بررسی عددی اثر برخی از پارامترهای ابعادی پایدارساز هیدروفویلی در کاهش ناپایداری طولی شناور تندرو سُرشی

محسن سعیدی نمینی[۱] ، احمدرضا کهنسال[۲]*

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معماری کشتی، دانشگاه خلیج‌فارس بوشهر، mohsen.saeedinamin@gmail.com
[۲] استادیار گروه مهندسی دریا، دانشگاه خلیج‌فارس بوشهر، kohansal@pgu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله:۱۴۰۲/۱۱/۱۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹
تاریخ انتشار مقاله:۱۴۰۳/۰۴/۱۰

کلمات کلیدی:
شناور تندرو سُرشی
پایداری طولی
پایدارساز هیدروفویلی
پورپویزینگ
حرکات دینامیکی

چکیده

یکی از چالش‌های مهم در طراحی و ساخت شناورهای تندرو سُرشی، بروز ناپایداری طولی در سرعت‌های بالا است. ازجمله روش‌هایی که می‌تواند در کاهش و یا از بین بردن این ناپایداری‌ها مورد استفاده قرار گیرد، استفاده از پایدارساز هیدروفویلی است. در این تحقیق، به بررسی تأثیر برخی از ابعاد پایدارساز هیدروفویلی بر رفتار دینامیکی شناور تندرو سُرشی تک بدنه پرداخته شده است. ابتدا، یک شناور تندرو سُرشی تک بدنه که به‌صورت تجربی دارای ناپایداری طولی (پورپویزینگ) بوده، مدل‌سازی شده است. هر یک از این پارامترها به کمک نرم‌افزارهای طراحی هندسه در موقعیت خود مدل‌سازی شده است. از یک حل‌گر دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی عددی مسئله استفاده شده است. در این مقاله تلاش شده است که با مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی و بررسی نتایج مربوط به حرکات هیو و پیچ شناور، به درجه‌ی اهمیت هر یک از پارامترهای طراحی پی برده شود. در این مرحله، جهت بررسی پارامترها، زاویه حمله صفر درجه، فاصله عمودی هیدروفویل تا کف پاشنه شناور ۱۵ سانتیمتر و فاصله طولی هیدروفویل از ترانزوم ۱۰ سانتیمتر فرض شده است. یکی از پارامترهایی که در شبیه‌سازی تأثیر آن بررسی گردیده، نسبت ابعاد عرض به طول کورد هیدروفویل با سطح مقطع ثابت است. از مقایسه نتایج بین سه نسبت ۰,۷۵، ۱,۳۳ و ۲,۰۸۳ مشخص شد، که دامنه حرکت نمودار پیچ نسبت به حالت بدون هیدروفویل در زمان ۳ ثانیه به ترتیب ۵۰، ۳۶,۶ و ۶۳,۳ درصد کاهش یافته است. بنابراین مشاهده می شود که افزایش نسبت عرض به طول کورد هیدروفویل در کاهش ناپایداری طولی مؤثر بوده است. پارامتر دیگری که در گام بعدی مورد ارزیابی قرار گرفت، اثر مقدار عرض میانی هیدروفویل‌زاویه‌دار بود. با مقایسه اثر انتخاب سه اندازه‌ی ۸، ۱۶ و ۲۴ سانتیمتر برای عرض میانی هیدروفویل مشخص گردید، که دامنه حرکت پیچ، نسبت به حالت بدون هیدروفویل در زمان ۳ ثانیه، به ترتیب ۶۳,۳، ۶۸,۳ و ۶۳,۳ درصد کاهش یافته است. هرچند نسبت متوسط ۱۶ سانتیمتر ، کارایی بهتری را نشان می‌دهد؛ اما به‌طورکلی تغییر این پارامتر، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در کاهش ناپایداری طولی شناور ایجاد نکرده و اختلاف کمی در دامنه حرکت پیچ و هیو شناور بین سه حالت اتفاق افتاده است.

Numerical investigation of the effect of some dimensional parameters of hydrofoil stabilizer in reducing the longitudinal instability of planing craft

Mohsen Saeedi Namini[1], Ahmadreza Kohansal[2*]

[1] M.Sc. Student, Persian Gulf University; Mohsen.saeedinamini@gmail.com
[2] Assistant Professor, Department of Marine Engineering, Persian Gulf University; kohansal@pgu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 31 Jan 2024
Accepted: 29 Jun 2024
Available online: 30 Jun 2024

Keywords:

ABSTRACT

One of the important challenges in the design and construction of planing craft is the occurrence of longitudinal instability at high speeds. Among the methods that can be used to reduce or eliminate these instabilities is the use of hydrofoil stabilizer. In this research, the influence of the dimensions of the hydrofoil stabilizer on the dynamic behavior of the mono-hull planing craft has been investigated. The vessel studied in this research is a planing mono-hull craft, which experimentally has longitudinal instability. The influence of the speed on the effect of porpoising on the planing craft is also studied.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.1]

Planing craft
longitudinal stability
Hydrofoil Stabilizer
Porpoising
Dynamic Motions

The purpose of this study was to analyze the performance of a high-speed planing craft with a hydrofoil stabilizer and determine the best dimensions of the hydrofoil stabilizer. In this research, the parameters of hydrofoil dimensional ratios and middle width ratio in stingray type hydrofoils have been investigated. Each of these parameters is modeled in its position with the help of a CAD software. A computational fluid dynamics solver has been used for the numerical simulation of the problem. In this article, an attempt has been made to understand the importance of each of the design parameters by comparing the results of the simulation and examining the results related to pitch and heave motions of the planing craft. At this stage, in order to check the parameters, the angle of attack is 0 degrees, the depth of the hydrofoil to the transom of the boat is 15 cm, and the longitudinal distance of the hydrofoil from the transom is assumed to be 10 cm. One of the investigated parameters is the width to the chord length ratio of the hydrofoil, which has a fixed cross section. From the comparison of the results between the three ratios of 0.75, 1.33 and 2.083, it was found that at a speed of 30 knots and in a time of 3 seconds, the range of pitch movement has been reduced by 50, 36.6 and 63.3%, respectively, compared to the case without hydrofoil. Therefore, it can be seen that increasing the width to the chord length ratio of the hydrofoil has been effective in reducing the longitudinal instability. Another parameter that was investigated is the middle width of the angular hydrofoil. By comparing the three sizes of 8, 16 and 24 cm for the middle width of the stingray type hydrofoil, it was found that at a speed of 30 knots and in a time of 3 seconds, the range of motion of the pitch diagram has decreased by 63.3, 68.3 and 63.3% respectively compared to the state without hydrofoil. Although the average ratio of 16 cm shows better efficiency; but in general, the change of this parameter did not make a significant difference in the reduction of the longitudinal instability of the boat, and there was a slight difference in the range of the pitch and heave motions between the three cases.

۱- مقدمه

در شناور تندرو سُرشی، با افزایش سرعت، وزن شناور به‌جای نیروی هیدرواستاتیکی، بیشتر توسط نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر کف شناور تحمل می‌شود. تحت اثر این نیروها، بدنه شناور در سرعت کافی بر روی سطح آب بالا آمده و روی آن حرکت می‌کند [۱]. این رفتار منجر به کاهش سطح خیس بدنه و کاهش نیروی مقاومت می‌گردد. معمولاً شناورهای تندرو در محدوده‌ی سرعت‌های بالا و در حالت سُرش، با جابجایی بین مرکز فشار دینامیکی و مرکز جرم در شناور باعث ایجاد نوعی از ناپایداری‌های طولی به نام پورپویزینگ می‌شوند. پورپویزینگ در واقع کوپر حرکات ناپایدار هیو و پیچ است [۲]. یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که بر عملکرد شناور مؤثر است، زاویه‌ی تریم دینامیکی است؛ که وابسته به‌سرعت شناور است [۳]. زاویه‌ی تریم دینامیکی، تأثیر مهمی بر مقاومت هیدرودینامیکی و رفتار شناور داشته و نقش مهمی را در پایداری طولی شناور ایفا می‌کند. افزایش یا کاهش زاویه‌تریم دینامیکی به دلیل تأثیر روی سطح خیس، سبب تغییر در مقاومت شناور نیز خواهد شد. روش‌های مختلفی برای جلوگیری یا کاهش پورپویزینگ شناورها وجود دارد، که اغلب با کاهش تریم دینامیکی شناور و به تعادل رساندن گشتاور ناشی از نیروهای هیدرودینامیکی و وزن همراه است [۴]. برخی از راهکارهای مرتبط با کاهش تریم دینامیکی، شامل کاهش زاویه‌تریم، جابجایی مرکز ثقل، استفاده از تریم تب، کاهش سرعت، افزایش زاویه‌ی خیز کف، کاهش ضریب منظری بدنه می‌باشند. یکی از روش‌های اقتصادی در رفع ناپایداری پورپویزینگ شناور سُرشی، استفاده از پایدارساز هیدروفویلی در پاشنه‌ی شناور، و درنتیجه آن، کاهش حرکات پیچ و هیو شناور است. این نوع پایدارساز هیدروفویلی با نام‌های دوباله‌ای، سفره‌ماهی و دم نهنگی نیز معروف هستند. شاید بتوان گفت ازجمله اولین تلاش‌ها برای ساخت این نوع از صفحات هیدروفویلی توسط کینگ و لاکوود [۵] به‌منظور کاهش کاویتاسیون اختراع شده باشد. نمونه دیگری از این نوع هیدرو فویل‌ها جهت پایدارسازی شناور، توسط لارسون [۶] اختراع گردیده، و هر دو اختراع در اداره ثبت اختراع امریکا ثبت شده است. در این پژوهش به بررسی دینامیکی این نوع پایدارساز هیدروفویلی پرداخته شده است. مطالعات این پژوهش بر اساس مقالات و پژوهش‌های مرتبط با شناور سُرشی، ناپایداری طولی و هیدروفویل جمع‌بندی شده است. پایدارساز هیدروفویلی یک نمونه‌ی متفاوت از هیدروفویل‌ها است، که در بالای پروانه شناور نصب شده و ساختار و عملکرد آن به میزان قابل‌توجهی مشابه تریم تب است. پایدارساز هیدروفویلی به دلیل ثابت بودن و نصب آسان، نسبت به تریم تب، هزینه ساخت و نصب کمتری دارد. بنابراین پژوهش‌های مرتبط با تریم تب می‌تواند کمک شایانی در بررسی پایدارساز هیدروفویلی نماید. یکی از اولین تحلیل‌های تجربی سیستماتیک روی شناورهای سُرشی با بدنه منشوری توسط دی و هاگ [۷] انجام شد. این بدنه‌ها طیف وسیعی از پارامترهای طراحی را شامل می‌شدند. نتایج این کار به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان یک راهنما در تخمین محدوده پورپویزینگ در شناور سُرشی با بدنه منشوری استفاده شده است. ساویتسکی [۸] روشی را برای پیش‌بینی مقاومت شناور تندرو سُرشی با بدنه منشوری ارائه کرد. روش ساویتسکی شامل تکنیک‌های اندازه‌گیری دریامانی و معادلات مومنتوم انرژی برای تشخیص نقاط تعادل است. همچنین او روشی را نیز برای ارزیابی رخ دادن پورپویزینگ ارائه کرد. مارتین [۹]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.1]

زاویه‌تریم و ضریب سرعت را برای قایق‌های سُرشی با بدنه منشوری را باوجود پورپویزینگ به‌صورت تئوری پیش‌بینی نمود. ساویتسکی [۱]، مجدداً به مسئله طراحی و تحلیل شناورهای سُرشی پرداخت. از مقالات پرکاربردی که تأثیر پله عرضی را در عملکرد قایق‌های سُرشی موتوری بررسی کرده است، می‌توان به مقاله‌ی کلمنت و کولبل [۱۰]، که در انجمن معماران و مهندسان دریایی میامی امریکا ارائه شد، اشاره نمود. قدیمی و همکاران [۱۱]، نیز به بررسی تاثیر بر نیرو و ممان حرکتی شناور تندرو تک بدنه پرداختند. در این پژوهش شناور با دو پله عرضی و بدون پله عرضی و با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی با هم مقایسه شدند.

بررسی مسئله دینامیک شناور سُرشی در امواج نامنظم دریا و همچنین روش اندازه‌گیری دریامانی شناور سُرشی در دریا توسط زراعتگر و همکاران [۱۲] ارائه شده است. در این مطالعه، روابط حاکم ما بین مقادیر اندازه‌گیری شده شتاب خطی و نرخ سرعت زاویه‌ای در مختصات محلی و آنچه به‌عنوان سرج، اسوی، هیو، رول، پیچ و یاو در سیستم مختصات هیدرودینامیکی شناخته می‌شود، برای شناور سُرشی تدوین شده است. رحمن ستایش و همکاران [۱۳] به بررسی تأثیر چاین بر عملکرد شناورهای سُرشی پرداختند. ایشان از شبیه‌سازی عددی برای تحلیل جریان پیرامون شناور سُرشی موردنظر، استفاده کردند. آن‌ها در این پژوهش، با محاسبه نیروی مقاومت بدنه، نیروی لیفت، زاویه پیچ و مقدار هیو شناورهای سُرشی و با شبیه‌سازی رفتار هیدرودینامیکی شناور سُرشی، به معرفی چاین بهینه پرداختند. پایش ناپایداری‌های دینامیکی به وجود آمده در یک شناور دو بدنه نیمه سُرشی و کاهش دامنه‌ی این حرکات با استفاده از گوه‌ی پاشنه توسط یوسفی فرد و همکاران [۱۴] انجام شد. این کار با استفاده از تحلیل مدل در اعداد فرود متفاوت در دو حالت بدنه‌ی اولیه و بدنه‌ی مجهز به گُوِه انجام گرفته است. مشاهده شد که نصب گُوِه در پاشنه‌ی شناور اثر بسیار مثبتی در کاهش دامنه‌ی ناپایداری حرکات شناور در آب آرام داشته است. جهت پیش‌بینی شروع پدیده پورپویزینگ در شناورهای سُرشی، فرمولی تجربی برای محاسبه زاویه‌تریم بحرانی توسط سلانو [۱۵] ارائه شد. کاتایاما و ایکدا [۱۶]، آزمایش‌های تجربی برای بررسی نیروهای هیدرودینامیکی وارد شده بر یک شناور دارای پورپویزینگ را تا عدد فرود ۶ و در آب آرام انجام دادند. در این پژوهش، نیروهای هیدرودینامیکی مؤثر بر پورپویزینگ شناور به‌صورت غیرخطی محاسبه و مدل‌سازی شد. همچنین کاتایاما [۱۷]، تکنیک‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی ناپایداری دینامیکی شناورهای تندرو را مورد بررسی قرار داد. همچنین او در مقاله‌ای [۱۸]، مکانیزم ناپایداری ناشی از پورپویزینگ را بر اساس معادلات حرکت در شناورهای تندرو تحلیل کرد. از دیگر تحقیقات مرتبط با پدیده پورپویزینگ می‌توان به پژوهش سان و فالتینسن [۱۹] اشاره نمود؛ که در آن به مطالعه پدیده پورپویزینگ و رفتار دینامیکی شناورهای سُرشی در آب آرام پرداختند. در این مقاله آن‌ها ضرایب هیدرودینامیکی را با استفاده از تئوری 2D+t، و روش اجزاء مرزی در شرایط سطح آزاد کاملاً غیرخطی محاسبه کردند. همچنین این دو محقق در پژوهش دیگری، نحوه پیش‌بینی شروع پدیده پورپویزینگ در شناورهای سُرشی را مورد مطالعه قرار دادند [۲۰]. از ویژگی این مقاله می‌توان به محاسبه محدوده‌های پورپویزینگ با روش آنالیز خطی و شبیه‌سازی آن به روش دامنه زمانی غیرخطی اشاره کرد. از پژوهش‌های مرتبط با تریم تب، می‌توان به مقاله‌ای که توسط قدیمی و همکارانش [۲۱] انجام گردید، اشاره نمود. در این مقاله، تأثیرات تریم تب در حرکت تریم و مقاومت بدنه شناور سُرشی به‌صورت پارامتریک موردمطالعه قرار گرفت. در این تحقیق، آن‌ها اثرات طول دهانه، مقاومت و زاویه‌تریم دو شناور سُرشی سبک و سنگین را با هم مقایسه نمودند. یکی دیگر از روش‌های مهار پورپویزینگ، استفاده از اینترسپتور است. در پژوهشی که توسط منصوری و فرناندس [۲۲] ارائه شد، تأثیر هیدرودینامیکی اینترسپتورها در مهار پورپویزینگ مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، در محاسبات از روش‌های عددی و تئوری پورپویزینگ ساویتسکی نیز استفاده شد. زیوشینگ و همکارانش [۲۳]، تأثیر موقعیت نصب هیدروفویل‌های ثابت در دریامانی شناور را به‌صورت عددی بررسی نمودند. در این مقاله از شبیه‌سازی عددی برای بررسی اثرات پارامترهای هیدروفویل، مانند، زاویه حمله و ارتفاع نصب بر عملکرد دریامانی استفاده شده است. مطالعه عددی برای شبیه‌سازی جریان حول هیدروفویل سه‌بعدی ، به‌منظور بررسی اثر گردابه‌ها بر مشخصات هیدرودینامیکی هیدروفویل توسط تنها و همکاران [۲۴] انجام شده است. این گردابه‌ها بر عملکرد هیدرودینامیکی جسم تأثیر منفی دارند. نتایج حاصل شده نشانگر این است که اثرات جریان‌های عرضی بر میدان جریان (قبل از پدیده استال) حداکثر در محدوده چهل درصدِ دهانه هیدروفویل نسبت به نوک هیدروفویل مشاهده می‌شود. به‌علاوه، در مقایسه توزیع ضریب فشار در ریشه هیدروفویل سه‌بعدی با هیدروفویل دوبعدی، تفاوت ناچیزی بین توزیع ضریب فشار در این دو حالت وجود دارد.

عسگری و سیف [۲۵] تأثیر استفاده از هیدروفویل با آرایش‌های مختلف، محل قرارگیری و زاویه حمله را در شناورهای دوبدنه مورد آزمایش قرار دادند و نتایج را با حالت بدون هیدروفویل مقایسه کردند. همچنین بیان کردند که شناور مجهز به هیدروفویل به‌ویژه در سرعت‌های بالا باعث کاهش مقاومت شناور می‌شود. بعلاوه مشاهده کردند که جانمایی نامناسب هیدروفویل باعث افزایش مقاومت و ناپایداری در حرکت شد. آلیفراناندا و سولیستیونو [۲۶]، ناپایداری ناشی از پورپویزینگ شناور سُرشی در زمان بلند شدن از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.1]

آب آرام را مورد مطالعه قرار دادند؛ و برای شبیه‌سازی یک جریان سیال سه‌بعدی در اطراف یک جریان آزاد از تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی استفاده کردند. دقت نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده در مقایسه با نتایج تجربی و عددی منتشرشده قبلی، تناسب خوبی را نشان می‌دهد. رفتار دریامانی شناور هیدروفویلی و شناور سُرشی و همچنین تغییرات مقاومت این دو نوع شناور با افزایش سرعت و در معرض امواج منظم و نامنظم تحت زوایای مختلف برخورد موج با شناور توسط کریمی و همکاران [۲۷] مورد بررسی قرار گرفته است. ترکیب حرکات سرج، هیو، رول و پیچ هم‌زمان و تأثیرات آن‌ها بر روی یکدیگر لحاظ شده است. بر اساس نتایج حاصل از افزایش طول‌موج و ارتفاع موج مشخص گردید که با افزایش این دو مؤلفه موج منظم، همه حرکات شناورهای هیدروفویلی و سُرشی افزایش می‌یابد که این افزایش در حرکات شناور سُرشی قابل‌توجه‌تر است. سانچاک و کاکیچی [۲۸]، بر اساس روش ساویتسکی نسبت ابعاد، زوایای تریم دینامیکی و مقاومت‌های کل بدنه شناور سُرشی را محاسبه کردند. همچنین پورپویزینگ شناور سُرشی و مرزهای بحرانی بدنه شناور مورد ارزیابی قرار گرفت. شن و همکاران [۲۹]، نیز جهت کاهش مقاومت شناور سُرشی، هیدروفویلی را طراحی کرده و از طریق روش محاسبه عددی در حالات مختلف اثرات پارامترهای هیدروفویل بر کاهش مقاومت مورد بررسی قرار دادند. درنهایت هیدروفیل طراحی کردند که در سرعت ۸ متر بر ثانیه مقاومت شناور را ۳۰,۷۴ درصد کاهش داد.

مقاله حاضر، ادامه پژوهشی است که توسط سعیدی و کهنسال [۳۰] در سال ۲۰۲۴، انجام گردید. در آن مقاله تأثیر پارامترهای مربوط به موقعیت پایدارساز هیدروفویلی، شامل، زاویه حمله پایدارساز، فاصله طولی از ترانزوم و عمق آن نسبت به کف پاشنه برای شناور تندرو سُرشی تک بدنه مورد ارزیابی قرار گرفت. در سال‌های اخیر با توسعه فناوری کامپیوتری و نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی، رویکرد به استفاده از شبیه‌سازی عددی در تحلیل و مطالعه عملکرد هیدرودینامیکی شناورها افزایش یافته است. این مقاله که ادامه بررسی پارامترهای پایدارساز هیدروفویلی مقاله [۳۰] است به بررسی تأثیر پارامترهای ابعادی پایدارساز هیدروفویلی پرداخته شده است، که درنتیجه به یک پایدارساز نهایی جهت کنترل کامل پورپویزینگ دست یافته شد.

در این مقاله با مدل‌سازی شناور، میدان محاسباتی و شرایط مرزی به شبیه‌سازی شناور پرداخته می‌شود. سپس، مشخصات مدل هندسی سه‌بعدی شناور تندرو سُرشی تک بدنه و پایدارساز هیدروفویلی به‌صورت هم‌زمان تحلیل می‌شوند. در گام سوم به شبیه‌سازی حرکات شناور تندرو سُرشی و درنهایت، تجزیه‌وتحلیل تأثیر پارامترهای ابعادی پایدارساز هیدروفویلی بر ناپایداری طولی شناور پرداخته می‌شود.

۲- تشریح مسئله

ناپایداری پورپویزینگ در شناورهای تندرو سُرشی، یک نوع ناپایداری طولی و یکی از پدیده‌های نامطلوب در آب آرام است. در این پدیده سینه شناور به‌طور متناوب بالا و پایین رفته و روی سطح آب کوبیده می‌شود. در پدیده‌ی پورپویزینگ حرکات وابسته هیو و پیچ به‌طور تناوبی و پیوسته تکرار می‌شوند. علت این حرکات بروز گشتاور بین مراکز اثر نیروی وزن و نیروی لیفت است که شناور قادر به ایجاد تعادل نیرویی نبوده و این حرکت به‌طور تناوبی ادامه می‌یابد[۴]. با افزایش سرعت شناور بخش عمده نیروی لیفت ناشی از لیفت دینامیکی وارد بر کف شناور است. در این حالت مرکز اثر نیروی لیفت را می‌توان مرکز فشار در نظر گرفت. هنگامی‌که شناور سرعت می‌گیرد اگر مرکز اثر دو نیروی لیفت و نیروی وزن شناور بر هم منطبق باشد درواقع هیچ‌گونه ممان پیچ بر شناور وارد نمی‌شود. ولی اگر بین مرکز اثر این دو نیرو فاصله ایجاد شود گشتاور طولی بر شناور تحمیل می‌شود. با ادامه حرکت شناور، این حالت تناوبی ادامه می‌یابد و سر شناور به‌طور مرتب و متناوب بالا و پایین رفته و با سطح آب برخورد می‌کند. بنابراین علت اصلی پدیده‌ی پورپویزینگ را می‌توان جابجا شدن مرکز اثر نیروی لیفت یا مرکز فشار دانست [۴].

جهت شبیه‌سازی عددی مدل تجربی، یک شناور تک بدنه از نوع تندرو سُرشی با طول ۵ متر و عرض ۱,۹۴ متر که به‌صورت تجربی در سرعت ۳۰ گره دچار ناپایداری طولی است، انتخاب و مدل‌سازی گردید. جدول۱، مشخصات شناور مبنا، شکل ۱، مدل سه‌بعدی شناور در نرم‌افزار شبیه‌سازی و شکل ۲، خطوط بدنه در سه نمای مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱ - مشخصات شناور مبنا[۳۰]

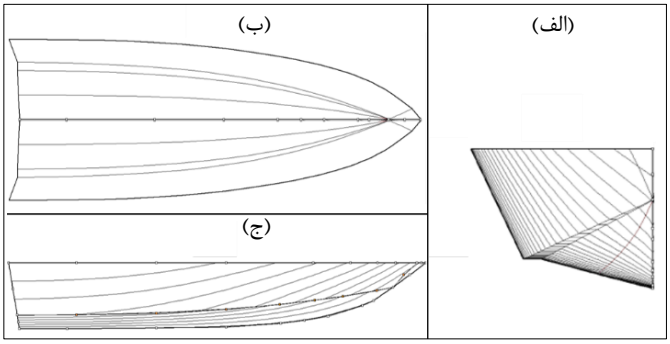
پارامتر		مقدار
طول	[متر]	۵
عرض	[متر]	۱,۹۴
ارتفاع	[متر]	۰,۷۴
جرم	[کیلوگرم]	۱۰۰۰
سرعت	[گره]	۳۰
مرکز جرم طولی	[متر]	۱,۷۵
قدرت موتور	[اسب بخار]	۳۰۰



شکل ۱ – مدل سه‌بعدی شناور تندرو سُرشی تک بدنه نمونه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.1]

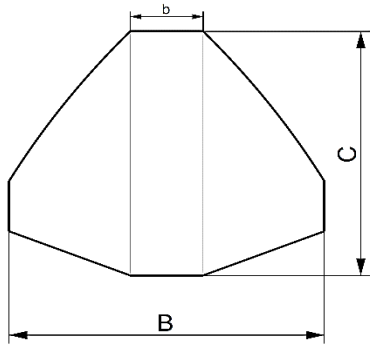


شکل ۲ – خطوط بدنه شناور سُرشی تک بدنه نمونه با نمای مختلف؛ (الف): نمای نیم‌بدنه از جلو، (ب): نمای بالا، (ج): نمای راست.

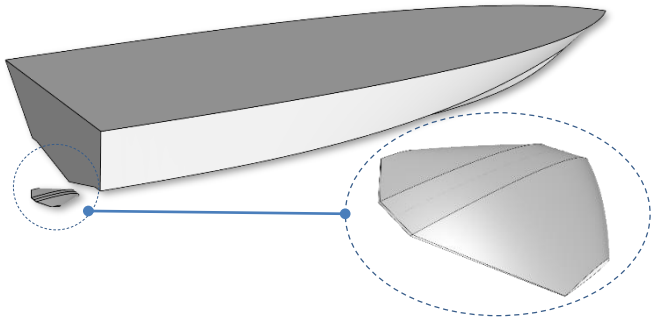
جهت بررسی تأثیر ابعاد پایدارساز هیدروفویلی در بهبود ناپایداری طولی شناور؛ ابتدا، هیدروفویل زاویه‌داری که بر اساس مشخصات شرکت سازنده [۳۱]، برای شناور سُرشی تک بدنه با قدرت موتور ۳۰۰ اسب بخار، ساخته شده است، مدل‌سازی انجام گردیده است. در شکل ۳، مقطع دوبعدی و جدول ۲، مشخصات هیدروفویل زاویه‌دار بیان شده است. در شکل ۴، مدل سه‌بعدی شناور سُرشی به همراه پایدارساز هیدروفویلی زاویه‌دار نشان داده شده است.

جدول ۲- مقادیر اولیه پارامترهای هندسی هیدروفویل زاویه‌دار

پارامتر	توضیح	[واحد]	مقدار
C	طول کورد	[سانتیمتر]	۳۵
B	حداکثر عرض	[سانتیمتر]	۴۲
b	حداکثر عرض میانی	[سانتیمتر]	۱۶



شکل ۳ – نمای از بالای هیدروفویل زاویه‌دار

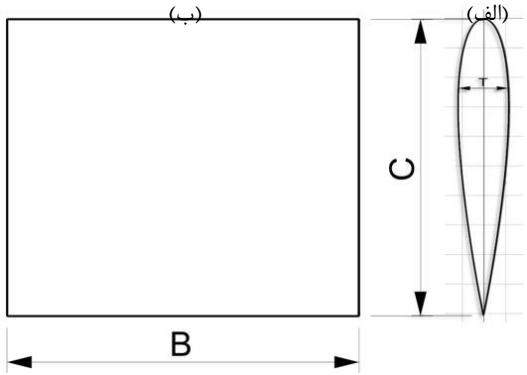


شکل ۴ – مدل سه‌بعدی شناور با پایدارساز هیدروفویلی زاویه‌دار و نمایش سه‌بعدی بزرگنمایی پایدارساز زاویه‌دار

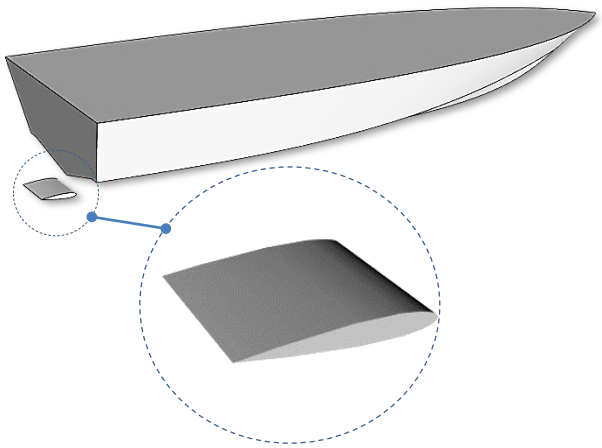
جهت بررسی تأثیر نسبت‌های طول کورد به عرض هیدروفویل در بهبود ناپایداری طولی شناور، هیدروفویلی با مقطع استاندارد NACA 0012 [۳۲]، در نظر گرفته شد. طول کورد اولیه فویل (C) برابر ۳۰ سانتیمتر فرض شده است. با توجه به نوع مقطع استاندارد انتخاب شده، ضخامت (T) فویل ۴,۳ سانتیمتر است. مقاطع دوبعدی هیدروفویل ساده در شکل ۵ و پارامترهای آن در جدول ۳ مشخص شده است. همچنین مدل سه‌بعدی از شناور و پایدارساز هیدروفویلی در شکل ۶، نشان داده شده است.

جدول ۳- پارامترهای هندسی پایدارساز هیدروفویلی ساده

پارامتر	توضیح
C	طول کورد
B	حداکثر عرض
T	حداکثر ضخامت فویل



شکل ۵ – مقطع دوبعدی هیدروفویل ساده
(الف): نمای راست، (ب): نمای بالا



شکل ۶ – مدل سه‌بعدی شناور با پایدارساز هیدروفویلی ساده و نمایش سه‌بعدی بزرگنمایی هیدروفویل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.1]

۳- معادلات حاکم

شبیه‌سازی عددی مبتنی بر تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای شبیه سازی یک مدل هندسی سه‌بعدی در جریان سیال دوفازی اویلری انجام شده است. این روش براساس معادلات رینولدز ناویر-استوکس (RANS) بوده است. علاوه بر این، از روش کسر حجمی (VOF) برای مدل‌سازی سطوح آزاد استفاده شده است. مدل استاندارد اغتشاشی K-ε و تکنیک مش overset اطراف بدنه برای بهبود دقت و کارایی شبیه‌سازی عددی پیاده سازی شده است. معادلات پیوستگی و RANS را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\nu\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)\right] - \frac{\partial \overline{\acute{u}_i \acute{u}_j}}{\partial x_j} \qquad (۲)$$

که متغیرهای p فشار، ρ چگالی سیال، ν ویسکوزیته سینماتیکی است، $\bar{u}_i$ و $\bar{u}_j$ مؤلفه‌های سرعت متوسط و $\acute{u}_i$ و $\acute{u}_j$ مؤلفه‌های نوسانی را در جهت i^{th} و j^{th} نشان می‌دهند. از ترکیب k و ε، ویسکوزیته گردابی آشفته μ_t را به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (۳)$$

در این رابطه C_μ مقدار ثابت، k انرژی جنبشی آشفته، ε نرخ اتلاف است و از معادلات انتقال قابل‌محاسبه هستند، که به صورت زیر بیان شده است:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(kU_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P_k - \varepsilon \qquad (۴)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (۵)$$

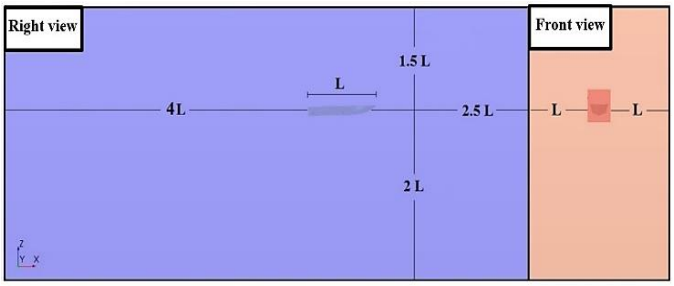
در روابط فوق σ_k, σ_ε, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ ثابت‌های مربوط به مدل هستند و P_k انرژی جنبشی اغتشاشی تولیدی است. که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$P_k = -\overline{u_i u_j}\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} \qquad (۶)$$

۴- روش حل عددی

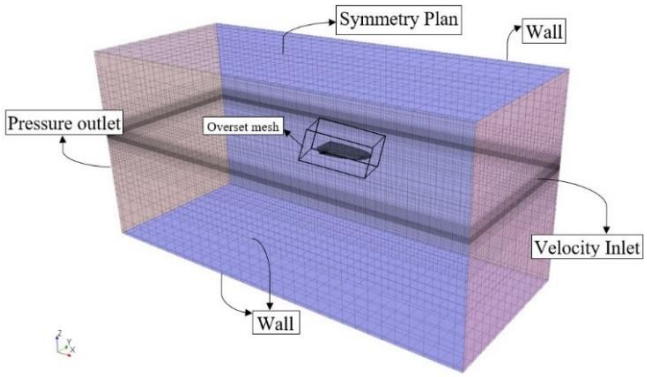
هندسه‌های واردشده در مرحله‌ی قبل، تنها شامل بدنه شناور و هیدروفویل است. برای تحلیل و پیش‌بینی مقاومت بایستی یک میدان محاسباتی (حوضچه کشش) در اطراف بدنه ایجاد گردد. برای این منظور، می‌بایست هندسه‌ای مکعب مستطیل شکل اطراف بدنه ایجاد شده است.در این شبیه‌سازی، حداقل معیارهای ITTC [۳۳]، برای تعیین دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده است. فاصله ورودی تا سینه شناور را ۲,۵ برابر طول شناور و فاصله پاشنه شناور تا خروجی را بیشتر و ۴ برابر طول شناور در نظر گرفته تا جریان برگشتی روی بدنه تأثیر نگذارد. فاصله مرز بالایی تا سطح آزاد ۱,۵ و سطح پایینی تا سطح آزاد ۲ برابر طول شناور است. همچنین فاصله دیواره کناری تا بدنه شناور ۲ برابر طول شناور است. ابعاد دامنه محاسباتی در شکل ۷، نشان داده است.

در این شبیه سازی گام زمانی مطابق ITTC [۳۳] از رابطه‌ی $\Delta t = 0.005 \sim 0.01 \times \frac{L_w}{U}$، پیروی می‌کند، که U سرعت و Lw طول خیس شده شناور است.



شکل ۷ – ابعاد دامنه محاسباتی [۳۰]

قبل از ایجاد شبکه حجمی نیاز است، که نوع شرایط مرزی مشخص گردد. بدین‌صورت که نوع مرزها برای ورودی از نوع سرعت ورودی، برای خروجی از نوع فشار خروجی، برای جوانب و کف دامنه محاسباتی از نوع دیواره، صفحه بالایی دامنه، مرز از نوع صفحه متقارن و برای اطراف بدنه شناور از شبکه Overset استفاده شده است. دامنه و شرایط مرزی در شکل ۸ نشان داده شده است.

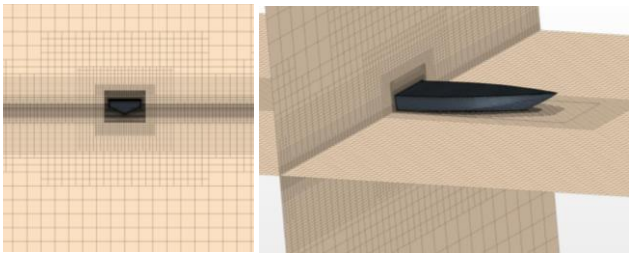


شکل ۸ – تعریف شرایط مرزی در مدل‌سازی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.1]

دقت نتایج شبیه‌سازی به کیفیت و نوع شبکه‌بندی بستگی دارد. در این شبیه‌سازی، برای به حداقل رساندن خطا در شبکه‌بندی از احجام مختلف برای بهبود شبکه استفاده‌شده است. همچنین شبکه‌بندی هیدروفویل متمایز از شبکه‌بندی شناور و دامنه‌ی محاسباتی است. حجم‌هایی برای بهبود شبکه‌بندی در اطراف شناور و در ناحیه سطح آزاد در نظر گرفته‌شده است. در شکل ۹، بخشی از شبکه‌بندی دامنه محاسباتی به کار گرفته‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۹ – شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

برای لایه‌های مرزی آشفته، که در مناطق بیشتری از ناحیه خیس‌شده بدنه رخ می‌دهد، در مواردی که عدد رینولدز بالا است، تابع دیواره نقش مهمی در دقت محاسبه دارند. در نظریه دینامیک سیالات کلاسیک، شبکه لایه منشوری برای تولید شبکه‌های لایه استفاده می‌شود. برای ارزیابی کیفیت مش در لایه‌های مرزی، پارامتر بی‌بعد y^+ به‌عنوان فاصله بی‌بعد از دیواره تا اولین گره شبکه، بررسی می‌شود. مقدار این پارامتر با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

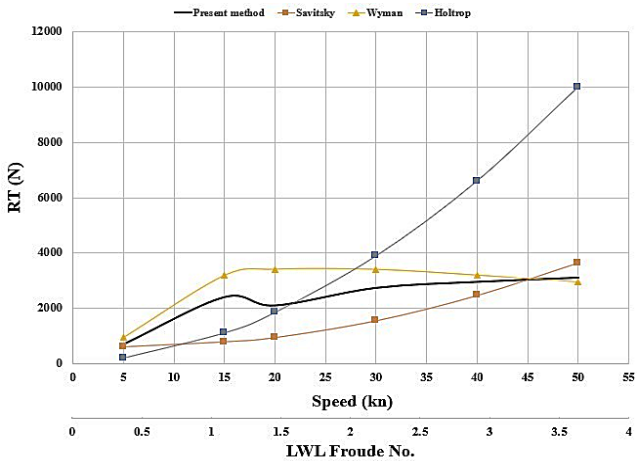
$$y^+ = \frac{\rho . u_t . \Delta y}{\mu} \qquad (۷)$$

در این رابطه، Δy فا صله بین دیواره و اولین گره مش، u_t سرعت اصطکاکی، ρ چگالی سیال و μ ویسکوزیته سیال است.

به‌منظور ارزیابی و بررسی استقلال شبکه‌بندی، در سرعت ۳۰ گره دریایی (عدد فرود طولی ۲,۲)، در چهار حالت مختلف میزان ضریب درگ با توجه به تعداد شبکه‌های تولیدشده محاسبه شده است. بنابراین، برای داشتن دقت کافی در محاسبات و در کوتاه‌ترین زمان ممکن، تعداد المان‌ها را در حدود ۲,۵ میلیون به‌عنوان شبکه‌بندی پایه در نظر گرفته شده است.

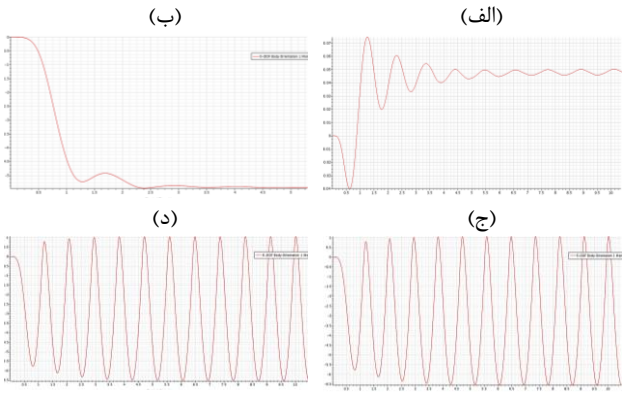
۵- نتایج حل عددی

یکی از مهم‌ترین بخش‌های این تحقیق، انتخاب شناور است. یافتن شناوری که در ابتدای امر دارای ناپایداری طولی باشد، و در تحلیل‌های عددی و آزمون در دریا این موضوع به اثبات رسیده باشد، کار دشواری است. با تحقیقاتی که در این زمینه انجام شد، سرانجام یک شناور تک بدنه از نوع تندرو سُرشی با طول ۵ متر، عرض ۱,۹۴ متر و ارتفاع ۰,۷۴ متر انتخاب شد که در آزمایش در دریا در سرعت بالای ۳۰ گره دریایی دچار ناپایداری طولی می‌شد. جهت اعتبار سنجی روش عددی، نمودار مقاومت به‌سرعت (عدد فرود طولی) شناور تک بدنه تندرو سُرشی در نظر گرفته شد. نتایج عددی مقاومت شناور تک بدنه تندرو سُرشی با نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های تجربی در شکل ۱۰ مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با مقایسه مقادیر مقاومت شناور در محدوده سرعت ۰ الی ۵۰ گره که با استفاده از روش عددی محاسبه‌شده با نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های تجربی، مشاهده می‌شود که روش عددی توانسته مقاومت را بر اساس رفتار شناور تندرو سُرشی پیش‌بینی کند.



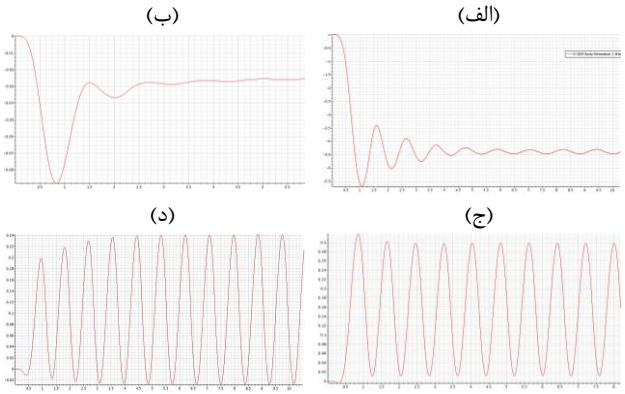
شکل ۱۰ – نمودار مقاومت نسبت به‌سرعت و عدد فرود [۳۰]

به‌منظور بررسی پایداری طولی شناور تک بدنه تندرو سُرشی و محدوده شروع پورپویز، تحلیل در سرعت‌های ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ گره دریایی انجام شده است [۳۰]. شکل‌های مربوط به این شبیه‌سازی‌ها و حرکات پیچ و هیو شناور برای هرکدام از سرعت‌های مذکور در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است. در شکل ۱۱ نتایج مربوط به حرکت پیچ شناور در چهار سرعت مختلف به‌صورت عددی پیش‌بینی و نشان داده شده است.



شکل ۱۱ – نمودار حرکت پیچ-زمان شناور در سرعت‌های مختلف
(الف): ۱۵ گره، (ب): ۲۰ گره، (ج): ۳۰ گره، (د): ۴۰ گره[۳۰]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.1]



شکل ۱۲ – نمودار حرکت هیو-زمان شناور در سرعت‌های مختلف (الف): ۱۵ گره، (ب): ۲۰ گره، (ج): ۳۰ گره، (د): ۴۰ گره[۳۰]

در شکل ۱۲ نیز نتایج مربوط به حرکت هیو شناور در این چهار سرعت نشان داده شده است. همان‌طور که از مقایسه نمودارها، در سرعت‌های ۱۵ و ۲۰ گره مشاهده می‌شود، در این وضعیت شناور دارای وضعیت نسبتاً پایدار بوده، اما اثرات ناپایداری به‌صورت جزئی بخصوص در سرعت ۲۰ گره (شکل‌های ۱۱- (ب) و ۱۲- (ب)) در نمودارها قابل‌مشاهده است.

همان‌طور که از نمودارها در سرعت ۳۰ گره مشاهده می‌شود، در این وضعیت شناور وارد مرحله‌ی ناپایداری طولی شده و تغییرات شدید در زاویه پیچ و حرکت هیو شناور مشاهده می‌شود. این وضعیت را می‌توان سرعت ناپایداری شناور در نظر گرفته و بنابراین پایدارساز هیدروفویلی باید برای این سرعت طراحی شود. این نتیجه به‌دست‌آمده از حل عددی، کاملاً با آنچه از آزمون شناور در دریا گزارش‌شده مطابقت دارد.

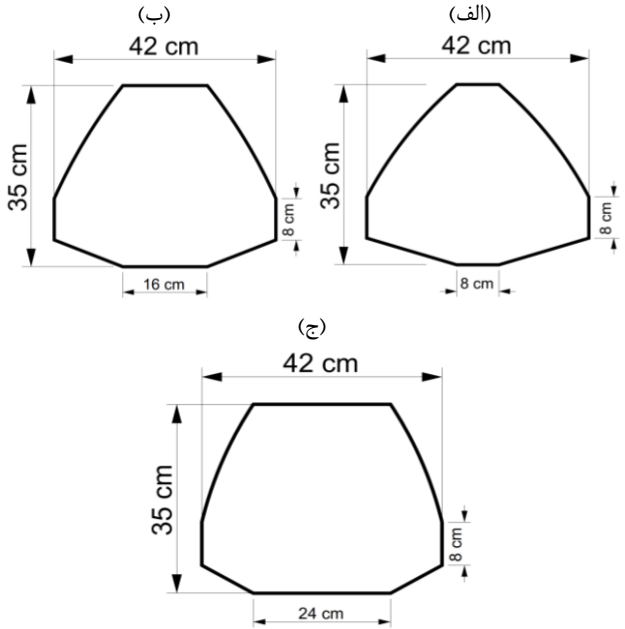
نکته دیگری که باید به آن توجه شود این موضوع است که در بعضی مواقع با افزایش سرعت، شناور از حالت ناپایداری خارج‌شده و به وضعیت تعادل طولی می‌رسد. بدین منظور، شبیه‌سازی برای سرعت بالاتر از سرعت پورپویز شناور نیز انجام شده است. همان‌طور که از نمودارهای فوق مشاهده می‌شود تغییرات حرکات هیو و زاویه پیچ شناور همچنان زیاد بوده و شناور حالت ناپایدار خود را حفظ کرده است. بنابراین شبیه‌سازی با استفاده از مدل عددی دارای این قابلیت بود که به نتایجی مشابه آنچه در آزمون در دریا روی داده بود یعنی بروز ناپایداری طولی در سرعت ۳۰ گره و هم حفظ این وضعیت ناپایداری در سرعت‌های بالاتر را پیش‌بینی کند. فرضیات این مسئله، در واقع پارامترهایی است که مرتبط با موقعیت قرار گرفتن هیدروفویل در حالت ناپایدار می باشند. این فرضیات برای که در آن سرعت حرکت ۳۰ گره، زاویه حمله صفر درجه، فاصله عمودی هیدروفویل تا کف پاشنه شناور ۱۵ سانتیمتر و فاصله طولی هیدروفویل از ترانزام ۱۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است [۳۰]. در جدول ۴، متغیرهای ابعادی که در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفته اند، بصورت خلاصه بیان گردیده است. در این جدول A سطح مقطع، B عرض کل، C طول کل و b عرض میانی هیدروفویل است.

جدول ۴- متغیرهای ابعادی برای هیدروفویل ساده و زاویه دار

پارامتر	حالت	B [cm]	C [cm]	b [cm]	A [cm^2]
عرض میانی در پایدارساز هیدروفویلی زاویه‌دار	۱	۳۵	۴۲	۸	۱۰۵۹
	۲	۳۵	۴۲	۱۶	۱۱۴۵
	۳	۳۵	۴۲	۲۴	۱۲۵۸
طول کورد و عرض پایدارساز در سطح مقطع ثابت	۴	۴۰	۳۰	-	۱۲۰۰
	۵	۳۰	۴۰	-	۱۲۰۰
	۶	۵۰	۲۴	-	۱۲۰۰

۶- تأثیر نسبت عرض میانی پایدارساز هیدروفویلی زاویه‌دار

در این تحلیل به بررسی هیدروفویل زاویه‌دار پرداخته شده است. نسبت‌های ابعادی هیدروفویل زاویه‌دار مانند عرض کل، طول کورد در این بررسی ثابت فرض شده است. تأثیرات پایداری طولی شناور در نسبت عرض میانی (b) به عرض کلی پایدارساز (B)، در سه حالت نسبت عرض میانی کم، متوسط و زیاد موردبررسی قرار گرفته است. در این تحلیل، فاصله عمودی هیدروفویل از پاشنه شناور برابر ۱۰ سانتیمتر، زاویه حمله هیدروفویل برابر صفر و موقعیت طولی هیدروفویل زاویه‌دار ۱۵ سانتیمتر از پاشنه شناور فرض شده است [۳۰]. سطح مقطع پایدارساز هیدروفویلی زاویه‌دار با عرض میانی ۸، ۱۶ و ۲۴ سانتیمتر به ترتیب $1059\ cm^2$، $1145\ cm^2$ و $1258\ cm^2$ می باشند.



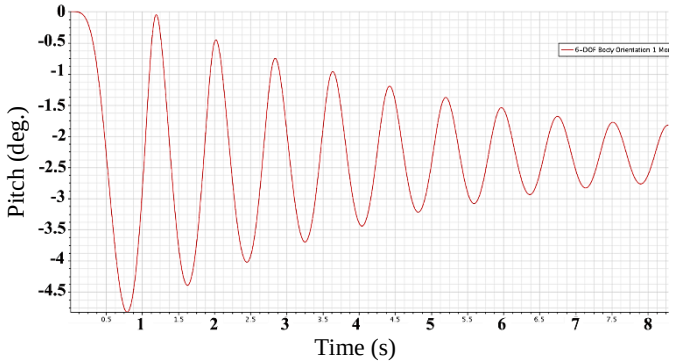
شکل ۱۳ – ابعاد پایدارساز هیدروفویلی زاویه‌دار با سه عرض میانی مختلف؛ (الف): کم (b= 8 cm)، (ب): متوسط (b= 16 cm)، (ج): زیاد (b= 24 cm)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

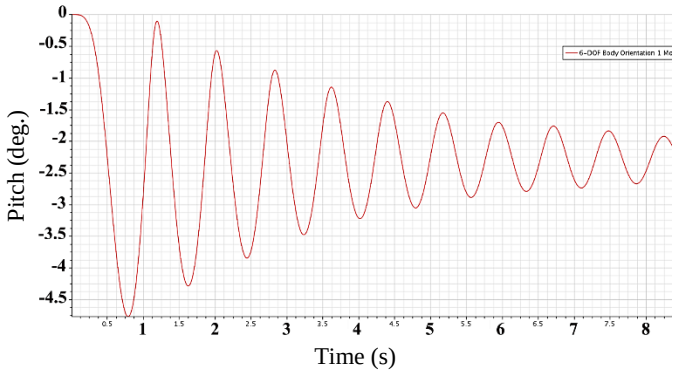
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.1]

در این مرحله سه پایدارساز زاویه‌دار در نظر گرفته شده است. نمای از بالا و ابعاد این سه پایدارساز هیدروفویلی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. تفاوت اصلی این سه پایدارساز در پهنای قسمت میانی آن‌ها است. برای اولین پایدارساز، پهنای قسمت میانی، ۸ سانتیمتر، دومین پایدارساز، پهنای ناحیه میانی ۱۶ سانتیمتر و پهنای میانی سومین پایدارساز، ۲۴ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. نتایج مربوط به حرکات پیچ و هیو شناور در استفاده از این سه پایدارساز در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است.

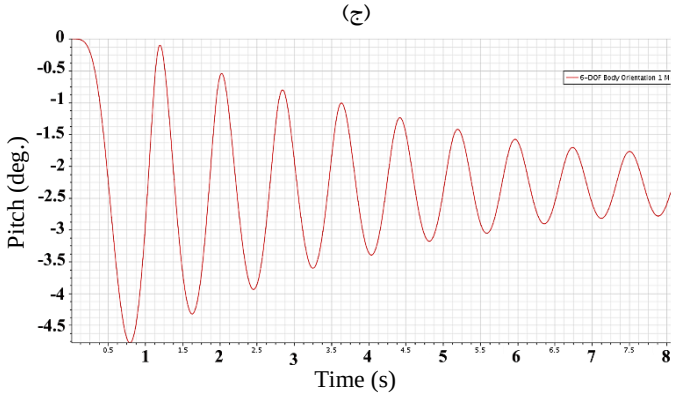
(الف)



(ب)

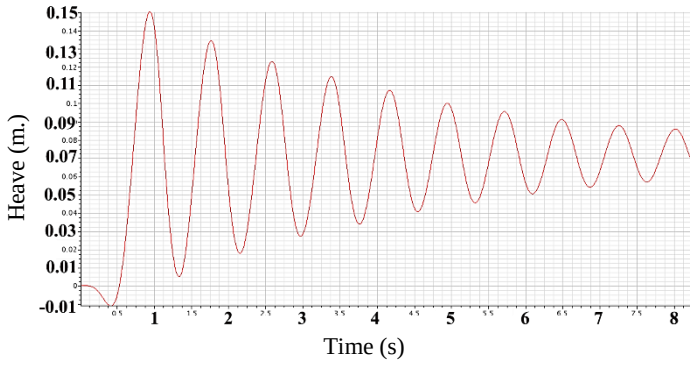


(ج)

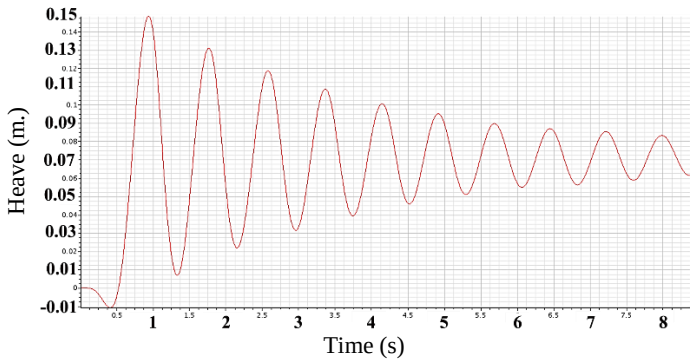


شکل ۱۴– نمودار حرکت پیچ شناور با پایدارساز هیدروفویلی زاویه‌دار با سه عرض میانی مختلف؛ (الف): کم (b= 8 cm)، (ب): متوسط (b= 16 cm)، (ج): زیاد (b= 24 cm)

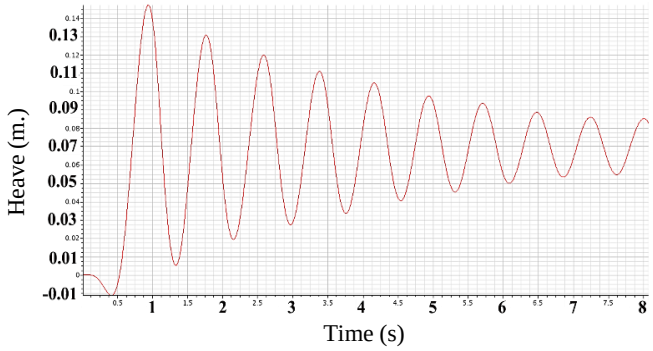
(الف)



(ب)

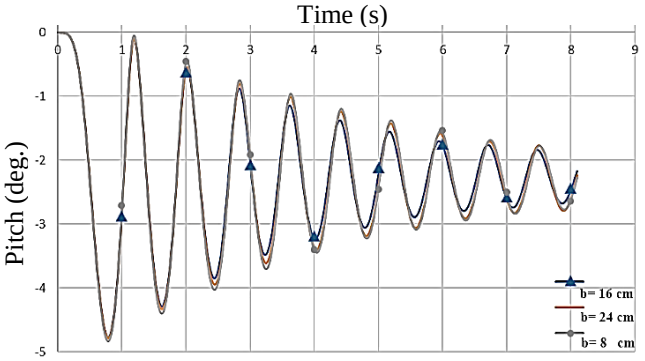


(ج)



شکل ۱۵ – نمودار حرکت هیو شناور با پایدارساز هیدروفویلی زاویه‌دار با سه عرض میانی مختلف؛ (الف): کم (b= 8 cm)، (ب): متوسط (b= 16 cm)، (ج): زیاد (b= 24 cm)

در نمودار شکل ۱۶، زاویه پیچ شناور نسبت به زمان در سه تحلیل نشان داده شده است. هیدروفویل زاویه‌دار با نسبت عرض میانی کم، متوسط و زیاد در این نمودار با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۶ – نمودار حرکت پیچ شناور با پایدارساز هیدروفویلی زاویه‌دار با سه عرض میانی مختلف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.1]

همان‌طور که از این نمودار مشخص است، با مقایسه‌ی نتایج این سه حالت مشاهده می‌شود، افزایش یا کاهش بیش‌ازاندازه‌ی عرض میانی هیدروفویل زاویه‌دار تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش ناپایداری طولی شناور نداشته است. در حالتی که عرض میانی متوسط است، روند کاهش دامنه نوسانات زاویه پیچ شناور سریع‌تر اتفاق افتاده است.

۷- تاثیر پارامتر نسبت عرض به طول کورد پایدارساز هیدروفویلی

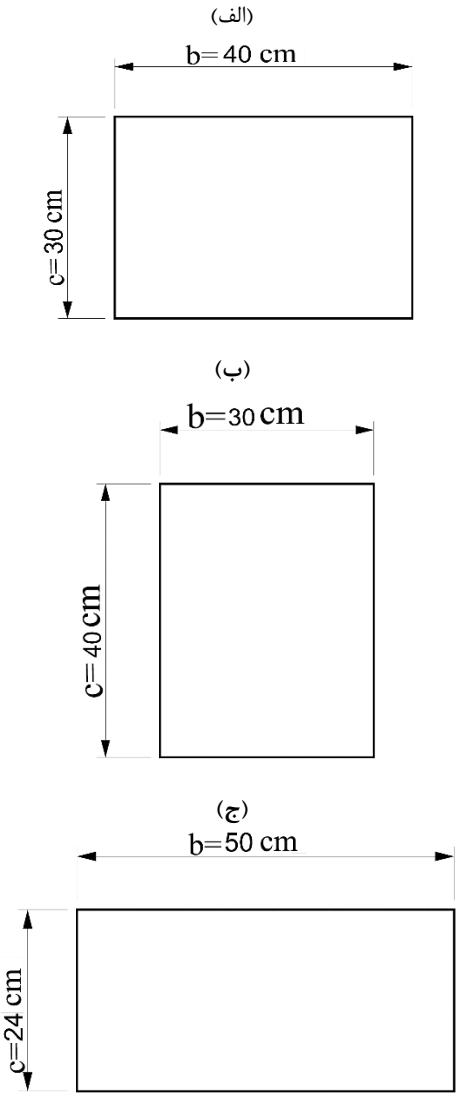
در این گام، تأثیر نسبت‌های ابعادی هیدروفویل، در کاهش ناپایداری طولی شناور بررسی‌شده است. مساحت سطح بالابر هیدروفویل در این تحلیل ثابت فرض شده است. لازم به ذکر است، فاصله عمودی هیدروفویل نسبت به پاشنه شناور ثابت و برابر ۱۰ سانتیمتر، موقعیت طولی هیدروفویل برای هر سه حالت برابر ۱۵ سانتیمتر از پاشنه شناور و زاویه حمله در این بررسی‌ها، صفر درجه در نظر گرفته شده است [۳۰]. همان‌طور که در رابطه‌ی (۷) مشخص است، افزایش سطح پایدارساز هیدروفویلی تأثیر مستقیمی در میزان لیفت تولیدشده و درنتیجه کاهش حرکت پیچ شناور خواهد داشت[۳۴].

$$L = \frac{1}{2} C_L \, \rho \, A \, V^2 \qquad (۸)$$

که در این رابطه، L نیروی لیفت، C_L ضریب لیفت، ρ چگالی سیال، A سطح مقطع فویل و V سرعت سیال تعریف شده است.

جهت بررسی تأثیر پارامترهای طول کورد (C) و عرض پایدارساز (B)، به این صورت عمل می‌شود که در یک سطح بالابر ثابت برابر $1200\ cm^2$، پارامترهای مذکور تغییر کرده و تأثیر آن‌ها روی حرکات هیو و پیچ شناور بررسی می‌گردد. در ادامه، تأثیر نسبت تغییر پارامترهای عرض (C) و طول کورد (B) در کاهش ناپایداری طولی شناور تندرو سُرشی توضیح داده شده است.

به‌منظور بررسی اثر تغییر در پارامتر نسبت عرض به طول کورد پایدارساز، یک پایدارساز ساده در نظر گرفته شده است. ابعاد اولیه این پایدارساز شامل ۴۰ سانتی‌متر عرض و طول کورد ۳۰ سانتی‌متر فرض شده است (شکل ۱۶-الف). سپس برای اینکه امکان مطالعه اثر تغییر پارامتر نسبت عرض به طول کورد در رفتار شناور امکان‌پذیر شود، در گام دوم عرض پایدارساز به ۳۰ سانتی‌متر و طول کورد آن به ۴۰ سانتی‌متر تغییر یافته است (شکل ۱۶- ب). در گام آخر نیز برخلاف گام دو، عرض نسبت به حالت اولیه افزایش یافته و به ۵۰ سانتی‌متر رسیده و طول کورد برای عدم تغییر در مساحت، به ۲۴ سانتی‌متر کاهش یافته است (شکل ۱۷- ج).



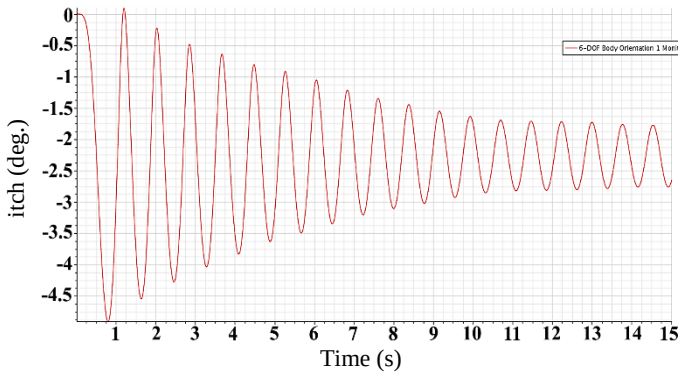
شکل ۱۷ – نمای از بالا از پایدارساز هیدروفویلی ساده با عرض و طول کورد مختلف؛ (الف): عرض و طول کورد متوسط اولیه، (ب): افزایش کورد و کاهش عرض، (ج): کاهش طول کورد و افزایش عرض

نتایج مربوط به حرکات پیچ و هیو شناور هنگامی‌که از پایدارساز ساده با سه نسبت عرض به طول کورد مختلف و سطح مقطع ثابت استفاده می‌شود در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است.

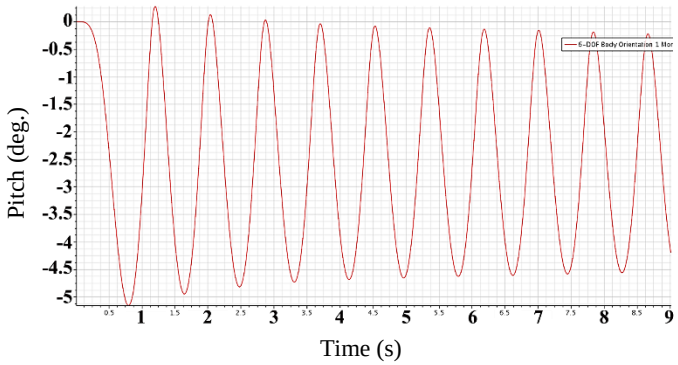
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.1]

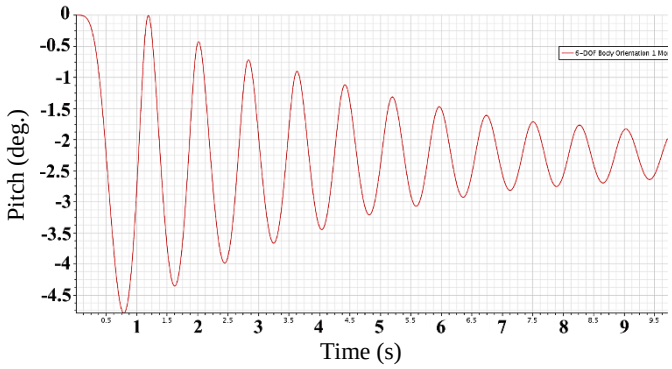
(الف)



(ب)

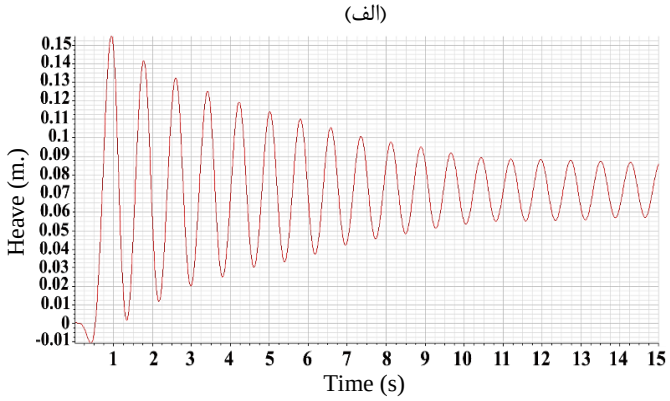


(ج)

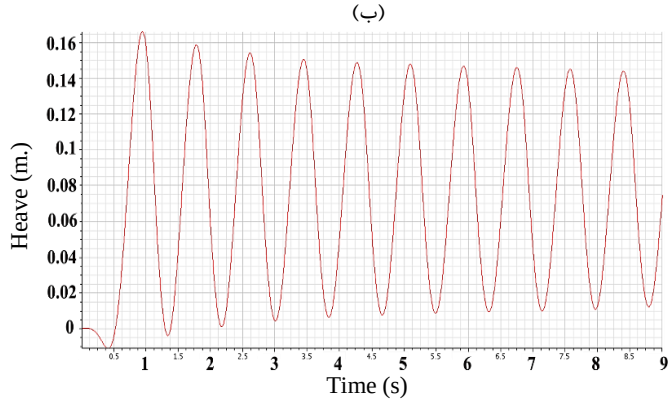


شکل ۱۸ – نمودار حرکت پیچ شناور با پایدارساز هیدروفویلی ساده در سه نسبت عرض و طول کورد مختلف؛
(الف): عرض و طول کورد متوسط اولیه، (ب): افزایش طول کورد و کاهش عرض، (ج): کاهش طول کورد و افزایش عرض

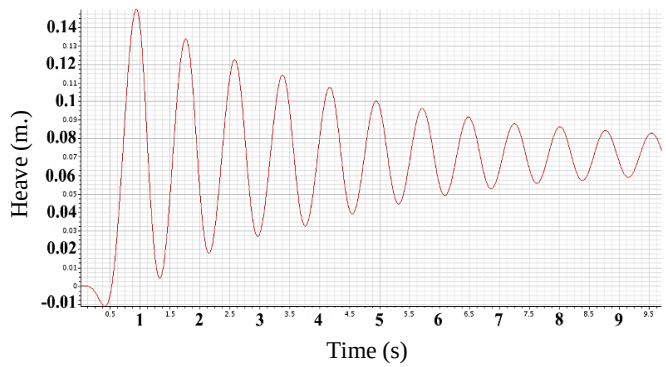
(الف)



(ب)

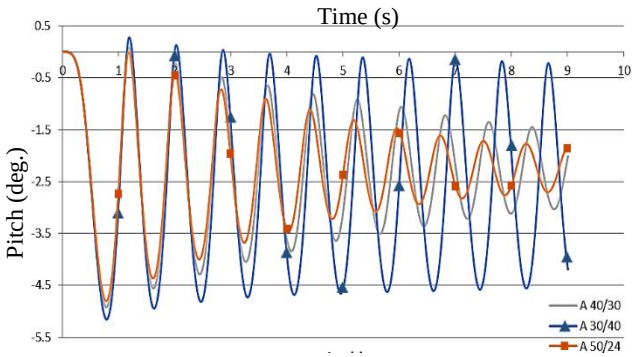


(ج)



شکل ۱۹ – نمودار حرکت هیو شناور با پایدارساز هیدروفویلی ساده در سه نسبت عرض و طول کورد مختلف؛
(الف): عرض و طول کورد متوسط اولیه، (ب): افزایش طول کورد و کاهش عرض، (ج): کاهش طول کورد و افزایش عرض

در نمودار شکل ۲۰ نیز تغییرات زاویه پیچ شناور نسبت به زمان در سه تحلیل نشان داده شده است. اثر نسبت‌های ابعادی مختلف هیدروفویل در این نمودار با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۲۰ – نمودار حرکت پیچ شناور با پایدارساز هیدروفویلی ساده در نسبت‌های ابعادی مختلف

نمودارحرکت پیچ و هیو برای هیدروفویل ساده با عرض ۴۰ سانتیمتر و طول کورد ۳۰ سانتیمتر، و با توجه به فرضیات بیان شده، مطابق تصویر ۱۳ و ۱۴ می باشد [۳۰].

همان‌طور که از نتایج نشان داده شده در شکل ۲۰، با توجه به این موضوع که سطح لیفت ساز هیدروفویل در سه تحلیل فوق ثابت در نظر گرفته شده، و با مقایسه‌ی نتایج سه مورد مشاهده می‌شود که

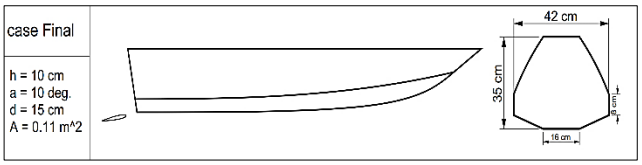
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.1]

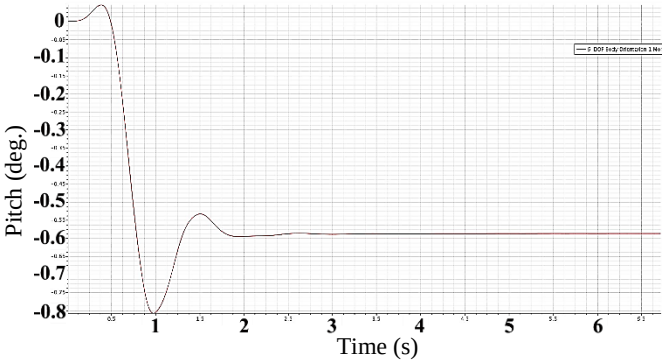
افزایش عرض هیدروفویل تأثیر به‌مراتب بیشتری نسبت به افزایش طول کورد هیدروفویل دارد. بنابراین تأثیر پارامتر عرض در طراحی پایدارساز هیدروفویلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۸- انتخاب پایدارساز هیدروفویلی مناسب

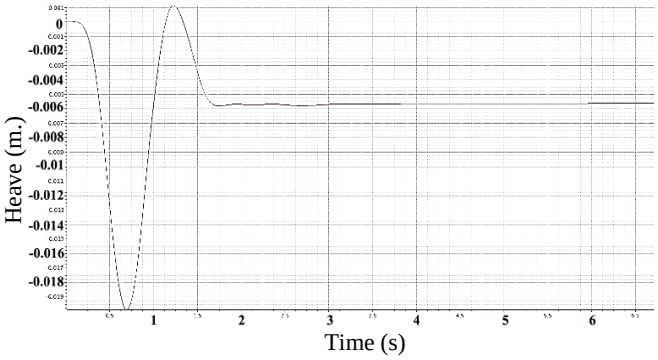
جهت انتخاب هیدروفویل پایدارساز نهایی، نتایج حاصل این پژوهش در کنار نتایج مرتبط با مقاله [۳۰] به‌صورت یکپارچه در نظر گرفته می‌شوند. در هر دو پژوهش تأثیر پارامترهای مختلف در طراحی و یا انتخاب پایدار ساز هیدروفویلی موردبرر سی قرار گرفته است. همان‌گونه که از نتایج مشخص شد، میزان اثرگذاری این پارامترها در کاهش ناپایداری طولی شناور با یکدیگر تفاوت دارد. به‌طورکلی می‌توان گفت که مقایسه میان تأثیر پارامترهای مربوط به موقعیت نصب پایدار ساز هیدروفویلی مانند عمق نسبت به کف ترانزوم، موقعیت طولی و زاویه حمله در مقاله پیشین مورد مطالعه قرار گرفت [۳۰]. در این تحقیق نیز میزان اثرگذاری پارامترهای ابعادی پایدارساز، مانند نسبت‌های عرض به طول کورد و نسبت عرض میانی هیدروفویل به عرض کل هیدروفویل بررسی شده است. از نتایج هر دو مقاله می‌توان در انتخاب مؤثرترین پارامترها درکاهش ناپایداری طولی شناور استفاده کرد. از مقایسه پارامترهای مقاله قبل مشخص می‌شود، که پایدارساز هیدروفویلی در عمق ۱۰ سانتیمتری از کف پاشنه، موقعیت طولی ۱۵ سانتیمتری هیدروفویل نسبت به پاشنه شناور و زاویه حمله‌ی ۱۰ درجه بهترین عملکرد را داشته است. همان‌گونه که از نتایج مشاهده شد، پارامتر عرض هیدروفویل در طراحی و انتخاب آن بسیار حائز اهمیت است. به‌طوری‌که با افزایش عرض در یک طول کورد مشخص، پایداری طولی شناور سریع‌تر حاصل می‌شود. البته لازم به ذکر است، انتخاب عرض هیدروفویل وابستگی زیادی به عرض کل شناور و موتور انتخابی برای شناور دارد. باید در نظر داشت در این مطالعه اثر پایدارساز هیدروفویلی در کاهش کاویتاسیون پروانه بررسی نشده است. در این تحقیق عرض کل پایدارساز هیدروفویلی نهایی، ۴۲ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. با مقایسه‌ی نمودارهای شکل ۱۴-(ب) و شکل ۱۸-(الف)، کاهش سریع‌تر دامنه‌ی نوسانات در نمونه زاویه‌دار مشهود است. بنابراین پایدارساز هیدروفویلی نهایی از نوع زاویه‌دار انتخاب شده است. در هیدروفویل زاویه‌دار تأثیر پارامتر نسبت عرض میانی به عرض کل هیدروفویل، مورد توجه قرار دارد. بر اساس نتایج نمودار شکل‌های ۱۴ و ۱۵، افزایش یا کاهش بیش‌ازاندازه‌ی این پارامتر، تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش ناپایداری طولی شناور نداشته است. بنابراین نسبت عرض میانی به عرض کل متوسط در هیدروفویل نهایی انتخاب می‌گردد. در شکل ۲۱، مقادیر پارامترهای پایدارساز هیدروفویل نهایی جهت رفع ناپایداری طولی شناور نشان داده شده است.



شکل ۲۱ – پارامترهای پایدارساز هیدروفویلی نهایی شناور



شکل ۲۲ – نمودار حرکت پیچ شناور با پایدارساز هیدروفویلی نهایی



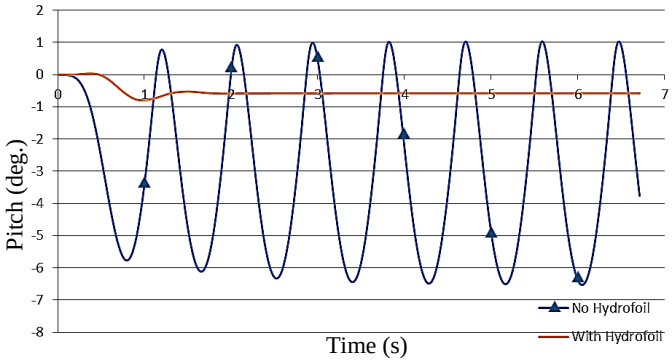
شکل ۲۳ – نمودار حرکت هیو شناور با پایدارساز هیدروفویلی نهایی

همان‌طور که از نمودارهای هیو و پیچ شناور باوجود پایدارساز هیدروفویلی نهایی مشخص است (شکل‌های ۲۲ و ۲۳)، میزان ناپایداری شناور به‌صورت کامل برطرف شده و شناور در کمترین زمان ممکن، حالت تعادل طولی خود را به دست آورده است. در این وضعیت شناور دارای تریم دینامیکی ۰٫۶ درجه بوده که وضعیت مطلوبی در طراحی شناور تندرو سُرشی تک بدنه است.

درنهایت، تأثیر استفاده از پایدارساز هیدروفویلی طراحی‌شده در از بین بردن ناپایداری طولی شناور در شکل ۲۴، نشان داده شده است. نمودار نوسانی، ناپایداری شناور بدون استفاده از هیدروفویل، و نمودار دوم وضعیت تعادل شناور به کمک پایدارساز هیدروفویلی نهایی را نشان داده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، پایدارساز نهایی انتخاب‌شده، باعث شده که ناپایداری طولی شناور تندرو سُرشی به‌طور کامل برطرف شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.1]



شکل ۲۴ – نمودار حرکت پیچ شناور با و بدون پایدارساز هیدروفویلی نهایی

مقایسه ای بین اندازه دامنه حرکات پیچ و هیو شناور در سرعت وقوع پروپویز (۳۰ گره) با پایدارساز هیدروفویلی و بدون آن، برای حالات مختلف و در زمان ۳ ثانیه، در جدول ۵ نشان داده شده است. اندازه‌ی دامنه حرکات پیچ و هیو شناور بدون پایدارساز هیدروفویلی در شرایط بیان شده، به ترتیب ۳,۷۵ درجه و ۰,۱۳ متر است.

جدول ۵- مقایسه اندازه دامنه حرکات پیچ و هیو در حالات مختلف، در سرعت ۳۰ گره و زمان ۳ ثانیه

حالت	پیچ [درجه]	هیو [متر]	درصد اختلاف	
			٪پیچ	٪هیو
۱	۱,۳۷۵	۰,۰۴۵	۶۳,۳	۶۵,۳۸
۲	۱,۱۸۸	۰,۰۴	۶۸,۳	۶۹,۲۳
۳	۱,۳۷۵	۰,۰۴	۶۳,۳	۶۹,۲۳
۴	۱,۸۷۵	۰,۰۵۳	۵۰	۵۹,۶۱۵
۵	۲,۳۷۵	۰,۰۷۵	۳۶,۶۷	۴۲,۳۱
۶	۱,۳۷۵	۰,۰۴۳	۶۳,۳۳	۶۷,۳۱
نهایی	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰

همانطور که از نتایج جدول ۵ مشاهده می شود، اندازه دامنه حرکت پیچ شناور در حالات ۲ و ۴ نسبت به شناور بدون پایدارساز به میزان ۶۸/۳ درصد و ۵۰ درصد کاهش یافته است. می‌توان گفت مناسب‌ترین حالت برای قایق مورد مطالعه، عرض میانی هیدروفویل ۱۶ سانتیمتر و نسبت عرض به طول ۴۰/۳۰ است.

۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، به تأثیر پارامترهای ابعادی پایدار ساز هیدروفویلی در کاهش ناپایداری طولی شناور تندرو سُرشی تک بدنه پرداخته شده است. شناور اولیه در آزمون در دریا در سرعت ۳۰ گره دریایی دچار ناپایداری طولی شده و با افزایش سرعت، این ناپایداری ادامه پیدا می‌کرد. در این تحقیق، میزان اثرگذاری نسبت‌های عرض به طول کورد و نسبت عرض میانی هیدروفویل به عرض کل به‌عنوان دو پارامتری که اثرات تغییر ابعاد هیدروفویل را نشان می‌دهند انتخاب شده و با تغییر آن‌ها به مطالعه تغییر در رفتار شناور پرداخته شد. از مقایسه‌ی نتایج مشخص شد که افزایش یا کاهش بیش‌ازاندازه‌ی عرض میانی هیدروفویل زاویه‌دار، تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش ناپایداری طولی شناور نداشته است. لذا عرض میانی متوسط مورد بررسی، بهترین نسبت ابعادی در پایدارساز هیدروفویلی زاویه‌دار، برای شناور مبنا است. همچنین در سطح مقطع ثابت، در بررسی نسبت عرض به طول کورد پایدارساز هیدروفویلی ساده، مشخص شد، که افزایش عرض هیدروفویل تأثیر به‌مراتب بیشتری نسبت به افزایش طول کورد هیدروفویل دارد. درنهایت با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده، پایدارساز هیدروفویلی مناسب برای شناور تندرو سُرشی موردنظر پیشنهاد شده است. نتایج عددی نشان دهنده تأثیر مطلوب این پایدارساز در جهت رفع ناپایداری طولی شناور بوده است.

۱۰- مراجع

1- Savitsky, D., (1985), Planing craft. Naval Engineers Journal, Vol. 97, No.2. https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1985.tb03397.x

2- Faltinsen, O.M., (2005), Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles; Cambridge University Press: Cambridge, UK. https://doi.org/10.1017/CBO9780511546068

3- Ikeda Y., (2000), Stability of high-speed craft. In: Vassalos D, et al., editors. Con-temporary ideas on ship stability. New York: Elsevier Science Ltd.; 2000.p. 401–9 . http://dx.doi.org/10.1016/B978-008043652-4/50031-6

4- Moonesun, M., (2012), Hand book of naval architecture engineering, Publications of Kanoon Pezhohesh, 2nd Edition, ISBN: 9786005287745. (In Persian)

5- King D. W. and Lockwood A. L., (1928), Anticavitation plate for outboard motors. United States Patent Office. Patent No.:1,734, 911. Nov. 5, 1929, Appl. No. 290,306.

6- Larson W., (1984), Boat stabilizer. United States Patent Office. Patent No.: 4,487,152., Appl. No. 482,401.

7- Day, J. P. and Haag R. J., (1952), Planing Boat Porpoising-A Study of the Critical Boundries for a Series of Prismatic Hulls, Thesis submitted to Webb Institute of Naval Architecture, Glen Cove, Long Island, N.Y.

8- Savitsky, D., (1964), Hydrodynamic Design of Planing Hulls. Journal of Marine Technology, vol. 1, no. 1, pp. 71–95. https://doi.org/10.5957/mt1.1964.1.4.71

9- Martin M., (1978), Theoretical Determination of Porpoising Instability of High-Speed Planing Boats. Journal of Ship Research, Vol.22, No.1, pp.32-53. https://doi.org/10.5957/jsr.1978.22.1.32

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.1]

10- Clement, E. P. and Koelbel, J. O., (1991), Effects of step design on the performance of planing motorboats. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Miami, (FL), USA.
11- Ghadimi, P., Panahi, S. & Tavakoli, S., (2019), Hydrodynamic study of a double-stepped planing craft through numerical simulations. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. Vol. 41.
https://doi.org/10.1007/s40430-018-1501-1
12- Zeraatgar, H., Farsi, M., Yousef Nejad Miyandehi, R., (2010), Development of Principles of Seakeeping Trials of Planing Boat in Sea Waves, Journal of Marine Engineering. (In Persian)
http://dorl.net/dor/20.1001.1.17357608.1389.6.12.6.7
13- Rahmansetayesh, M. A., Khazaee R., Hajizadeh S., (2023), Numerical simulation of the effect of chine on the performance of planning hull. (In Persian)
http://dx.doi.org/10.61186/marineeng.19.39.153
14. Yousefifard, M., Maboodi, A., (2019), Evaluation of the effect of stern wedge on instability control and reduction of the resistance of a semi-planing catamaran, Journal of Marine Engineering. (In Persian)
http://dx.doi.org/10.29252/marineeng.15.30.69
15- Celano, T., (1998), The Prediction of Porpoising Inception for Modern Planing Craft. SNAME Transactions 106, pp.269-292.
16- Katayama, T. and Ikeda, Y., (1999), Hydrodynamic forces acting on porpoising craft at high-speed. J. Sh. Ocean Technol. 3, 17–26.
17- Katayama, T., (2002), Experimental techniques to assess dynamic instability of high-speed planing craft - non-zero heel, bow-diving. Porpoising Trans. Porp., Sixth International Ship Stability Workshop, Glen Cove, New York, USA.
18- Katayama, T., (2004), Mechanism of Porpoising Instabilities for High-Speed Planing Craft. Department of Marine System Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka Perfecture University, Sakai, Osaka, Japan.
19- Sun, H. & Faltinsen, O., (2007), Porpoising and Dynamic Behavior of planing vessels in calm water. Ninth International conference on fast sea transporation fast, shanghai, china.
20- Sun, H. and Faltinsen, O.M., (2011), Predictions of porpoising inception for planing vessels. Journal of Marine Science and Technology, 16(3):270-282.
https://doi.org/10.1007/s00773-011-0125-2
21- Ghadimi, P., Loni A., Nowruzi H., Dashtimanesh A., and Tavakoli S., (2014), Parametric study of the effects of trim tabs on running trim and resistance of planing hulls. Advances in Shipping and Ocean Engineering 3, no. 1, 1-12.
22- Mansoori, M. and Carlos Fernandes, A., (2016), The interceptor hydrodynamic analysis for inhibition the porpoising instability in high-speed crafts. Appl. Ocean Res., 57, 40–51.
https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.02.006
23- Xiaosheng, B., Hailong, S., Jin, Z., Yumin, S., (2019), Numerical analysis of the influence of fixed hydrofoil installation position on seakeeping of the planing craft. Appl. Ocean Res. 2019, 90, 101863.
https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101863
24- Tanha, A., Ghadimi, P., Fayz Chekab, M. A., Tavakoli, S., (2014), Numerical solution of the flow around the three-dimensional hydrofoil, in order to investigate the effect of vortices on the hydrodynamic characteristics of the hydrofoil., Marine Industries Conference. (In Persian)
25- Asgari, M., Seif, M. S., (2005), Hydrodynamic Resistance Reduction in Catamaran Assisted Hydrofoils. Marine Engineering Laboratory, Sharif University of Technology, No. 1, 2nd Edition. (In Persian)
https://dorl.net/dor/20.1001.1.2251600.1384.24.1.15.8
26- Aliffrananda, M.H.N. and Sulisetyono, A., (2020), Porpoising instability study of the floatplate during takeoff operation on calm water. The 5th International Conference on Marine Technology.
http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1052/1/012013
27- Karimi Baseri, H., Fereidooni J., Moonesun, M., Adjami, M., (2023), Analysis of Dynamics of hydrofoil craft in regular and irregular waves, Journal of Marine Engineering. (In Persian)
http://dx.doi.org/10.61186/marineeng.19.38.90
28- Sancak, E. and cakıcı, F., (2021), Determination of the optimum trim angle of a planing hull for minimum drag using savitsky method. GMO Journal of Ship and Marine Technology, Vol 220.
http://dx.doi.org/10.54926/gdt.951371
29- Shen, H., Xiao, Q., Zhou, J., Su, Y., Xiaosheng, B., (2022), Design of Hydrofoil for the Resistance Improvement of Planing Boat Based on CFD Technology, Ocean Engineering. Vol 255, 111413.
https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111413
30- Saeedi N., M., Kohansal, A., (2024), Effect of hydrofoil Stabilizer locations on porpoising of planing mono hull craft. International Journal of Maritime Technology(IJMT), Vol 20; p.13-25.
https://ijmt.ir/article-1-832-en.html
31- Sport marine technologies Inc. Products. Available: https://sesport.wpengine.com
32- McCroskey, W. J., (1987), A Critical Assessment of Wind Tunnel Results for the NACA 0012 Airfoil. NASA Technical Memorandum.
33- ITTC., (2014). Practical Guidelines for Ship CFD Applications. Recommended procedures and guidelines section: 7.5-03-02-03 2014b.
34- D. Anderson Jr., J., (2015), Introduction to Flight (8th Edition). McGraw-Hill.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.43.1]