



Numerical Investigation of the Effect of Transverse Step Location on Hydrodynamic Behavior and Longitudinal Stability of Planing Catamaran in Calm Water

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ebrahimi A.¹,
Shafaghath R.^{1*},
Yousefifard M.¹,
Haji Abadi A.¹

How to cite this article

Ebrahimi A, Shafaghath R, Yousefifard M, Haji Abadi. Numerical Investigation of the Effect of Transverse Step Location on Hydrodynamic Behavior and Longitudinal Stability of Planing Catamaran in Calm Water. Modares Mechanical Engineering, 2023; 23 (01):11-24.

¹Sea-Based Energy Research Group, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

*Correspondence

Address: Sea-Based Energy Research Group, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

rshafaghath@nit.ac.ir

Article History

Received: June 06, 2022
Accepted: October 31, 2022
ePublished: January 25, 2023

ABSTRACT

In this study, the effect of transverse steps location on hydrodynamic components and the longitudinal stability of the vessel has been investigated. The vessel studied in this research is a planning catamaran, each demi-hull with two transverse steps. At first, vessel resistance with a weight of 5.3 kg within a range of length Froude number of 0.49 to 2.9 in calm water has been calculated. Then, craft behavior was evaluated at displacements of 5.3, 4.6, and 4 Kg using the numerical method. The numerical simulation results have been validated with similar experimental results. The craft in 4 and 5.3 kg weights, in Froude numbers greater than 2.43 and 2.9, respectively, has a Porpoising instability. In order to improve the longitudinal stability of the vessel, the Taguchi test design has been used to determine the optimal location of the transverse steps. The results showed that by placing the transverse steps in the optimum location, the Porpoising instability in the vessel has been resolved. In planing mode, vessel resistance decreased by 12%, 9.5%, and 6.6% in the optimum state of transverse steps compared to the base state for the mentioned weights. In similar conditions, the lift force on the vessel increased by 15, 10, and 7 percent for the mentioned weights, respectively.

Keywords Planning catamaran, Numerical method, Taguchi test, Porpoising instability, Transverse steps.

CITATION LINKS

1- Comparison of numerical solution and semi-empirical formulas to predict the effects ...
2- Hydrodynamic design of planing hulls. 3- Experimental techniques to assess dynamic instability of high-speed planing craft-non-zero heel, bow-diving, porpoising and transverse porpoising. 4- Theoretical determination of porpoising instability of high-speed planing boats. 5- Predictions of porpoising inception for planing vessels. 6- Effect of varying depth of step, angle of after body keel, length of after body chine, and Gross load. 7- Dynamic stability of planing boats. 8- Toward numerical modeling of the stepped and non-stepped planing hull. 9- Numerical study of step forward swept angle effects on the hydrodynamic performance of a planing hull. 10- A critical CAE analysis of the bottom shape of a multi stepped air cavity planing hull. 11- A numerical way for a stepped planing hull design and optimization. 12- Experimental investigation of the wetted surfaces of stepped planing hulls. 13- Hydrodynamic study of a double-stepped planing craft through numerical simulations. 14- Experimental investigation of the effect of two steps on the performance and longitudinal stability ... 15- Experimental and numerical investigation of stepped planing hulls in finding an optimized step location and analysis of its porpoising phenomenon. 16- <https://ittc.info/members/member-organisations/national-iranian-marine-laboratory-nimala>. 17- Propulsion Committee. 18- General Guideline for Uncertainty Analysis in Resistance Tests. 19- Recommended Procedures. General Guideline for Uncertainty Analysis in Resistance Tests. 20- Recommended Procedures. General Guideline for Uncertainty Analysis in Resistance Tests. 21- Seakeeping Analysis of Planing Craft under Large Wave Height. Water. 22- ITTC. Recommended procedures and guidelines. 23- ITTC. Practical guidelines for ship CFD applications. 24- Hydrodynamic performance of planing craft with interceptor-flap hybrid combination. 25- Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids. 26- Hydrodynamic performances of small size swath craft. 27- ITTC. Practical guidelines for ship CFD applications. 28- Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method.

بررسی عددی تاثیر مکان پله‌ی عرضی بر رفتار هیدرودینامیکی و پایداری طولی شناور دو بدنه پروازی در آب آرام

علی ابراهیمی^۱، روزبه شفق^{۲*}، مهدی یوسفی فرد^۳، علی حاجی آبادی^۴

^۱ گروه پژوهشی انرژی‌های دریایی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

چکیده

در پژوهش حاضر تاثیر مکان پله‌های عرضی بر مولفه‌های هیدرودینامیکی و پایداری طولی شناور بررسی شده است. شناور مورد بررسی در این تحقیق یک شناور دو بدنه پروازی است که هر نیم بدنه آن دارای دو پله عرضی می‌باشد. در ابتدا با استفاده از روش آزمایشگاهی مقاومت شناور با وزن ۵/۳ کیلوگرم در محدوده عدد فرود طولی ۰/۴۹ تا ۲/۹ در آب آرام محاسبه شده است. سپس با استفاده از روش عددی رفتار شناور در وزن‌های ۵/۳، ۴/۶ و ۴ کیلوگرم ارزیابی گردیده است. نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج مشابه آزمایشگاهی اعتبار سنجی شده است. شناور در وزن‌های ۴ و ۵/۳ کیلوگرم به ترتیب در اعداد فرود بزرگتر از ۲/۴۳ و ۲/۹ دچار ناپایداری پورپوزینگ گردیده است. به منظور بهبود پایداری طولی شناور از طرح آزمایش تاگوچی برای تعیین مکان بهینه پله‌های عرضی استفاده شده است. نتایج نشان داد که با قرار گیری پله‌های عرضی در مکان بهینه، ناپایداری پورپوزینگ در شناور رفع شده است. در حالت پروازی مقاومت شناور در حالت بهینه پله‌های عرضی نسبت به حالت اولیه برای وزن‌های ذکر شده به ترتیب ۱۲، ۹/۵ و ۶/۶ درصد کاهش یافته است. در شرایط مشابه نیروی برا وارد بر شناور نیز برای وزن‌های مذکور به ترتیب ۱۵، ۱۰ و ۷ درصد افزایش یافته است.

کلیدواژه‌ها: شناور دو بدنه پروازی، روش عددی، ناپایداری پورپوزینگ، آزمایش تاگوچی، پله عرضی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۹

* نویسنده مسئول: aliebrahimi.nit@gmail.com

۱- مقدمه

امروزه استفاده از شناورهای تندرو در کاربردهای نظامی و غیر نظامی افزایش یافته است. از این رو طراحی مناسب و تحلیل دقیق این شناورها اهمیت ویژه‌ای یافته است. پایداری در دریا یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در طراحی این گونه شناورها می‌باشد. پایداری به محل مرکز ثقل شناور، نیروها و ممان‌های ناشی از جهت‌گیری و حرکت شناور بستگی دارد. نیروها و ممان‌های وارد بر شناور در سرعت‌های پایین ماهیت هیدرواستاتیکی و در سرعت‌های بالا ماهیت هیدرودینامیکی پیدا می‌کنند. در این حالت تعامل نیروها و ممان‌های وارد بر شناور، نقش اساسی در پایداری شناور ایفا می‌کنند. همچنین عدم تعامل این نیروها و ممان‌ها موجب ایجاد ناپایداری در شناور می‌گردد.

یکی از شایع‌ترین ناپایداری‌ها در شناورهای تندرو ناپایداری طولی یا پورپوزینگ است^[1]. پدیده پورپوزینگ یک ناپایداری طولی است که موجب وقوع هم‌زمان نوسانات پیچ (Pitch) و هیو (Heave) می‌گردد^[2]. این ناپایداری موجب آسیب‌های سازه‌ای شدید در شناور می‌شود و عملکرد شناور را مختل می‌کند. در اکثر مواقع این ناپایداری در اعداد فرود بالای ۵ رخ می‌دهد^[3-5]. به منظور جلوگیری از این ناپایداری، روش‌های مختلفی از قبیل اضافه نمودن پله(ها) عرضی به کف شناور و همچنین نصب زائده‌های مختلف به پاشنه شناور استفاده می‌شود. داوسون و همکاران^[6] در ۱۹۶۴ تاثیر اضافه نمودن پله عرضی را بر عملکرد یک شناور تندرو مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. بولانت و کودگا^[7] در ۱۹۹۲ به معرفی و بررسی ناپایداری‌های ایجاد شده در شناورهای پروازی پرداختند. ویسی و همکاران^[8] در ۲۰۱۴ با استفاده از روش عددی مولفه‌های هیدرودینامیکی یک شناور تندرو را با و بدون پله عرضی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از پله عرضی موجب کاهش مقاومت شناور می‌گردد. نورقاسمی و همکاران^[9] در ۲۰۱۷ با استفاده از روش عددی اثر تغییر زاویه پله عرضی را بر مولفه‌های هیدرودینامیکی یک شناور تندرو بررسی کردند. نتایج نشان داد که با تغییر زاویه پله به سمت سینه شناور، تریم (Trim) (غلتش طولی شناور حول محور عرضی) و بالآمدگی (حرکت خطی شناور در راستای عمودی) افزایش و مقدار مقاومت کاهش یافته است. کاسینوتا و همکاران^[10] در ۲۰۱۸ عملکرد یک شناور با دو پله عرضی را در دو حالت با و بدون هوادهی مصنوعی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که هوادهی مصنوعی موجب کاهش مقاومت اصطکاکی شده است. کاترینو و همکاران^[11] در ۲۰۱۸ با استفاده از روش عددی رفتار شناور تندرو پله‌دار را در حالت‌های مختلف از لحاظ ارتفاع و مکان پله بررسی نمودند. نتایج نشان داد که به کار گرفتن پله در ارتفاع و مکان مناسب، موجب کاهش مقاومت و به تاخیر انداختن ناپایداری پورپوزینگ می‌شود. نجفی و همکاران^[12] در یک مطالعه آزمایشگاهی کاراکترهای هیدرودینامیکی را برای شناور تندرو پله‌دار محاسبه نمودند. سپس بر مبنای نتایج حاصل روابطی برای محاسبه الگوی سطح خیس کف شناور پله‌دار ارائه نمودند. قدیمی و همکاران^[13] در ۲۰۱۹ با بررسی رفتار یک شناور تندرو در حالت با و بدون پله‌ی عرضی نشان دادند که با افزودن پله عرضی به شناور در حالت پروازی مقاومت اصطکاکی را کاهش و مقاومت فشاری را افزایش می‌یابد. ساجدی و قدیمی^[14] در ۲۰۲۰ با استفاده از روش آزمایشگاهی تاثیر اضافه نمودن پله عرضی را بر افزایش پایداری طولی و کاهش مقاومت یک شناور تندرو بررسی نمودند. در ادامه ساجدی و قدیمی^[15] در ۲۰۲۰ با استفاده از روش آزمایشگاهی و عددی مکان بهینه پله عرضی را برای یک شناور تندرو تعیین نمودند. نتایج نشان داد که

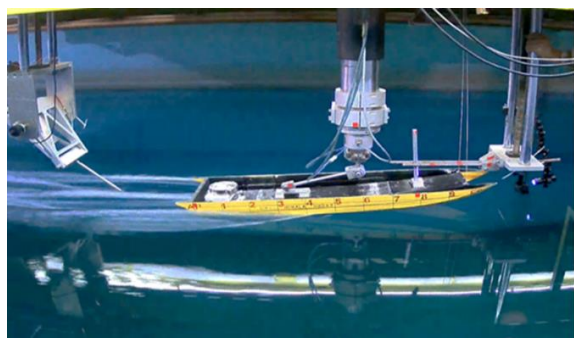
جدول (۱) مشخصات اصلی شناور

مقدار	نماد	مشخصه
۱ m	LOA	طول کل شناور
۰/۳ m	B	عرض صفحه آبخور
۰/۰۸ m	b	عرض نیم بدنه‌ها
۰/۵ m (% ۴۵/۵ L)	L _{s1}	فاصله پله اول تا پاشنه
۰/۲۶ m (% ۲۳/۵ L)	L _{s2}	فاصله پله دوم تا پاشنه
۷ mm	h	ارتفاع پله
۵/۳ ۴/۶ ۴ kg	Δ	وزن
(۳۰% ۴۰% ۳۵%)L	LCG	مرکز ثقل تا عمود پاشنه
۴۸ ۵۱ ۴۶ mm	T	آب‌خور در وسط شناور
۱/۲۴ -۱/۳ ۰/۶ deg	τ	تیرم استاتیکی

شده است. آزمایش‌ها مطابق با توصیه ITTC^[17] انجام شده‌اند. مشخصات اصلی حوضچه کشتی در جدول ۲ ارائه شده است. مدل شناور برای انجام آزمایش در زیرارابه نصب گردیده است. این ارابه شامل دو دینامومتر است که قادر به اندازه‌گیری نیروهای طولی، عرضی و گشتاور می‌باشند. در شکل ۲ نمایی از شناور مورد بررسی در حال آزمایش در عدد فرود طولی ۱/۵۵ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳ نمایی شماتیک از تجهیزات و تنظیمات آزمایشگاهی نشان داده شده است که شامل ارابه کشتی (جهت کشیدن شناور در حوضچه)، دینامومتر (جهت محاسبه نیروی مقاومت) و همچنین سنسور زاویه سنج و جابه‌جایی برای سنجش میزان حرکات شناور می‌باشد. عدد فرود طولی مطابق با رابطه زیر بر مبنای طولی و سرعت شناور تعریف می‌گردد:

جدول (۲) مشخصات اصلی حوضچه کشتی آزمایشگاه ملی دریایی خلیج فارس

مقدار	مشخصات
۴۰۰ m	طول
۶ m	عرض
۴ m	عمق
۱۸ m/s	بیشترین سرعت کشتی
۱۰۰۲ kg/m ³	چگالی آب
۹/۶۷ × ۱۰ ^{-۷} m ² /s	لزجت سینماتیکی آب
۲۱ C°	دمای آب



شکل (۲) آزمایش شناور در حوضچه کشتی آزمایشگاه دریایی خلیج فارس در عدد فرود طولی ۱/۵۵

استفاده از پله عرضی در یک فاصله بهینه از پاشنه، ناپایداری پورپوزینگ را به تاخیر می‌اندازد.

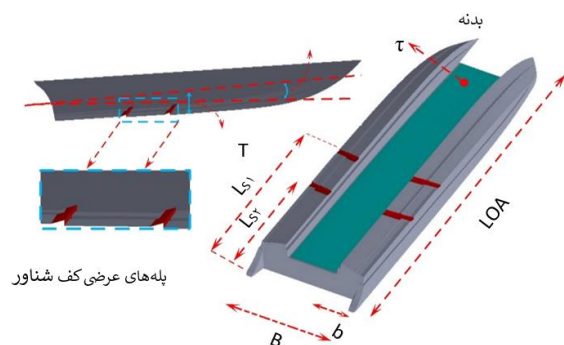
با توجه به مطالعات گذشته به کار گرفتن پله عرضی در شناورهای تندرو یکی از موثرترین و بهترین روش‌ها به منظور بهبود مقاومت و پایداری طولی شناور می‌باشد. بر همین مبنا در پژوهش حاضر تاثیر مکان بهینه پله‌های عرضی در رفتار شناور تندرو دو بدنه به منظور بهبود مولفه‌های هیدرودینامیکی و پایداری طولی بررسی گردیده است. در این راستا ابتدا با استفاده از روش آزمایشگاهی، مقاومت شناور دو بدنه پروازی با وزن ۵/۳ کیلوگرم در محدوده‌ی عدد فرود طولی ۰/۴۹ تا ۲/۹ محاسبه شده است. سپس با به کارگیری روش عددی، مولفه‌های دینامیکی شناور در سه وزن ۵/۳، ۴/۶ و ۴ کیلوگرم محاسبه و تحلیل شده است. در ادامه به منظور بهبود رفتار دینامیکی و پایداری طولی شناور، موقعیت بهینه پله‌های عرضی با استفاده از طرح آزمایش تاگچی تعیین گردیده است. سپس رفتار دینامیکی و پایداری طولی شناور در موقعیت بهینه پله‌های عرضی برای وزن‌های ذکر شده مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

۲- مشخصات هندسی شناور مورد بررسی

در این مطالعه یک شناور دو بدنه پروازی مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱). هندسه این شناور شامل یک بدنه میانی با مقطع فویل و دو نیم بدنه پروازی پلدار می‌باشد. بدنه میانی و دو نیم بدنه پروازی به ترتیب در تولید نیروی برا آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی نقش اساسی را ایفا می‌کنند. نیم بدنه‌های پروازی شامل دو پله عرضی می‌باشند که به ترتیب در فواصل ۰/۲۶ و ۰/۵ متر از پاشنه شناور قرار دارند. مشخصات اصلی شناور در جدول ۱ آورده شده است.

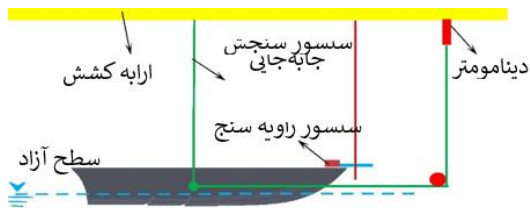
۳- مطالعه آزمایشگاهی

به منظور صحت‌سنجی نتایج عددی از نتایج مطالعه آزمایشگاهی استفاده شده است. این آزمایش‌ها در آزمایشگاه ملی دریایی خلیج فارس (عضو کنفرانس بین المللی حوضچه کشتی^[16] ITTC) انجام



شکل (۱) مشخصات هندسی شناور دو بدنه‌ی پروازی

سرعت‌های مورد بررسی نشان دهنده درصد عدم قطعیت کمتر از ۱ است.



شکل ۳) نمایی شماتیک از تنظیمات آزمایشگاهی



شکل ۴) نمایی از مدل شناور مورد بررسی

۴- طراحی آزمایش

طراحی آزمون‌ها، روش‌های هستند که با صرف کم‌ترین هزینه و زمان بیشترین بازدهی را ایجاد می‌کنند. یکی از پر بازده‌ترین روش‌های طراحی آزمایش، روش تاگوجی می‌باشد. در مقاله حاضر به منظور تعیین مکان بهینه پله‌های عرضی در طول شناور از طرح آزمایش تاگوجی استفاده شده است.

برای طراحی آزمایش ۴ فاکتور فاصله پله‌های اول و دوم، جرم شناور و عدد فرود طولی در نظر گرفته شده است. برای هر کدام از چهار فاکتور ذکر شده ۳ سطح تعیین شده است. در جدول ۴ فاکتورهای مورد بررسی و سطوح در نظر گرفته شده برای طراحی آزمایش ارائه شده است. تغییرات مکان طولی پله‌های عرضی نسبت به حالت پایه به اندازه $\pm 7/3\%$ طول شناور در نظر گرفته شده است. همچنین اعداد فرود مورد بررسی در طراحی آزمایش به گونه‌ای تعیین گردیده که شناور در حالت حرکتی پروازی باشد. با توجه به ۴ فاکتور و ۳ سطح در نظر گرفته شده تاگوجی ۹ طرح آزمایش را پیشنهاد می‌دهد.

جدول ۴) نتایج مقاومت حاصل از آزمایش شناور در حوضچه کشش

مرتبۀ فاکتورها	فاکتورهای مورد بررسی		
	فاصله پله اول از پاشنه (متر)	فاصله پله دوم از پاشنه (متر)	جرم شناور (کیلوگرم)
۱	(% ۳۸/۲ L) ۰/۴۲	(% ۱۶/۴ L) ۰/۱۸	۴
۲	(% ۴۵/۵ L) ۰/۱۵	(% ۲۳/۶ L) ۰/۲۶	۴/۶
۳	(% ۵۲/۷ L) ۰/۱۵۸	(% ۳۰/۹ L) ۰/۳۴	۵/۳

$$Fr_L = \frac{V}{\sqrt{L \times g}} \quad (1)$$

که در آن V بیانگر سرعت شناور بر حسب متر بر ثانیه و g بیانگر شتاب گرانش بر حسب متر بر مجذور ثانیه است.

شناور با وزن ۵/۳ کیلوگرم و مرکز ثقل طولی ۳۰٪ طول شناور از پاشنه در محدوده عدد فرود طولی ۰/۴۹ تا ۲/۹۱ مورد آزمایش قرار گرفته است. برای تنظیم آبخور و تریم اولیه ۱/۲۴ درجه، از یک وزنه در انتهای شناور استفاده شده است. در این آزمایش‌ها جزء افقی نیروی مقاوم در حرکت رو به جلوی شناور در سرعت ثابت به عنوان نیروی پسا، با استفاده از دینامومتر (بر حسب نیوتن) اندازه‌گیری شده است (جدول ۳). در شکل ۳ منظور از ناپایداری ناپایداری طولی پورپویزینگ در شناور می‌باشد. تمامی آزمایش‌ها در دو درجه‌ی آزادی هیو و پیچ انجام صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود طولی، مقاومت شناور افزایش می‌یابد و در عدد فرود طولی ۲/۹۱، با ترکیب حرکات هیو و پیچ، شناور دچار ناپایداری طولی پورپویزینگ می‌شود.

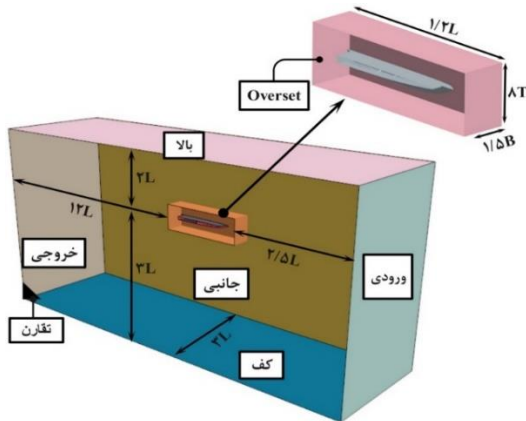
جدول ۳) نتایج مقاومت حاصل از آزمایش شناور در حوضچه کشش

عدد فرود طولی	۰/۴۹	۰/۹۸	۱/۵۵	۱/۹۴	۲/۴۳	۲/۹۱
مقاومت (نیوتن)	۷/۲۶	۹/۶۱	۱۲/۷۵	---	---	ناپایدار

۳-۱- بررسی عدم قطعیت

بررسی عدم قطعیت در این آزمایش‌ها بر مبنای دستورالعمل‌های ITTC^[18] انجام شده است. بر این اساس در تحلیل عدم قطعیت مقاومت اندازه‌گیری شده، مواردی شامل مدل هندسی، کالیبراسیون تجهیزات اندازه‌گیری (دینامومتر)، دمای آب، سرعت ارابه و نتایج اندازه‌گیری شده زیر در نظر گرفته شده است. مدل هندسی مورد بررسی در این آزمایش از جنس فایبرگلاس می‌باشد (شکل ۴). تطابق هندسی مدل ایجاد شده با نقشه‌های ۳ بعدی بر اساس معیار تعیین شده توسط ITTC^[19] انجام شده است. مطابق معیار ITTC میزان خطای مدل ساخته شده در عرض و ارتفاع شناور نباید بیشتر از $\pm 1\%$ میلی‌متر باشد. همچنین خطای ایجاد شده در راستای طول نباید از $\pm 1\%$ میلی‌متر یا $LPP \pm 0.05\%$ تجاوز کند. برای سنجش خطای مدل، مقاطع عرضی در فواصل طولی مشخصی از بدنه رسم شدند. سپس ابعاد مدل در نقاط مختلف اندازه‌گیری گردیده است. اندازه‌گیری‌های انجام شده خطای کمتر از ۱ میلی‌متر را نشان دادند که نشان‌دهنده دقت مدل ساخته شده می‌باشد. همچنین کالیبراسیون تجهیزات به صورت استاندارد انجام شد و دقت عملکرد در آزمایش‌های مختلف بارها به اثبات رسید. میزان چگالی و لزجت آب بر اساس استانداردهای ITTC^[20]، بر مبنای دمای آب تعیین گردید. آزمایش مربوط به محاسبه مقاومت در هر سرعت ۵ با تکرار شد. نتایج مربوط به عدم قطعیت مقاومت در

به ونه‌ای تعیین شده است که حداقل معیارهای ITTC^[22] برآورده شود. بر این اساس فاصله مرز ورودی تا سینه شناور ۲/۵ برابر طول شناور است و فاصله پاشنه شناور تا مرز خروجی به منظور جلوگیری از جریان بازگشتی ۱۲ برابر طول شناور تعیین شده است.



شکل ۵) ابعاد فضای محاسباتی و مرزهای تعیین شده

فاصله مرزهای بالا و پایین فضای محاسباتی تا سطح آزاد به ترتیب ۲ و ۳ برابر طول شناور است. همچنین فاصله دیواره کناری برای به حداقل رساندن تاثیر مرز جانبی بر روی شناور، ۳ برابر طول شناور تعیین شده است. با توجه به تقارن بدنه شناور و جریان سیال شبیه‌سازی به صورت متقارن انجام شده است. شرایط مرزی تعیین شده برای سطوح فضای محاسباتی مطابق جدول ۶ می‌باشد.

در این شبیه‌سازی گام زمانی مطابق با رابطه رابطه ۱۴ ارائه شده توسط ITTC^[23] تعیین گردیده است.

جدول ۶) شرایط مرزی فضای محاسباتی

شرایط مرزی	سطوح	فضای محاسباتی
سرعت ورودی	ورودی، جانبی، بالا و کف	Background
فشار خروجی	خروجی	
سطح متقارن	تقارن	
شبکه‌بندی دینامیکی	overset	Overset
سطح تقارن	تقارن	
دیواره بدون لغزش	بدنه شناور	

$$\Delta t = 0.01 \sim 0.005 \frac{l}{V} \quad (14)$$

l و V به ترتیب بیانگر سرعت و طول خیس شده شناور می‌باشند. در این مسئله، شبیه‌سازی در حالت ناپایا (Unsteady) و به صورت کاملاً سه بعدی، با در نظر گرفتن جریان دو فازی انجام شده است.^[24] تنظیمات در نظر گرفته شده برای حل مسئله در جدول ۷ ارائه شده است. همچنین برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج نسبت به زمان از تغییرات مولفه‌های هیدرودینامیکی در روند حل استفاده شده است به این صورت که باید شرایطی ایجاد گردد که با

۵- مطالعه‌ی عددی

۱-۵ معادلات حاکم

در این پژوهش سیال‌های مورد استفاده آب و هوا هستند که نیوتنی و تراکم ناپذیر فرض شده‌اند. بر این اساس معادلات حاکم بر جریان (پیوستگی و مومنوم) به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla \cdot (V \otimes V) \right) = \nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla V + (\nabla V)^T)] - gK \quad (3)$$

V بردار سرعت، ρ چگالی و μ لزجت دینامیکی می‌باشد. برای مدلسازی جریان آشفتنه از مدل آشفتگی $k-\omega$ SST استفاده شده

است.^[21]

$$v_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; SF_2)} \quad (4)$$

$$\frac{D\rho k}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \mu_t \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k \quad (5)$$

$$\frac{D\rho \omega}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \mu_t \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\gamma}{v_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (6)$$

$$F_2 = \tanh(\text{arg} g_2^2) \quad (7)$$

$$\text{arg} g_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y^*}; \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \quad (8)$$

Y بیانگر فاصله تا دیواره (بدنه شناور) است. در معادلات ذکر شده ضرایب ثابت σ_k ، σ_ω و β نتیجه‌ی ترکیب ضرایب ثابت دو مدل آشفتگی $k-\omega$ و $k-\epsilon$ هستند. مقدار Φ بر اساس ضرایب ثابت Φ و محاسبه می‌شود که این ضرایب مطابق جدول ۵ تعیین می‌شوند.

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1) \quad (9)$$

$$F_1 = \tanh(\text{arg} g_1^4) \quad (10)$$

$$\text{arg} g_1 = \min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y^*}; \frac{500v}{y^2 \omega} \right); \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{kw} y^2} \right) \quad (11)$$

$$CD_{kw} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-20} \right) \quad (12)$$

برای توصیف مرز مشترک بین دو فاز از روش کسر حجمی سیال استفاده شده است (رابطه (۱)).

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (V\alpha) = 0 \quad (1)$$

α مقدار کسر حجمی است و برای دو سیال آب و هوا به ترتیب برابر صفر و یک در نظر گرفته می‌شود. در پژوهش حاضر برای حل معادلات حاکم بر جریان، به دست آوردن نتایج و بررسی و نمایش آنها از نرم‌افزار تجاری Star CCM+ - V.2021.3 استفاده شده است.

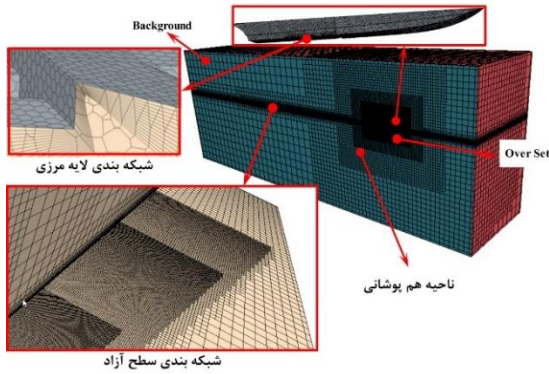
۲-۵ دامنه‌ی محاسباتی و شرایط مرزی و تنظیمات حلگر

ابعاد فضای محاسباتی و سطوح در نظر گرفته شده در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی ابعاد فضای محاسباتی

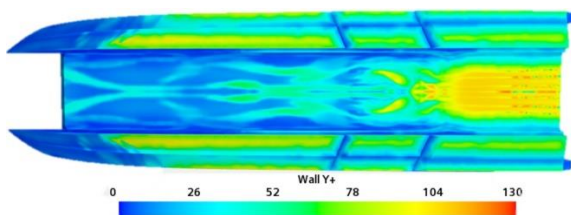
گذشت زمان تغییر چندانی در مولفه‌های هیدرودینامیکی ملاحظه نشود.

جدول ۷) تنظیمات اولیه حلگر

مشخصات	تنظیمات تعیین شده
نوع حلگر	ناپایا
روش دو فازی	حجم سیال
روش کوپل سرعت و فشار	الگوریتم SIMPLE
روش گسسته سازی زمان	بالادست مرتبه اول
تعداد تکرار حل در هر گام زمانی	۱۰
روش درون یابی در ناحیه Overset	خطی (Linear)



شکل ۶) شبکه‌بندی فضای محاسباتی



شکل ۷) مقادیر y^+ در نقاط مختلف کف شناور در عدد فرود طولی ۱/۵۰ و وزن ۵/۳ کیلوگرم

۵-۲- تولید شبکه

دقت نتایج شبیه‌سازی به طور مستقیم به کیفیت و نوع شبکه‌بندی وابسته است. کاریکا و همکاران^[25] در تحقیقات خود نشان دادند که استفاده از شبکه‌بندی دینامیکی در شبیه‌سازی حرکات شناور تندرو دقت محاسبات را افزایش می‌دهد. نتایج تحقیقات انجام شده توسط بگوویک و همکاران^[26] نشان داد که استفاده از شبکه‌بندی شش ضلعی بی‌سازمان در شبکه‌بندی دینامیکی و استفاده از شبکه‌بندی باسازمان در سایر بخش‌های فضای محاسباتی موجب کاهش تعداد شبکه‌بندی و زمان محاسبات خواهد شد. بر همین مبنا در این شبیه‌سازی از روش شبکه‌بندی دینامیکی استفاده شده است. در این روش فضای محاسباتی به دو بخش Overset و Background تقسیم می‌شود. ناحیه Overset با استفاده از شبکه‌بندی شش ضلعی بی‌سازمان و ناحیه Background با استفاده از مش‌های Trimmed با سازمان شبکه‌بندی شده است. فضای محاسباتی با توجه به الگوی رفتار شناور و اهمیت قسمت‌های مختلف به ۱۲ بخش با تعداد شبکه‌بندی مختلف تقسیم شده است. شکل ۶ شبکه‌بندی بخش‌های مختلف فضای محاسباتی را نشان می‌دهد.

به منظور محاسبه دقیق تنش و فشار جریان سیال، در اطراف بدنه از تابع دیواره و شبکه‌بندی لایه‌ای منشوری استفاده شده است. مقدار مولفه‌های شبکه‌بندی لایه‌ای منشوری بر مبنای مقدار y^+ تعیین می‌گردد. بر اساس توصیه ITTC^[27] مقدار y^+ در جریان‌های آشفته باید بین ۳۰ تا ۳۰۰ باشد. در این پژوهش مقدار y^+ در وزن‌ها و سرعت‌های مختلف کمتر از ۱۰۰ می‌باشد. در شکل ۷ مقدار y^+ را در هر نقطه از شناور در وزن ۵/۳ کیلوگرم برای عدد فرود طولی ۱/۵۰ نشان داده شده است.

۵-۳- استقلال حل از شبکه‌بندی و اعتبار سنجی مدل عددی

به منظور ارزیابی شبکه‌بندی انجام شده و همچنین استقلال حل از تعداد شبکه، چهار حالت مختلف از نظر تعداد شبکه در نظر گرفته شده است. سپس مقاومت، تریم و بالآمدگی شناور با وزن ۵/۳ کیلوگرم در عدد فرود طولی ۱/۵۵ برای حالت‌های شبکه‌بندی مذکور محاسبه شده است (شکل ۸). مشاهده می‌شود که از حالت سوم به بعد افزایش تعداد شبکه تاثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد و حل از تعداد شبکه‌بندی مستقل می‌شود. لذا برای داشتن دقت کافی در حل مسئله و کاهش زمان محاسبات حالت سوم به عنوان شبکه‌بندی پایه در نظر گرفته شده است.

در جدول ۸ نتایج شبیه‌سازی عددی مقاومت شناور با وزن ۵/۳ کیلوگرم با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. مقایسه نتایج مقاومت شناور نشان می‌دهد که بیشترین خطای ایجاد شده ۴/۳۶ % می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که شبیه‌سازی حاضر به خوبی می‌تواند رفتار شناور را پیش‌بینی کند.

۶- نتایج و بحث

۶-۱- مقاومت، تریم و بالآمدگی شناور پایه

در جدول ۹ نتایج مربوط به مقاومت، تریم و بالآمدگی در وزن‌های مختلف ارائه شده است. در تمامی وزن‌های بررسی شده با افزایش عدد فرود طولی، مقاومت و تریم شناور به ترتیب روندی افزایشی و کاهش را طی می‌کنند. همچنین بالآمدگی شناور با افزایش عدد فرود طولی، افزایش می‌یابد

با قرار گیری شناور در حالت پروازی بدنه از آب خارج می‌شود و سطح خیس شناور کاهش می‌یابد. در این حالت محل اثر نیروهای

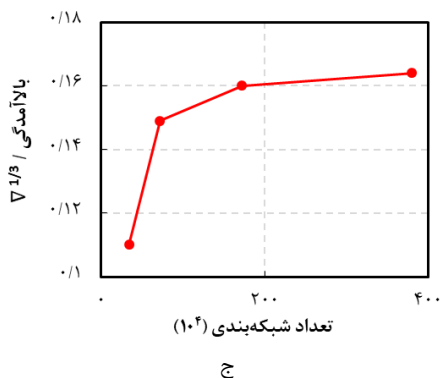
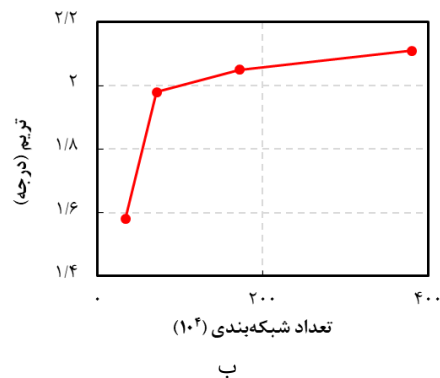
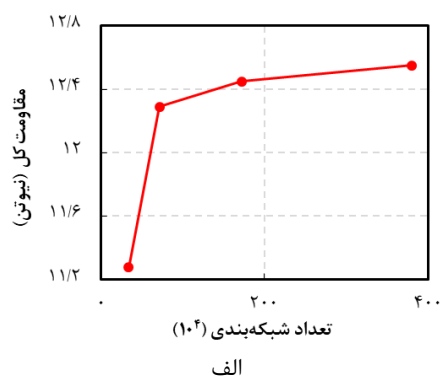
ناپایداری پورپویزینگ در شناور شده است. همچنین در وزن ۴/۶ کیلوگرم این اتفاق رخ نمی‌دهد و شناور پایداری خود را حفظ می‌کند.

۲-۶- نتایج طراحی آزمایش

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی، برای حالت‌های پیشنهادی طرح آزمایش تاگوچی در جدول ۱۰ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در آزمایش دوم با جابه‌جایی پله‌های عرضی، شناور پایداری خود را حفظ می‌کند در حالی که در شرایط مشابه، شناور پایه دچار ناپایداری پورپویزینگ شده بود. همچنین در برخی حالت‌ها رفتار هیدرودینامیکی شناور بهبود یافته است و برعکس. تاثیر جابه‌جایی پله‌های عرضی اول و دوم بر مولفه‌های هیدرودینامیکی با استفاده از تحلیل سیگنال به نوبت سنجیده شده است و نتایج مربوط به آن به ترتیب در شکل ۹ و شکل ۱۰ نشان داده شده است. به طور کلی نسبت سیگنال به نویزهای استاندارد بر سه نوع هستند: هرچه کمتر-بتر، هرچه به مقدار اسمی نزدیک‌تر-بتر و هرچه بزرگ‌تر-بتر^[28]. در این تحقیق هر چه مقدار مولفه‌های هیدرودینامیکی کمتر باشد نتیجه بهتری حاصل می‌شود در این حالت هر چه نرخ سیگنال به نویز خروجی‌ها بیشتر باشد مولفه‌های هیدرودینامیکی مقدار کمتری دارند. در شکل ۹ و شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که مولفه‌های هیدرودینامیکی از قبیل مقاومت، تریم و بالآمدگی برای پله‌های عرضی اول و دوم به ترتیب در سطوح دوم و سوم که نرخ سیگنال به نویز بیشینه است در کمترین مقدار خود قرار دارند. همچنین در این حالت پایداری طولی شناور حفظ شده است. در نتیجه پله‌های عرضی اول و دوم به ترتیب در فواصل ۰/۵ و ۰/۳۴ متر از پاشنه شناور به عنوان حالت مطلوب از لحاظ هیدرودینامیکی و پایداری طولی در نظر گرفته شده است. به عبارتی هر کدام از پله‌های عرضی در حالت بهینه نسبت به حالت پایه، ۰/۸ متر فاصله بیشتری از پاشنه شناور دارند.

۳-۶- مقاومت، تریم و بالآمدگی شناور در حالت بهینه

در این قسمت شناور در حالت بهینه پله‌های عرضی و در وزن‌های ۵/۳، ۴/۶ و ۴ کیلوگرم مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی‌ها در سه عدد فرود طولی ۱/۹۴، ۲/۴۳ و ۲/۹۱ انجام شده است. در جدول ۱۱ نتایج مقاومت، تریم و بالآمدگی مربوط به شناور در دو حالت پایه و بهینه قرارگیری پله‌های عرضی ارائه شده است. در حالت بهینه قرارگیری پله‌های عرضی، شناور در وزن ۴ کیلوگرم در عدد فرود طولی ۲/۴۳ دچار ناپایداری پورپویزینگ نمی‌شود و پایداری خود را حفظ می‌کند. همچنین در عدد فرود طولی ۲/۹۱ ناپایداری پورپویزینگ اتفاق می‌افتد اما نسبت به حالت پایه دامنه ناپایداری به شدت کاهش می‌یابد. در وزن ۴/۶ کیلوگرم با



شکل ۸) الف) مقاومت، ب) تریم و ج) بالآمدگی محاسبه شده در حالت‌های مختلف شبکه‌بندی

هیدرودینامیکی یا مرکز فشار به مرکز ثقل شناور نزدیک می‌شود و از آن عبور می‌کند و موجب ایجاد تریم منفی و افزایش سطح جدول ۸) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در حالت اول وزنی

حالت وزنی مورد بررسی	عدد فرود طولی	نیروی مقاومت (نیوتن)		درصد خطا
		آزمایشگاهی	عددی	
حالت دوم	۰/۴۹	۰/۷۴	۷/۰۷	۳/۰۳ %
	۰/۹۷	۰/۹۸	۹/۲۲	۴/۳۶ %
	۱/۵۵	۱/۳	۱۲/۴۵	۳/۱۲ %
	۱/۹۴	----	۱۴/۲۲	----
	۲/۴۳	----	۱۵/۸۹	----
	۲/۹۱	ناپایدار	ناپایدار	----

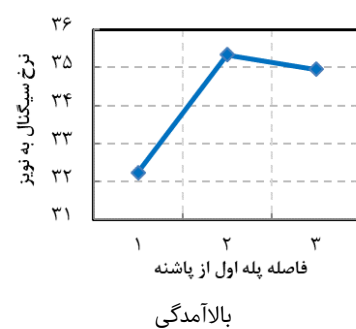
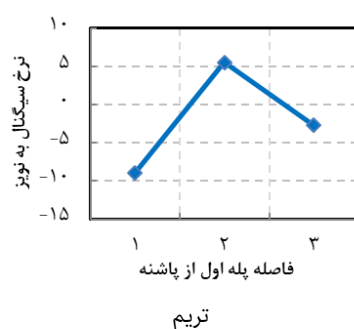
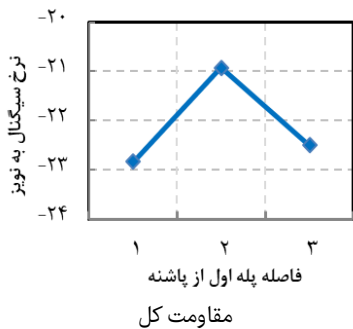
خیس می‌گردد. تکرار متناوب این عمل موجب ایجاد ناپایداری طولی پورپویزینگ در شناور می‌شود. این عمل در وزن‌های ۵/۳ و ۴ کیلوگرم به ترتیب در اعداد فرود ۲/۹۱ و ۲/۴۳ موجب ایجاد

جدول ۹) مقادیر مقاومت، تریم و بالآمدگی در وزن‌های مختلف

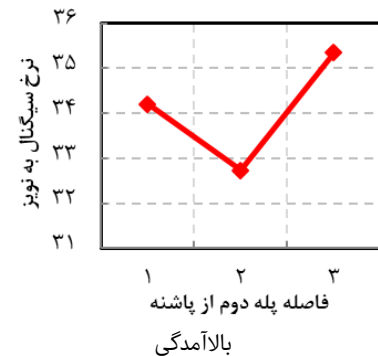
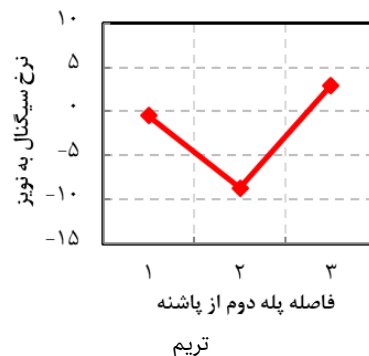
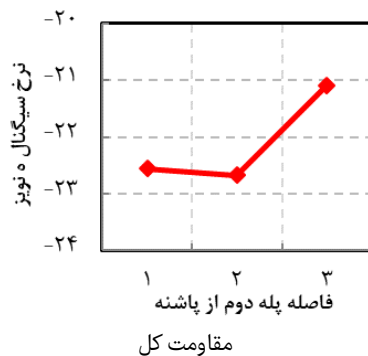
عدد فرود طولی	وزن ۵/۳ کیلوگرم			وزن ۴/۶ کیلوگرم			وزن ۴ کیلوگرم		
	مقاومت کل (نیوتن)	تریم (درجه)	بالآمدگی ∇ / $1/3$	مقاومت کل (نیوتن)	تریم (درجه)	بالآمدگی ∇ / $1/3$	مقاومت کل (نیوتن)	تریم (درجه)	بالآمدگی ∇ / $1/3$
۰/۴۹	۷/۰۶	۵/۲۲	۰/۰۳	۴/۵۱	۰/۹۷	۰/۰۱	۳/۸۲	۲/۱۹	۰/۰۱
۰/۹۷	۹/۱۲۸	۴/۵۴	۰/۰۱	۸/۱۴	۱/۷	۰/۰۸	۶/۴۷	۱/۸۵	۰/۰۲
۱/۵۵	۱۲/۴۵	۲/۰۵	۰/۱۶	۱۲/۷۴۸	۱/۰۶	۰/۱۱	۸/۰۴	۱/۱۲	۰/۰۵
۱/۹۴	۱۴/۲۲	۲/۱۶	۰/۱۷	۱۷/۱۶۵	۱/۲۴	۰/۱۴	۸/۹۲	۱/۷۲	۰/۰۱
۲/۴۳	۱۵/۸۹	۲/۸۶	۰/۱۶	۱۹/۶۱	۱/۷۷	۰/۱۸	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
۲/۹۱	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	۱۹/۸۱	۲/۰۶	۰/۲۱	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار

جدول ۱۰) طرح آزمایش پیشنهادی تاگوچی و نتایج تحلیل عددی

شماره آزمایش	فاکتورهای آزمایش				بالآمدگی ∇ / $1/3$
	جرم	FrL	LS1	LS2	
۱	۱	۱	۱	۱	۰/۱۱
۲	۱	۲	۲	۲	۰/۰۱۳
۳	۱	۳	۳	۳	ناپایدار
۴	۲	۱	۲	۳	۰/۰۸
۵	۲	۲	۳	۱	۰/۱۲
۶	۲	۳	۱	۲	۰/۲۱
۷	۳	۱	۱	۲	۰/۰۱
۸	۳	۲	۲	۳	۰/۱۴
۹	۳	۳	۳	۱	ناپایدار



شکل ۹) تاثیر جابه‌جایی پله عرضی اول بر مولفه‌های هیدرودینامیکی



شکل ۱۰) تاثیر جابه‌جایی پله عرضی دوم بر مولفه‌های هیدرودینامیکی

براشی از دو سیال آب و هوا در حالت پایه و بهینه قرار گیری پله‌های عرضی مقایسه شده است. در هر دو حالت قرار گیری پله‌های عرضی بیش از نیمی از نیروی شناور ناشی از سیال هوا می‌باشد که این عامل نشان دهنده اهمیت سیال هوا در رفتار دینامیکی و پایداری این گونه از شناورها می‌باشد. در حالت بهینه قرار گیری پله‌های عرضی افزایش ناحیه‌ی هوادهی پله دوم و همچنین افزایش تریم شناور موجب افزایش نیروی برا آیرودینامیکی گردیده است به طوری که در وزن‌های ۵/۳، ۴/۶ و ۴ کیلوگرم نیروی برا آیرودینامیکی به طور میانگین به ترتیب ۱۰، ۷ و ۷ درصد نسبت به حالت پایه افزایش یافته است.

۶-۵- سطح خیس شده شناور

با توجه به چگالی و لزجت بالای آب نسبت به هوا، سطح در معرض سیال آب یکی از عوامل مهم در مقاومت شناور به حساب می‌آید. در جدول ۱۲ سطح خیس شده شناور در حالت بهینه قرار گیری پله‌های عرضی با حالت پایه مقایسه شده است. در وزن ۴/۶ و ۵/۳ کیلوگرم سطح خیس شناور در حالت بهینه نسبت به حالت پایه به طور میانگین به ترتیب ۳۶ و ۳۴ درصد در حالت پروازی کاهش یافته است. همچنین در وزن ۴ کیلوگرم در عدد فرود طولی ۱/۹۴ سطح خیس شناور در حالت بهینه کاهش یافته است. در شکل ۱۳ سطح خیس شده کف شناور در عدد فرود طولی ۲/۴۳ برای دو حالت بهینه و پایه‌های عرضی نشان داده شده است. در وزن ۵/۳ کیلوگرم در عدد فرود طولی ۲/۴۳ تریم شناور در حالت بهینه نسبت به پایه افزایش یافته است و موجب شده تا محل برخورد سیال به سینه شناور به پاشنه نزدیک‌تر شود و سطح خیس کاهش یافته است. همچنین در وزن‌های ۴ و ۴/۶ کیلوگرم بهینه کردن محل پله‌های عرضی موجب افزایش ناحیه هوادهی در پشت پله دوم و کاهش سطح خیس در عدد فرود طولی ۲/۴۳ گردیده است.

جابه‌جایی پله‌های عرضی شناور همچنان پایدار باقی می‌ماند. همچنین در وزن ۵/۳ کیلوگرم با بهینه شدن مکان پله‌های عرضی در عدد فرود طولی ۲/۹۱ شناور پایدار طولی خود را حفظ می‌کند و ناپایداری پورپویزینگ رخ نمی‌دهد. مقاومت شناور در حالت بهینه برای وزن‌های ۴، ۴/۶ و ۵/۳ کیلوگرم به ترتیب به طور میانگین بیش از ۹/۵٪، ۶/۶٪ و ۱۲٪ کاهش یافته است. تریم شناور برای وزن‌های مذکور در حالت بهینه قرار گیری پله‌های عرضی در مقایسه با حالت پایه افزایش یافته است و با افزایش عدد فرود طولی در تمامی وزن‌های مذکور روندی صعودی را طی می‌کند که علت آن افزایش فشار در قسمت سینه شناور است که به واسطه جابه‌جایی پله‌های عرضی به سمت سینه شناور حاصل شده است. همچنین بالآمدگی شناور در حالت بهینه نسبت به حالت پایه قرار گیری پله‌های عرضی کاهش یافته است.

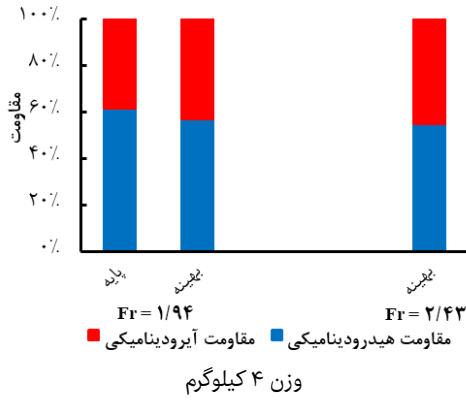
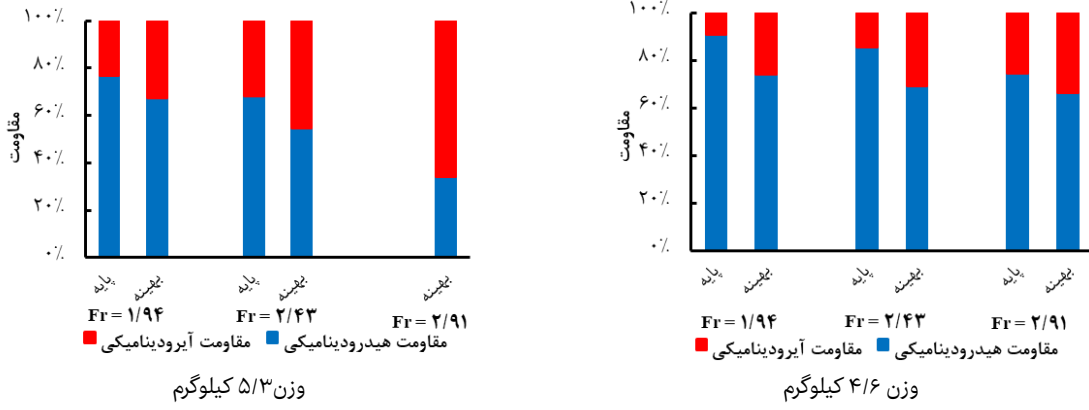
در شکل ۱۱ سهم دو سیال آب و هوا در مقاومت کل شناور در سه وزن مذکور ارائه شده است. در وزن ۵/۳ و ۴/۶ کیلوگرم سهم سیال آب در مقاومت کل شناور در حالت بهینه نسبت به حالت پایه به ترتیب ۱۸ و ۱۲ درصد کاهش یافته است که علت آن افزایش ناحیه هوادهی پله دوم و همچنین افزایش تریم شناور در حالت بهینه می‌باشد. در وزن ۴ کیلوگرم با تغییر مکان پله عرضی در فرود ۱/۹۴ سهم سیال آب در مقاومت شناور ۱۰ درصد کاهش یافته است. در نتیجه می‌توان گفت که بهینه کردن مکان پله‌های عرضی با تبدیل مقاومت آب به هوا موجب کاهش مقاومت کل شناور گردیده است.

۶-۴- نیروی برا وارد بر شناور

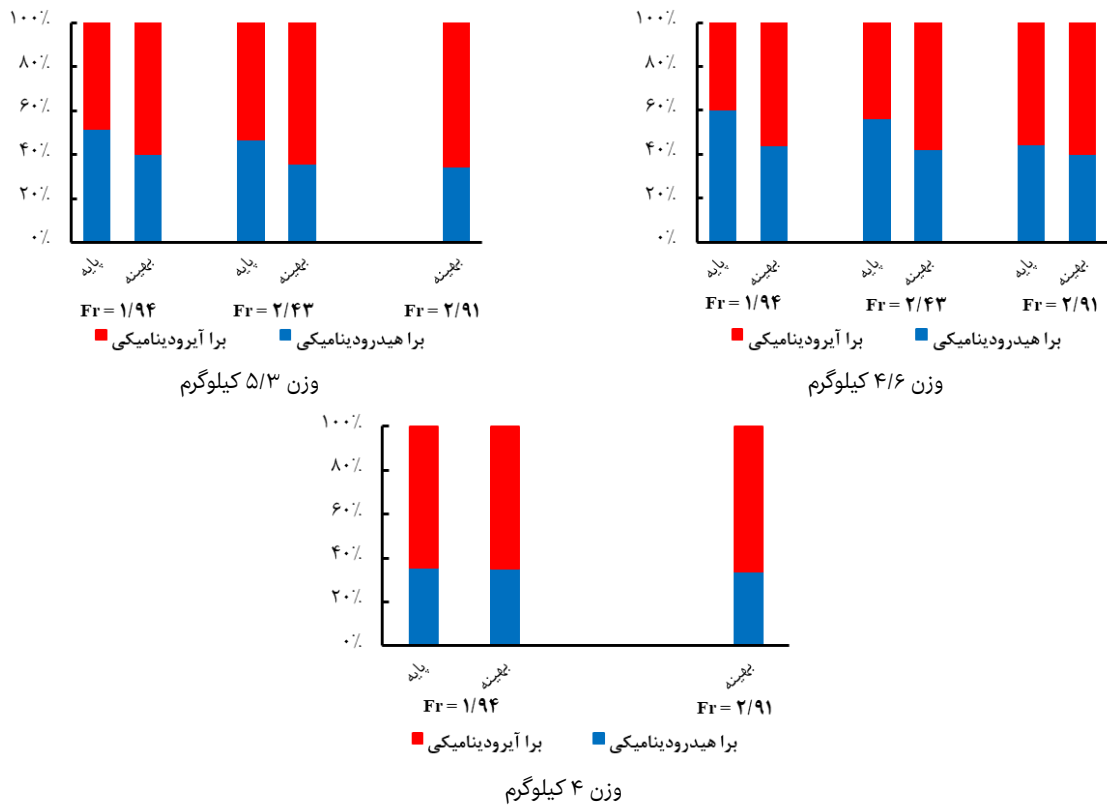
در حالت حرکتی جابه‌جایی نیروی وزن شناور توسط نیروی شناوری تحمل می‌شود اما با افزایش سرعت و قرار گرفتن شناور در حالت پروازی بخش قابل توجه‌ای از نیروی وزن شناور توسط نیروی برا دینامیکی تحمل می‌گردد. بر همین مبنا نیروی برا نقش قابل توجهی در رفتار شناور تندرو ایفا می‌کند. در شکل ۱۲ نیروی

جدول ۱۱) نتایج مقاومت، تریم و بالا روی شناور در دو حالت پله‌های عرضی پایه و بهینه

جرم (کیلوگرم)	عدد فرود طولی	مقاومت شناور (نیوتن)		تریم (درجه)		بالآمدگی / $\nabla^{1/3}$	
		شناور پایه	شناور بهینه	شناور پایه	شناور بهینه	شناور پایه	شناور بهینه
۴	۱/۹۴	۸/۹۲	۸/۳۳	۱/۷۲	۱/۷۵	۰/۱	۰/۱۱
	۲/۴۳	۸/۲۵ تا ۱۱/۳۷	۱۰/۴۹	۲ تا ۲/۶	۲/۴۹	۰/۱۴ تا ۰/۱۹	۰/۱۷
	۲/۹۱	۹/۸ تا ۱۳/۲۴	۱۱/۲۸ تا ۱۲/۷۵	۱/۱ تا ۲/۳	۲/۴۶ تا ۱/۹۴	۰/۱۶ تا ۰/۲۳	۰/۱۸ تا ۰/۲
۴/۶	۱/۹۴	۱۷/۶۵	۱۶/۲	۱/۲۴	۱/۲۸	۰/۱۴	۰/۰۸
	۲/۴۳	۱۹/۶۱	۱۷/۲۶	۱/۷۸	۲/۹۹	۰/۱۸	۰/۱۶
	۲/۹۱	۱۹/۸۱	۱۸/۴۴	۲/۰۶	۳/۰۳	۰/۲۱	۰/۱۹
۵/۳	۱/۹۴	۱۴/۲۲	۱۱/۷۷	۲/۱۶	۲/۱۸	۰/۱۶	۰/۰۹
	۲/۴۳	۱۵/۸۹	۱۲/۸۴	۲/۸۶	۳/۳	۰/۱۸	۰/۲۱
	۲/۹۱	۱۴/۷ تا ۱۶/۳	۱۴/۹	۲/۵ تا ۲/۱	۴/۲	۰/۱۳ تا ۰/۱۹	۰/۲۳



شکل (۱۱) سهم سیال آب و هوا در مقاومت کل شناور



شکل (۱۲) نیروی برا ناشی از دو سیال آب و هوا در حالت پایه و بهینه پله‌های عرضی

قسمت (پله اول تا سینه شناور، بین دو پله و پله دوم تا ترانزام) تقسیم شده است. بر این اساس سه ناحیه پرفشار در کف شناور ایجاد می‌شود (شکل ۱۴). در شکل ۱۵ به ترتیب کانتور فشار کف

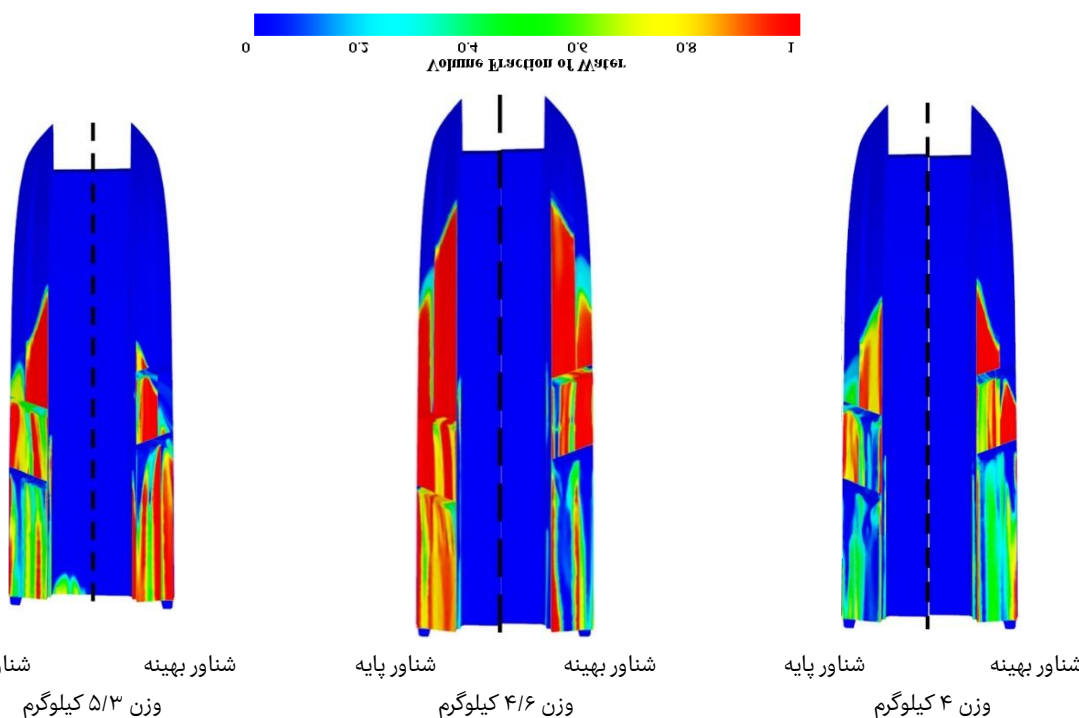
جدول ۱۲) سطح خیس شده‌ی کف شناور در دو حالت بهینه و پایه پله‌های عرضی

جرم (کیلوگرم)	عدد فرود طولی	سطح خیس (مترمربع)	
		شناور پایه	شناور بهینه
۴	۱/۹۴	۰/۰۹	۰/۰۸
	۲/۴۳	۰/۰۴ تا ۰/۰۵	۰/۰۵
	۲/۹۱	۰/۲۴۰ تا ۰/۰۴۳	۰/۰۵۲ تا ۰/۰۳
۴/۶	۱/۹۴	۰/۱۸	۰/۱۱
	۲/۴۳	۰/۱۴	۰/۰۸
	۲/۹۱	۰/۰۹	۰/۰۶
۵/۳	۱/۹۴	۰/۱۳	۰/۰۹
	۲/۴۳	۰/۰۸۲	۰/۰۵
	۲/۹۱	۰/۰۶۱ تا ۰/۰۴۸	۰/۰۶

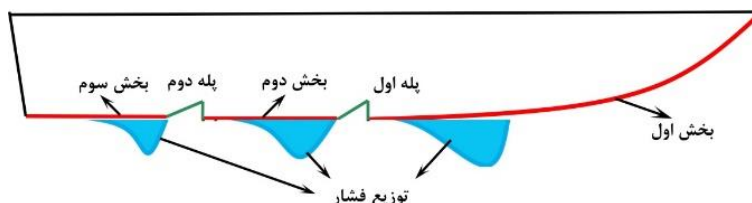
۶-۶- فشار وارد بر کف شناور

در لحظه شروع حرکت شناور نیروی برا جلوتر از مرکز ثقل قرار دارد در این حالت گشتاور حاصل از نیروی برا و وزن موجب ایجاد تریم مثبت در شناور می‌گردند. با افزایش سرعت و جدا شدن بخشی از بدنه از سطح آب، تریم شناور افزایش می‌یابد و موجب حرکت نیروی برا به سمت پاشنه می‌گردد. ادامه این روند باعث می‌شود که نیروی برا عقب‌تر از مرکز ثقل قرار گیرد در این حالت گشتاور حاصل از نیروی برا و وزن موجب ایجاد تریم منفی و فرو رفتن سینه شناور در آب می‌گردد. سپس مرکز نیروی برا به سمت سینه شناور منتقل می‌شود. تکرار متناوب این عمل موجب ایجاد ناپایداری طولی پورپویزینگ در شناور می‌گردد.

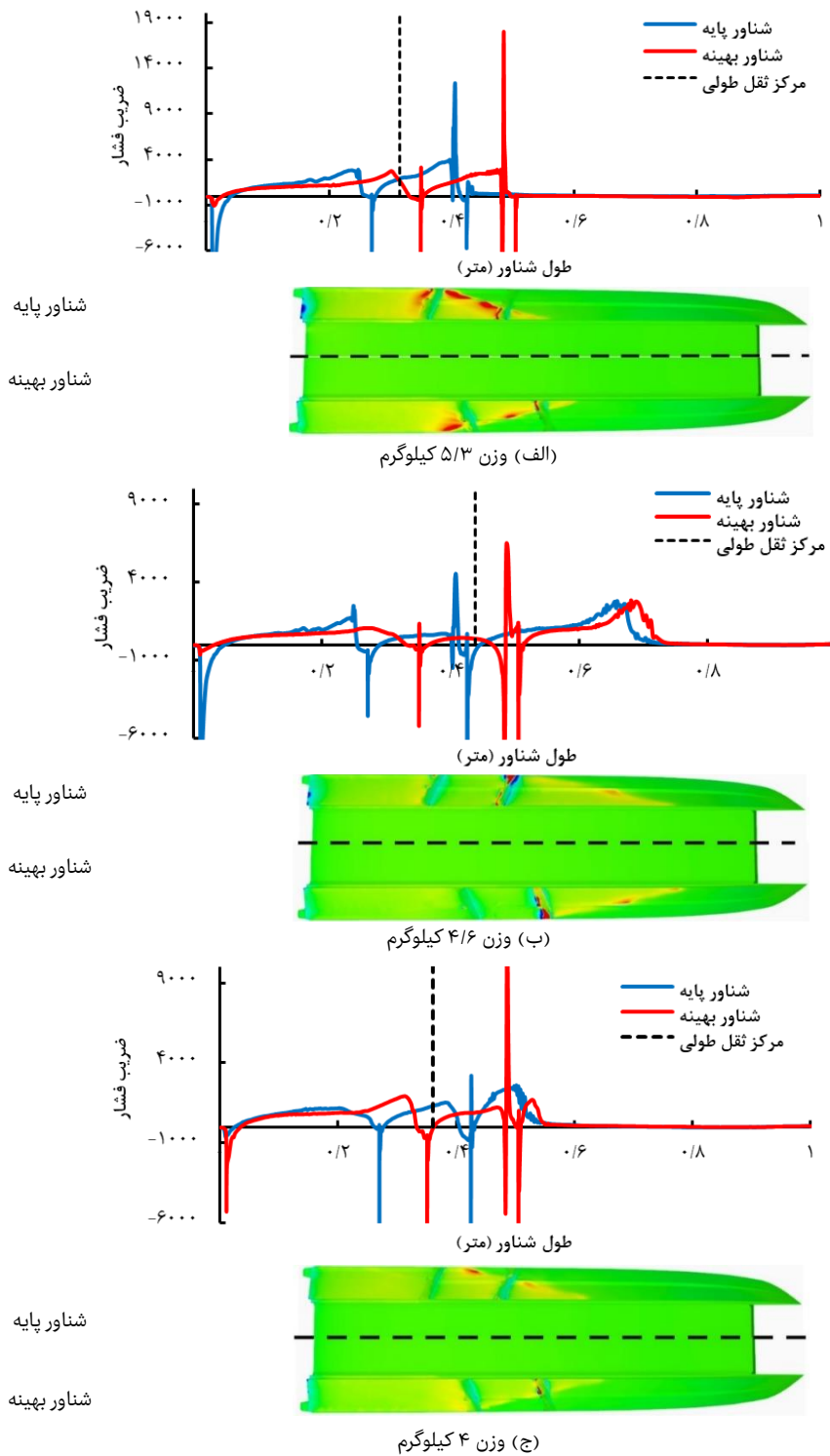
در اعداد فرود بالا بخش عمده‌ای از نیروی وزن شناور توسط نیروهای هیدرودینامیکی تحمل می‌شود. در این حالت مرکز اثر نیروی برا را می‌توان مرکز فشار در نظر گرفت. در نتیجه اگر توزیع فشار کف شناور به گونه‌ای باشد که جابه‌جایی مرکز فشار (ΣP) حول مرکز ثقل انجام نشود ناپایداری پورپویزینگ در شناور اتفاق نمی‌افتد. کف هر کدام از نیم‌بدنه‌های شناور مورد بررسی به سه



شکل ۱۳) سطح خیس شده‌ی کف شناور در عدد فرود طولی ۲/۴۳ در حالت بهینه و پایه قرارگیری پله‌های عرضی



شکل ۱۴) نمای شماتیکی از توزیع فشار در بخش‌های مختلف نیم بدنه شناور



شکل ۱۵) مقایسه کانتور فشار کف شناور در حالت پایه و بهینه در عدد فرود طولی ۲/۹۱

مرکز فشار به سمت سینه شناور حرکت کرده و از مرکز ثقل فاصله گرفته است. در این حالت به علت افزایش تریم، فشار در انتهای شناور نسبت به حالت پایه افزایش یافته است که باعث تعادل فشار وارد بر کف شناور می‌گردد و در نهایت موجب افزایش پایداری طولی شناور شده است. همچنین در وزن ۴ کیلوگرم جابه‌جایی پله‌های عرضی موجب شده تا مرکز فشار به سینه شناور

شناور و توزیع فشار در صفحه طولی برای وزن ۵/۳، ۴/۶ و ۴ کیلوگرم در حالت پایه و بهینه قرار گیری پله‌های عرضی مقایسه شده است. صفحه طولی مذکور در فاصله ۰/۱ متر از خط میانی قرار دارد. مشاهده می‌شود که در تمامی وزن‌ها در حالت بهینه، فشار ایجاد شده توسط پله‌های عرضی به سینه شناور نزدیک‌تر شده است. در وزن ۵/۳ و ۴/۶ کیلوگرم با جابه‌جایی پله‌های عرضی،

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله از برخی نتایج حاصل از رساله دکتری نویسنده مسئول استفاده شده است. هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

فهرست نشانه‌ها

طول کل شناور (متر)	LOA or L
عرض شناور (متر)	B
عرض نیم بدنه (متر)	b
فاصله پله اول از پاشنه (متر)	Ls1
فاصله پله دوم از پاشنه (متر)	Ls2
ارتفاع پله (میلی‌متر)	h
مرکز ثقل طولی از پاشنه (متر)	LCG
آبخور (میلی‌متر)	T
تربیم استاتیکی (درجه)	τ
بردار سرعت (متر بر ثانیه)	V
طول خیس شده‌ی شناور (متر)	l
ضریب ویسکوزیته سیال (مجذور متر بر ثانیه)	v
عدد رینولدز	Re
وزن شناور (کیلوگرم)	Δ
حجم زیر آب شناور (متر مکعب)	∇
چگالی سیال (کیلوگرم بر متر مکعب)	ρ
لزجت دینامیکی (پاسکال)	μ
کسر حجمی	α
یکی از ضرایب مدل SST (ثابت معادله K)	σ_k
یکی از ضرایب مدل SST (ثابت معادله ω)	$\omega\sigma$
یکی از ضرایب مدل SST	β
زیرنویس‌ها	
پله اول	S1
پله دوم	S2
طول شناور	L

منابع

- Masumi Y, Nikseresht AH. Comparison of numerical solution and semi-empirical formulas to predict the effects of important design parameters on porpoising region of a planing vessel. *Applied Ocean Research*. 2017;68:228-36.
- Savitsky D. Hydrodynamic design of planing hulls. *Marine Technology and SNAME News*. 1964;1(04):71-95.
- Katayama T, editor *Experimental techniques to assess dynamic instability of high-speed planing craft-Non-zero heel, bow-diving, porpoising and transverse porpoising*. Proceedings of 6th International Ship

نزدیک‌تر شود اما همچنان این ناحیه مرکز ثقل شناور را در بر می‌گیرد. در این حالت دامنه نوسان تربیم و بالآمدگی شناور نسبت به حالت پایه کمتر شده و از میزان ناپایداری شناور کاسته شده است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار یک شناور دو بدنه پروازی در آب آرام با استفاده از روش آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت. این شناور دارای دو نیم بدنه پروازی مجهز به پله عرضی و بدنه میانی با مقطع فویل می‌باشد. در گام اول مقاومت شناور با وزن ۵/۳ کیلوگرم با استفاده از روش آزمایشگاهی محاسبه گردیده است. در مطالعات عددی، ابتدا نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با نتایج تجربی اعتبارسنجی شدند و سپس برای ارزیابی دقیق‌تر، عملکرد شناور در وزن‌های ۵/۳، ۴/۶ و ۴ کیلوگرم از عدد فرود طولی ۰/۴۹ تا ۲/۹ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. شناور در وزن‌های ۵/۳ و ۴ کیلوگرم به ترتیب در عدد فرود طولی ۲/۴۳ و ۲/۹ دچار ناپایداری طولی پورپوئینگ شده است. بر مبنای نتایج حاصل، طرح آزمایش تاگوچی به منظور تعیین مکان بهینه پله‌های عرضی به کار گرفته شده است. هدف از این طراحی آزمایش جلوگیری از ناپایداری

پورپوئینگ و کاهش مقاومت شناور می‌باشد. پس از تعیین مکان بهینه پله‌های عرضی، رفتار شناور در حالت پایه و بهینه قرارگیری پله‌های عرضی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحلیل‌ها در ادامه آورده شده است:

در حالت کلی با افزایش فاصله پله‌های عرضی از ترانزام مقاومت شناور کاهش یافته است. به طوری که در حالت پروازی مقاومت شناور در مکان بهینه پله‌های عرضی نسبت به حالت پایه برای وزن‌های ۴، ۴/۶ و ۵/۳ کیلوگرم به ترتیب حدود ۶/۶، ۹/۵ و ۱۲ درصد کاهش یافته است.

افزایش فاصله پله‌های عرضی از ترانزام موجب افزایش تربیم و هوادهی در پشت پله عرضی دوم شناور شده است. مجموع این عوامل موجب کاهش سطح خیس شناور در حالت حرکتی پروازی گردیده است.

افزایش تربیم و بالآمدگی و کاهش سطح خیس شناور در حالت بهینه پله‌های عرضی موجب افزایش نیروی برا آیرودینامیکی گردیده است.

افزایش فاصله پله‌های عرضی از ترانزام موجب شده افزایش فاصله مرکز فشار با مرکز ثقل شناور شده است. همچنین به علت افزایش تربیم، فشار در انتهای شناور نیز نسبت به حالت پایه افزایش یافته است. مجموع این عوامل موجب تعادل فشار وارد بر کف شناور شده است که افزایش پایداری طولی شناور را در پی داشته است.

- 19- ITTC., Recommended Procedures. General Guideline for Uncertainty Analysis in Resistance Tests. 7.5-02-02- 02. 2017.
- 20- ITTC., Recommended Procedures. General Guideline for Uncertainty Analysis in Resistance Tests. 75-02-02-022011.
- 21- Bi X, Zhuang J, Su Y. Seakeeping Analysis of Planing Craft under Large Wave Height. *Water*. 2020;12(4):1020.
- 22- ITTC. Recommended procedures and guidelines. 75-03-02-03 2014b.
- 23- ITTC. Practical guidelines for ship CFD applications. (75-03-02-03) Revision-01. 2011.
- 24- Suneela J, Krishnankutty P, Subramanian VA. Hydrodynamic performance of planing craft with interceptor-flap hybrid combination. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*. 2021;7(4):421-38.
- 25- Carrica PM, Wilson RV, Noack RW, Stern F. Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids. *Computers & fluids*. 2007;36(9):1415-33.
- 26- Begovic E, Bertorello C, Mancini S. Hydrodynamic performances of small size swath craft. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*. 2015; 66(4):1-22.
- 27- ITTC. Practical guidelines for ship CFD applications (75-03-02-03) p 1-20Revision-01. 2014.
- 28- Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method. *Computers & Operations Research*. 1995;22(7):763-70.
- Stability Workshop, Jersey City, NJ: The Society of Naval Architects and Marine Engineers; 2002: Citeseer.
- 4- Martin M. Theoretical determination of porpoising instability of high-speed planing boats. *Journal of ship research*. 1978;22(01):32-53.
- 5- Sun H, Faltinsen OM. Predictions of porpoising inception for planing vessels. *Journal of marine science and technology*. 2011;16(3):270-82.
- 6- John R. Dawson RM, and Elizabeth S. Hay. Effect of varying depth of step, angle of after body kell, length of after body chine, and Gross load. *Lagley Memorial Aeronautical Laboratory Langley Field, VA*; July 1946.
- 7- Blount DL, Codega LT. Dynamic stability of planing boats. *Marine Technology and SNAME news*. 1992; 29(01):4-12.
- 8- Veysi STG, Bakhtiari M, Ghassemi H, Ghiasi M. Toward numerical modeling of the stepped and non-stepped planing hull. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2015;37(6):1635-45.
- 9- Nourghasemi H, Bakhtiari M, Ghassemi H. Numerical study of step forward swept angle effects on the hydrodynamic performance of a planing hull. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*. 2017.
- 10- Cucinotta F, Guglielmino E, Sfravara F. A critical CAE analysis of the bottom shape of a multi stepped air cavity planing hull. *Applied Ocean Research*. 2019; 82:130-42.
- 11- Di Caterino F, Niazmand Bilandi R, Mancini S, Dashtimanesh A, De Carlini M. A numerical way for a stepped planing hull design and optimization. *Technology and Science for the Ships of the Future: IOS Press*; 2018. p. 220-9.
- 12- Najafi A, Nowruzi H, Karami M, Javanmardi H. Experimental investigation of the wetted surfaces of stepped planing hulls. *Ocean Engineering*. 2019;187:106164.
- 13- Ghadimi P, Panahi S, Tavakoli S. Hydrodynamic study of a double-stepped planing craft through numerical simulations. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2019;41(1):1-15.
- 14- Sajedi SM, Ghadimi P. Experimental investigation of the effect of two steps on the performance and longitudinal stability of a mono-hull high-speed craft. *Cogent Engineering*. 2020;7(1):1790980.
- 15- Sajedi SM, Ghadimi P. Experimental and numerical investigation of stepped planing hulls in finding an optimized step location and analysis of its porpoising phenomenon. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020.
- 16- <https://itcc.info/members/member-organisations/national-iranian-marine-laboratory-nimala>.
- 17- Propulsion Committee. Final report and recommendations to the 23rd, ITTC, Proceeding of Twenty-third ITTC, (2002).
- 18- ITTC., Recommended Procedures. General Guideline for Uncertainty Analysis in Resistance Tests. 7.5-02-02- 02. 75-02-02-022014.