Speed Planing Craft using Very Small Model Scale Effects on Drag Force", Proceeding of AP Hydro, pp.7-14, 2002.
- [6] Savitsky, D. DeLorme, M.F., and Datla, R., "Inclusion of Whisker Spray Drag in Performance Prediction Method for High-Speed Planning Hulls", Marine Technology, Vol.56, pp.35-56, 2007.
- [7] Savitsky, D., and Morabito, M. "Surface Wave Contours Associated with the Forebody Wake of Stepped Planning Hulls", Marine Technology, Vol.47, pp.1-16, 2009.
- [8] Taunton, D. Hudson, D., and Sheno, R. "Characteristics of a Series of High-speed Hard Chine Planning Hulls-Part I: Performance in Calm Water", International Journal of Small Craft Technology, Vol.152, pp.55-75, 2011.
- [9] Lee, E. Pavkov, M., McCue-Weil, L., "The Systematic Variation of Step Configuration and Displacement for a Double-Step Planning Craft", Journal of Ship Production and Design, Vol.30, pp.89-97, 2014.
- [۱۰] سالاری، محمود، سیف، محمدسعید و تیموری، مهدی. تحلیل تجربی تاثیر هوادهی به پله های عرضی شناورهای تندرو سرشی بر کاهش قله منحنی مقاومت آنها، فصلنامه علمی-پژوهشی دریافنون، دوره ۲، شماره ۱، ۱۳۹۴.
- [11] Seif, M.S. Mehdigholi, H., and Najafi, A. "Experimental and Numerical Modeling of the High Speed Planing Vessel Motion", Journal of

۶- فهرست علائم

U [m/s]	سرعت شناور
L [m]	طول شناور
B [m]	عرض شناور
T [m]	آبخور
Δ [N]	وزن جابجایی
LCG [m or %L]	فاصله طولی مرکز ثقل شناور از پاشنه
VCG [m]	فاصله عمودی مرکز ثقل شناور از کف
L/B	نسبت طول به عرض
$\frac{L}{\sqrt[3]{V}}$	نسبت طول به ریشه سوم حجم جابجایی
C_L	خط مرکزی شناور
u [m/s]	سرعت جریان
t [s]	زمان
P [N/m ²]	فشار
g [m/s ²]	شتاب ثقل
k	انرژی جنبشی جریان آشفته
P_k	تولید اغتشاش ناشی از نیروهای لزج
$Fn_L = \frac{U}{\sqrt{gL}}$	عدد فرود طولی
R [N]	نیروی مقاومت
R/D	نسبت مقاومت به جابجایی
$\left \frac{R_{Sim} - R_{Exp}}{R_{Exp}} \right \times 100$	خطای نسبی
β [deg]	زاویه ددرایز شناور
ρ [kg/m ³]	چگالی
v [m ² /s]	ویسکوزیته سینماتیک
ρ_{eff} [kg/m ³]	چگالی موثر

- Stepped Hulls", *Journal of Engineering for Maritime Environment*, pp.1-7, 2015.
- [26] Najafi, A., Alimirzazadeh, S., and Seif, M.S. "RANS Simulation of Interceptor Effect on Hydrodynamic Coefficients of Longitudinal Equations of Motion of Planing Catamarans", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol.37, pp.1257-1275, 2015.
- [27] DeLuca, F. Mancini, S. Miranda, S. and Pensa, C. "An Extended Verification and Validation Study of CFD Simulations for Planning Hulls", *Journal of Ship Research*, Vol.60, pp.101-118, 2016.
- [28] Brizzolara, S. and Vernengo, G. "A Three-Dimensional Vortex Method for the Hydrodynamic Solution of Planning Cambered Dihedral Surfaces", *Journal of Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol.63, pp.15-29, 2016.
- [29] Jiang, Y. Sun, H. Zou, J. Hu, A. and Yang, J. "Analysis of Tunnel Hydrodynamic Characteristics for Planning Trimaran by Model Tests and Numerical Simulations", *Ocean Engineering*, Vol.113, pp.101-110, 2016.
- [30] Bakhtiari, M. Veysi, S., and Ghassemi, H. "Numerical Modeling of the Stepped Planing hull in Calm Water", *International Journal of Engineering Transactions B: Application*, Vol.29, pp.236-245, 2016.
- [31] Mansoori, M. Fernandes, A.C., Ghassemi, H. "Interceptor Design for Optimum Control and Minimum Resistance of Planing Boats", *Applied Ocean Research*, Vol.69, pp.100-115, 2017.
- [32] Nourghasemi, H. Bakhtiari, M. Ghassemi, H. "Numerical Study of Step Forward Swept Angle Effects on the Hydrodynamic Performance of a Planing Hull", *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, Vol.51, pp.35-42, 2017.
- Marine Engineering and Technology*, Vol.13, pp.62-72, 2014.
- [12] Milwitzky, B., "A Generalized Theoretical and Experimental Investigation of the Hydrodynamic Loads Experienced by V-bottom Seaplanes During Step Landing Impacts", NACA TN1516, 1948.
- [13] Schnitzer, E. "Theory and Procedure for Determining Loads and Motions in Chine-Immersed Hydrodynamic Impacts of Prismatic Bodies", NACA TN1152, 1953.
- [14] Zarnick, E.E., "A Non-Linear Mathematical Model of Motion of a Planing Boat in Regular Waves", David Taylor Naval Ship Research and Development Center, Report No. AD-A052039, 1978.
- [15] Akers, R.A., "Dynamic Analysis of Planing Hulls in the Vertical Plane", In Meeting of the New England Section of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1999.
- [16] Kiahara, H., "A Computing Method for the Flow Analysis Around a Prismatic Planning Hull", In: 5th International Conference of High Performance Marine Vehicles, 2006.
- [17] Ghassemi, H. Ghiasi, M. "A Combined Method for the Hydrodynamic Characteristics of Planing Crafts", *Ocean Engineering*, Vol.35, pp.310-322, 2008.
- [18] Yengejeh, M.A. Mehdigholi, H., and Seif, M.S. "Planing Craft Modeling in Forward Acceleration Mode and Minimization of Time to Reach Final Speed", *Ships and Offshore Structures*, Vol.10, pp.132-144, 2014.
- [19] Caponetto, M. "Practical CFD Simulations for Planning Hulls", In: HIPER Germany, 2001.
- [20] Azcueta, R., "Steady and Unsteady RANSE Simulations for Littoral Combat Ships", In: Proceeding of 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, 2004.
- [21] Savander, B.R. Maki, K.J., Land, J. "The Effects of Deadrise and Deadrise Variation on Planning Hull Performance", In: Proceeding of 2nd Chesapeake Power Boat Symposium, USA, 2010.
- [22] Sun, H., and Faltinsen, O.M. "Numerical Study of Planning Vessels in Waves", *Journal of Hydrodynamics*, Vol.22, pp.468-475, 2010.
- [23] Brizzolara, S., and Serra, F., "Accuracy of CFD Codes in the Prediction of Planning Surface Hydrodynamic Characteristics", INSEAN (Italian Ship Model Basin), 2011.
- [24] Wang, S., Su, Y., Wang, Z., Zhu, X., and Liu, H. "Numerical and Experimental Analysis of Transverse Static Stability Loss of Planning Craft Sailing at High Forward Speed", *Journal of Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol.8, pp.44-54, 2014.
- [25] Matveev, K., and Bari, G. "Effect of Deadrise Angles on Hydrodynamic Performance of a