

مطالعه عددی تأثیر پله‌های عرضی هفتی و هشتی شکل بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور تندرو پروازی در آب آرام

دلارام پاکنیات جهرمی^۱، سعید جامعی^{۲*}

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی دریا، گرایش هیدرودینامیک، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

۲ استادیار گروه مهندسی دریا، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

چکیده:

بهبود عملکرد دینامیکی شناورهای تندرو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ یکی از مؤثرترین روش‌ها در افزایش سرعت و بهبود پایداری در شناورهای تندرو استفاده از پله عرضی است. بر همین مبنا در پژوهش حاضر نحوه اثرگذاری پله عرضی با و بدون زاویه در آب آرام مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا با استفاده از روش عددی تأثیر ایجاد زاویه در دو حالت پله عرضی زاویه‌دار هفتی و هشتی شکل در سه زاویه ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه بر رفتار دینامیکی شناور ارزیابی گردیده است؛ این محاسبات در اعداد فرود طولی ۱/۴، ۱/۶۲ و ۲ (که شناور در حالت پروازی قرار دارد) صورت گرفته است و با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه و اعتبارسنجی شده است. در مدل‌سازی عددی جریان دوفازی از مدل VOF و برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل SST k- ω استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پله عرضی هفتی شکل در مقایسه با پله‌های عرضی بدون زاویه و هشتی شکل عملکرد بهتری در کاهش میزان مقاومت و تریم شناور داشته است به طوری که شناور مجهز به پله عرضی هفتی شکل در زاویه ۴۰ درجه نسبت به شناور مجهز به پله عرضی بدون زاویه، به طور میانگین مقاومت و تریم شناور را به ترتیب ۲٪ و ۴/۸۷٪ کاهش داده است. همچنین پله عرضی هفتی شکل نسبت به دو حالت پله عرضی دیگر موجب کاهش تریم و بهبود پایداری طولی شناور گردیده است.

واژه‌های کلیدی:

شناور تندرو، پله عرضی زاویه‌دار، پایداری طولی، مؤلفه‌های هیدرودینامیکی، روش آزمایشگاهی و عددی

Numerical study of the effect of aft-wise and fore-wise transverse steps on the hydrodynamic performance of a high speed planing vessel in calm water

Delaram Pakniyat jahromi¹, Saeed Jamei²

1,2 Department of Marine Engineering, Faculty of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

Abstract:

Improving the dynamic performance of high-speed vessels is of particular importance. One of the most effective ways to increase speed and improve stability in high-speed vessels is the use of a transverse step. Based on this, in the present research, the manner of the effect of the transverse step with and without angles in calm water has been investigated. In this regard, using a numerical method, the effect of creating an angle in two angular transverse steps of seven and eight shapes at three angles of 20, 40, and 60 on the dynamic behavior of the high-speed vessel has been evaluated. These calculations have been made for longitudinal Froude numbers of 1.4, 1.62, and 2 when the vessel is in planning mode and have been compared and validated with existing experimental results. VOF model is used for numerical modeling of two-phase flow and SST k- ω model is used for turbulence modeling. The results show that the use of an aft-wise transverse step compared to non-angled and fore-wise transverse steps has a better performance in reducing the resistance and trim of the vessel so that the vessel equipped with the aft-wise transverse step at an angle of 40 degrees compared to the vessel equipped with transverse step without angle has reduced the vessel of the resistance and trim by 2% and 4.87%, respectively. Also, the aft-wise transverse step reduced the trim and improved the longitudinal stability of the vessel as compared with other models.

key words:

high speed vessel, Angular transverse step, Longitudinal stability, Hydrodynamic components, Experimental and numerical method.

امروزه با توجه به نیاز بشر به داشتن شناورهایی با سرعت بالاتر، شناورهای تندرو مختلفی برای اهداف نظامی، تفریحی و مسافری طراحی و ساخته شده‌است. شناورهای تندرو برای حرکت در سرعت‌های بالا طراحی می‌شوند از این رو بهینه‌سازی این شناورها در راستای بهبود عملکرد هیدرودینامیکی و پایداری از اهمیت بالایی در طراحی آن‌ها برخوردار می‌باشد [۱]. برای نیل به اهداف مذکور در طراحی شناور تندرو از دو راهبرد کلی تغییر فرم بدنه شناور و اضافه نمودن زائده‌های مختلف به بدنه شناور استفاده می‌گردد. یکی از روش‌های موثر در بهبود مولفه‌های هیدرودینامیکی و پایداری، ایجاد پله عرضی در کف شناور است [۲]. در زمینه تاثیر مشخصه‌های هندسی پله عرضی شامل ارتفاع، موقعیت طولی، شکل و تعداد پله‌ها بر بهبود مولفه‌های هیدرودینامیکی و پایداری شناور پژوهش‌های مختلفی صورت گرفته‌است. یکی از اولین تحقیقات در زمینه تاثیر پله عرضی بر عملکرد شناور توسط دوسون و همکاران [۳] در ۱۹۶۴ صورت گرفته‌است. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که استفاده از پله عرضی موجب کاهش مقاومت شناور در حالت پروازی شده‌است.

جدول ۱- حروف و علائم اختصاری

علائم	توضیحات
LOA	طول کل
B	عرض
T_{AP}	آبخور در پاشنه
β	زاویه خیز کف
Δ	جابه‌جایی
LCG	موقعیت مرکز ثقل طولی از سینه
VCG	موقعیت مرکز ثقل عمودی از کیل
L_K	فاصله پله عرضی تا پاشنه شناور در کیل
L_C	فاصله پله عرضی تا پاشنه شناور در چابین
∇	حجم زیر آب شناور
ρ	چگالی سیال
μ	لزجت سیال
α	کسر حجمی
σ_K	یکی از ضرایب مدل SST (ثابت معادله K)
σ_ω	یکی از ضرایب مدل SST (ثابت معادله ω)
β	یکی از ضرایب مدل SST
Fr_L	عدد فرود طولی
g	شتاب گرانش

ساویستکی و مورابیتو [۴] در ۲۰۰۹ کانتورهای ویک در بدنه جلویی شناور تندرو پله‌دار را به صورت نمودارهایی بی‌بعد ارائه نمودند. تانتون و همکاران [۵ و ۶] با استفاده از روش آزمایشگاهی اثر افزودن پله عرضی را بر میزان مولفه‌های هیدرودینامیکی چهار شناور تندرو با نسبت طول به عرض‌های مختلف در آب آرام و موج بررسی کردند. ویلیام گارلند و کیوین [۷] در ۲۰۱۲ با استفاده از روش عددی در یک شبیه‌سازی دو بعدی، ارتفاع بهینه پله عرضی را در شناور پروازی بر مبنای بیشترین مقدار نیروی برا تعیین نمودند و تاثیر تغییر ارتفاع پله را بر میزان کاهش تریم و افزایش هوادهی بررسی کردند. ویسی و همکاران [۸] 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 در حالت حرکتی پروازی و همچنین بهبود زاویه تریم شناور می‌گردد. نورقاسمی و همکاران [۹] با استفاده از روش عددی اثر تغییر زاویه پله عرضی به سمت سینه شناور (هفتی‌شکل) را بر مولفه‌های هیدرودینامیکی یک شناور تندرو بررسی کردند. نتایج نشان داد که با تغییر زاویه پله به سمت سینه شناور، تریم و بالآمدگی افزایش و مقدار مقاومت کاهش یافته‌است. کاظمی و همکاران [۱۰] در ۲۰۱۹ رفتار هیدرودینامیکی شناور تندرو را با و بدون پله عرضی در شرایط بارگذاری مختلف مورد بررسی قرار دادند و بر مبنای نتایج حاصل رابطه‌ای برای تخمین پروفیل ویک ایجاد شده در پشت شناور ارائه نمودند. آن‌ها در ادامه تحقیقاتشان [۱۱] با بکارگیری روش عددی و شبکه عصبی مصنوعی رابطه‌ای به منظور تعیین نسبت مقاومت به وزن شناور پله‌دار تعیین کردند. کاسینوتا و همکاران [۱۲] در ۲۰۱۹ اثر ایجاد هوادهی مصنوعی در محل پله عرضی را در کاهش میزان مقاومت اصطکاکی شناور بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که ایجاد هوادهی مصنوعی می‌تواند موجب کاهش قابل توجه مقاومت اصطکاکی در شناور گردد. در ادامه بررسی اثر پله عرضی بر رفتار شناور نجفی و همکاران [۱۳] در یک مطالعه آزمایشگاهی مولفه‌های مختلف هیدرودینامیکی را برای شناور تندرو پله‌دار محاسبه نمودند. سپس بر مبنای نتایج حاصل روابطی برای محاسبه الگوی سطح خیس کف شناور پله‌دار ارائه کردند. قدیمی و همکاران [۱۴] 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 کاهش و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. نجفی و نوروزی [۱۵] در ۲۰۱۹ تاثیر شکل‌های مختلف پله عرضی را در رفتار شناور تندرو مورد بررسی قرار دادند و میزان تغییر مولفه‌های هیدرودینامیکی را در حالت‌های مختلف تعیین کردند. ساجدی و قدیمی [۱۶] 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. نتایج نشان داد که استفاده از پله عرضی در ارتفاع و مکان بهینه موجب بهبود مولفه‌های هیدرودینامیکی و پایداری طولی شناور می‌گردد. آن‌ها در ادامه تحقیقاتشان [۱۷] با استفاده از روش آزمایشگاهی تاثیر تغییر زاویه پله عرضی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ایجاد زاویه در پله به سمت سینه موجب کاهش بیشتر مقاومت نسبت به پله‌های بدون زاویه گردیده‌است. ویتلو و همکاران [۱۸] در ۲۰۲۲ تاثیر مولفه‌های هندسی مختلف شامل ارتفاع، مکان و تعداد پله‌های عرضی را بر مولفه‌های هیدرودینامیکی یک سری شناور با نسبت طول به عرض‌های مختلف با بکارگیری روش آزمایشگاهی بررسی نمودند. در جدول ۲ مشخصات هندسی پله عرضی (ارتفاع، موقعیت طولی، شکل و تعداد پله‌های عرضی) که در پژوهش‌های مذکور بررسی شده تعیین گردیده‌است. مشاهده می‌شود که در اکثر پژوهش‌ها مشخصه‌های هندسی ارتفاع و مکان پله عرضی در کف شناور مورد بررسی قرار گرفته‌است و کمتر به تاثیر شکل قرار گیری پله عرضی در کف شناور (پله‌های هفتی و هشتی شکل) بر مولفه‌های هیدرودینامیکی و پایداری طولی با استفاده از روش عددی پرداخته شده‌است. بر این اساس در پژوهش حاضر تاثیر ایجاد زاویه در پله عرضی بر رفتار دینامیکی شناور با استفاده از روش عددی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته‌است. در این راستا در گام اول مولفه‌های هیدرودینامیکی یک شناور پروازی با و بدون پله عرضی با استفاده از روش عددی محاسبه شده‌است و با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه و اعتبار سنجی گردیده‌است. سپس با بکارگیری روش عددی تاثیر تغییر

۲- تعریف مسئله

کاهش مقاومت و بهبود پایداری طولی همواره از چالش‌های اصلی در طراحی شناورهای تندرو به حساب می‌آیند. یکی

زاویه پله به سمت سینه و پاشنه شناور بر مولفه‌های هیدرودینامیکی و پایداری طولی شناور مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

جدول ۲- مشخصات هندسی بررسی شده مربوط به پله عرضی در پژوهش‌های مورد مطالعه

محققین	روش مطالعه	مشخصات هندسی پله عرضی		
		ارتفاع	موقعیت طولی	نوع پله
تعداد				
داوسون و همکاران [۳]	آزمایشگاهی			
تانتون و همکاران [۵][۶]	آزمایشگاهی			
ویلیام گارلند و کیوین [۷]	عددی			
نور قاسمی و همکاران [۹]	عددی			
کاظمی و همکاران [۱۱]	عددی			
نجفی و همکاران [۱۳]	آزمایشگاهی			
ساجدی و قدیمی [۱۶]	آزمایشگاهی			
ساجدی و قدیمی [۱۷]	آزمایشگاهی			
ویتلو و همکاران [۱۸]	آزمایشگاهی			

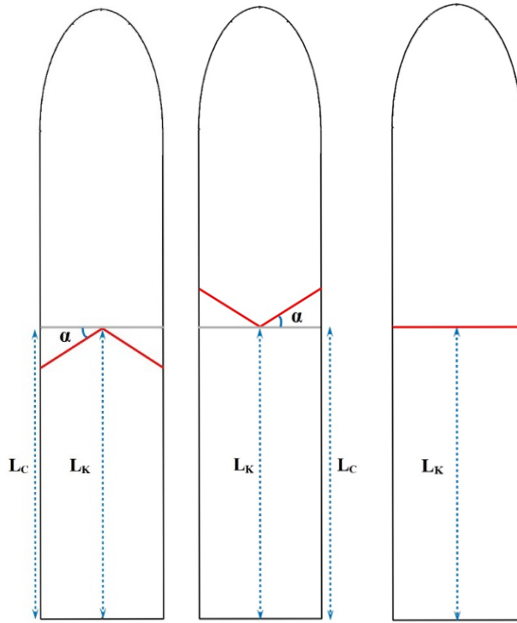
از موثرترین و رایج‌ترین روش‌ها در طراحی شناورهای تندرو به منظور دست‌یابی به اهداف مذکور تغییر فرم بدنه با اضافه نمودن پله عرضی به کف شناور می‌باشد. در این پژوهش شناور تندرو فریزما [۱۹] با زاویه خیز کف ۲۰

درجه به عنوان شناور پایه به منظور بررسی تاثیر زاویه پله عرضی بر میزان بر رفتار دینامیکی شناور انتخاب گردیده است. مشخصات شناور مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۳ ذکر گردیده است.

شناور تندرو مذکور با و بدون پله عرضی از نقطه نظر هیدرودینامیکی و پایداری بررسی و تحلیل گردیده است. که پله عرضی در کف شناور برای سه حالت پله عرضی بدون زاویه و پله عرضی با زاویه به سمت سینه (هشتی شکل) و به سمت پاشنه (هفتی شکل) در نظر گرفته شده است (شکل ۱). پله های عرضی زاویه دار هر کدام در سه زاویه ۲۰، ۴۰ و ۶۰ مورد بررسی قرار گرفته اند. همچنین بر مبنای نتایج کسب شده در پژوهش نجفی و همکاران [۱۳] و همچنین عامری و همکاران [۲۰] ارتفاع و مکان پله در طول شناور به ترتیب برابر ۰/۲ و ۱/۱ متر تعیین گردیده اند که در آن شناور مورد مطالعه از لحاظ مقاومت و پایداری طولی عملکرد قابل قبولی داشته است. مشخصات مربوط به پله های عرضی در نظر گرفته شده برای شناور شامل زاویه پله و فاصله پله از پاشنه در جدول ۴ ذکر گردیده است. در این تحقیق در ابتدا با استفاده از روش عددی مولفه های هیدرودینامیکی مقاومت و تریب شناور با و بدون پله عرضی سه عدد فرود طولی ($Fr_L = \frac{V}{\sqrt{L \times g}}$) ۱/۴، ۱/۶۲ و ۲ محاسبه شده است و با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط نجفی و همکاران [۱۳] مقایسه و اعتبار سنجی گردیده است. سپس با استفاده از روش عددی تاثیر ایجاد زاویه در پله عرضی مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۳- مشخصات پله های عرضی در نظر گرفته شده برای شناور

مقدار	نماد	مشخصه
۲/۵	LOA	طول کل (متر)
۰/۵	B	عرض (متر)
۰/۹	TAP	آبخور در پاشنه (متر)
۲۰	β	زاویه خیز کف (درجه)
۴۸/۸۳	Δ	جابه جایی (کیلوگرم)
۰/۹	LCG	موقعیت مرکز ثقل طولی از سینه (متر)
۰/۱۸	VCG	موقعیت مرکز ثقل عمودی از کیل (متر)
۰/۲	-	ارتفاع پله (متر)
۱/۱	L _K & L _C	موقعیت طولی پله از پاشنه (متر)
پله عرضی بدون زاویه	-	نوع پله



الف: پله عرضی بدون زاویه
ب: پله عرضی با زاویه به سمت سینه (هفتی شکل)
ج: پله عرضی با زاویه به سمت پاشنه (هشتی شکل)

شکل ۱- حالت های مختلف قرار گیری پله عرضی در کف شناور

جدول ۴- مشخصات پله های عرضی در نظر گرفته شده برای شناور

ارتفاع پله عرضی (متر)	مشخصات پله عرضی			شناور مجهز به پله عرضی
	فاصله پله عرضی تا پاشنه شناور در چابن (L _C) (متر)	فاصله پله عرضی تا پاشنه شناور در کیل (L _K) (متر)	زاویه پله عرضی تا پاشنه شناور در افق (α)	
۰/۲ متر	۱/۱	۱/۱	صفر	پله عرضی بدون زاویه
۰/۲ متر	۱/۱	۱/۱۹	۲۰ درجه	پله عرضی هفتی شکل
			۴۰ درجه	
			۶۰ درجه	
۰/۲ متر	۱/۱	۱/۱	۲۰ درجه	پله عرضی هشتی شکل
			۴۰ درجه	
			۶۰ درجه	

۳- مطالعه عددی

در این پژوهش مطالعه عددی به منظور بررسی میزان و نحوه اثرگذاری پله‌های هفتی و هشتی شکل بر رفتار دینامیکی و پایداری طولی شناور انجام شده است که در این راستا از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی STAR-CCM+ استفاده گردیده است. در ادامه مراحل مربوط به مطالعه عددی به طور کامل تشریح گردیده است.

۳-۱- معادلات حاکم

در شبیه‌سازی عددی رفتار شناور، جریان به صورت کاملاً آشفته در دو فاز آب و هوا در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نیوتونی و تراکم ناپذیر در نظر گرفتن دو سیال آب و هوا معادلات پیوستگی و مومنتوم حاکم بر جریان سیال اطراف شناور مطابق روابط (۱) و (۲) بیان می‌شوند.

در رابطه (۲)، v بردار سرعت، ρ چگالی و μ لزجت دینامیکی می‌باشد. برای مدل‌سازی جریان آشفته از مدل آشفتگی SST k- ω استفاده شده است. نخستین با توسط منتر [۲۱] به منظور استفاده همزمان از توانایی‌های مدل آشفتگی k- ϵ و k- ω بکار گرفته شده است. این مدل در نواحی با عدد رینولدز پایین (نواحی نزدیک به دیواره) از مدل آشفتگی k- ω استفاده می‌نماید و در نواحی با عدد رینولدز بالا (نواحی دور از دیواره) از مدل k- ϵ استفاده می‌کند. به همین دلیل این مدل یکی از متداول‌ترین و دقیق‌ترین مدل‌های آشفتگی در شبیه‌سازی هیدرودینامیکی شناورهای تندرو به حساب می‌آید [۲۲]. معادلات مربوط به مدل آشفتگی SST k- ω مطابق معادلات (۳) تا (۵) می‌باشد [۲۳].

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot (v v) \right) = \nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla v + (\nabla v)^T)] - gK \nabla \cdot v = 0 \quad (2)$$

$$v_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)} \quad (3)$$

$$\frac{D\rho k}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \mu_t \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k \quad (4)$$

$$\frac{D\rho \omega}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \mu_t \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\gamma}{v_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (6)$$

$$\arg_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y'} ; \frac{500 v}{y^2 \omega} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (V \alpha) = 0 \quad (8)$$

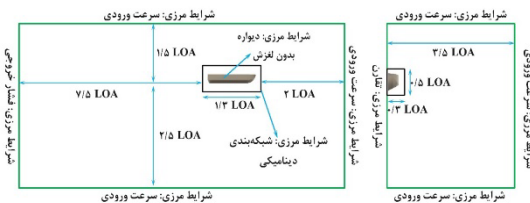
$$\Delta t = 0.01 \sim 0.005 \frac{1}{V} \quad (9)$$

$$Y^+ = \frac{y}{v} \sqrt{\frac{1}{2} V^2 \frac{0.074}{Re_L^{1/5}}} \quad (10)$$

در رابطه (۳)، Ω بیانگر سرعت مطلق جریان سیال است. در رابطه (۷)، y نشان دهنده فاصله از دیواره می‌باشد. همچنین در معادلات ذکر شده ضرایب ثابت σ_ω ، σ_k و β نتیجه‌ی ترکیب ضرایب ثابت دو مدل آشفتگی k- ϵ و k- ω هستند. به منظور توصیف مرز مشترک بین دو فاز سیال از روش کسیر حجمی سیال استفاده شده است که رابطه آن مطابق معادله (۸) است. در رابطه (۸)، α بیانگر مقدار کسر حجمی است که برای دو سیال آب و هوا به ترتیب برابر صفر و یک در نظر گرفته شده است.

۳-۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

ابعاد فضای محاسباتی در پژوهش حاضر مطابق با معیارهای ارائه شده توسط ITTC و در نظر گرفتن حداقل‌های توصیه شده در نرم افزار STAR-CCM+ تعیین شده است [۲۴] [۲۵]. بر این اساس فاصله مرز ورودی تا سینه شناور، ۲ برابر طول شناور تعیین گردیده است و فاصله مرز خروجی جریان تا پاشنه شناور به منظور جلوگیری از جریان بازگشتی و تعیین مشخصات ویک شناور ۷/۵ برابر طول شناور در نظر گرفته شده است. فاصله مرز کناری فضای محاسباتی تا بدنه شناور حدود ۳/۵ برابر طول شناور تعیین شده است. همچنین به دلیل تقارن فرم بدنه شناور و جریان سیال، شبیه‌سازی به صورت متقارن انجام شده است. سایر ابعاد و شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای فضای محاسباتی در شکل ۲ ارائه نشان داده شده است.



شکل ۲- ابعاد و شرایط مرزهای فضای محاسباتی

در این شبیه‌سازی گام زمانی مطابق با رابطه تعیین شده است [۲۶] که در آن V و l به ترتیب بیانگر سرعت و طول خیس شده‌ی شناور می‌باشند. شبیه‌سازی‌های انجام شده در پژوهش حاضر به صورت ناپایا در حالت سه بعدی

انجام شده است و عدم وابستگی نتایج حاصل از شبیه‌سازی به زمان با توجه به تغییر مولفه‌های هیدرودینامیکی در روند حل مشخص گردیده است [۲۷]. همچنین تنظیمات در نظر گرفته شده در فرایند شبیه‌سازی عددی رفتار شناور در جدول ۵ ارائه شده است.

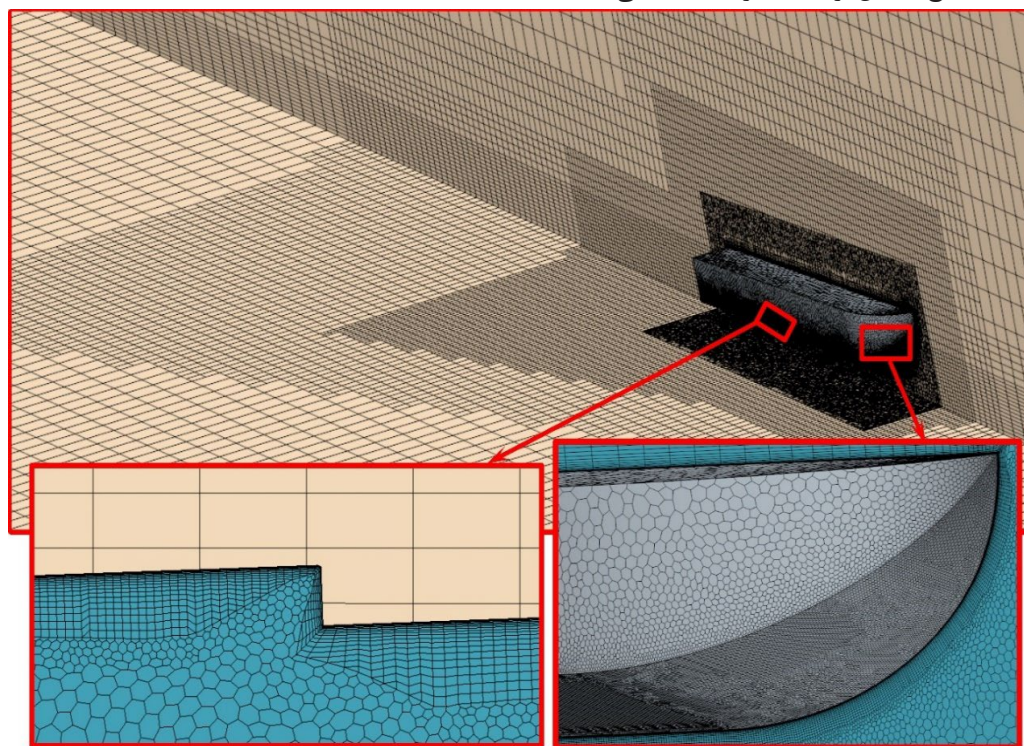
جدول ۵- تنظیمات حلگر در شبیه‌سازی عددی

مشخصات	تنظیمات تعیین شده
نوع حلگر	ناپایا
روش دوفازی	حجم سیال
روش کوپل سرعت و فشار	الگوریتم SIMPLE
روش گسسته‌سازی زمان	بالادست مرتبه اول
تعداد تکرار حل در هر گام زمانی	۵
روش درون‌یابی در ناحیه Overset	خطی (Linear)

۳-۲- شبکه‌بندی فضای محاسباتی

نوع و کیفیت شبکه‌بندی فضای محاسباتی مهم‌ترین عامل در میزان دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی می‌باشد.

بر این اساس در شبیه‌سازی عددی حاضر بر اساس نتایج حاصل از پژوهش کاریکا و همکاران [۲۸] و ماکرو و همکاران [۲۹] در راستای محاسبه دقیق حرکات شناور از شبکه‌بندی دینامیکی استفاده شده است. بر این اساس شبکه‌بندی فضای محاسباتی در دو بخش Overset و Background صورت گرفته است که به‌منظور کاهش تعداد شبکه‌بندی و همچنین کاهش زمان محاسبات، ناحیه Overset با شبکه بندی شش ضلعی بی‌سازمان و ناحیه Background با استفاده از شبکه‌بندی Trimmed با سازمان شبکه‌بندی شده است [۳۰] [۳۱]. فضای محاسباتی با توجه به الگوی رفتار شناور تندرو به بخش‌های مختلف تقسیم‌بندی شده است که هر کدام با توجه به میزان اثرگذاری بر دقت نتایج شبکه‌بندی گردیده است. در شکل ۳ شبکه‌بندی بخش‌های مختلف فضای محاسباتی نشان داده شده است.



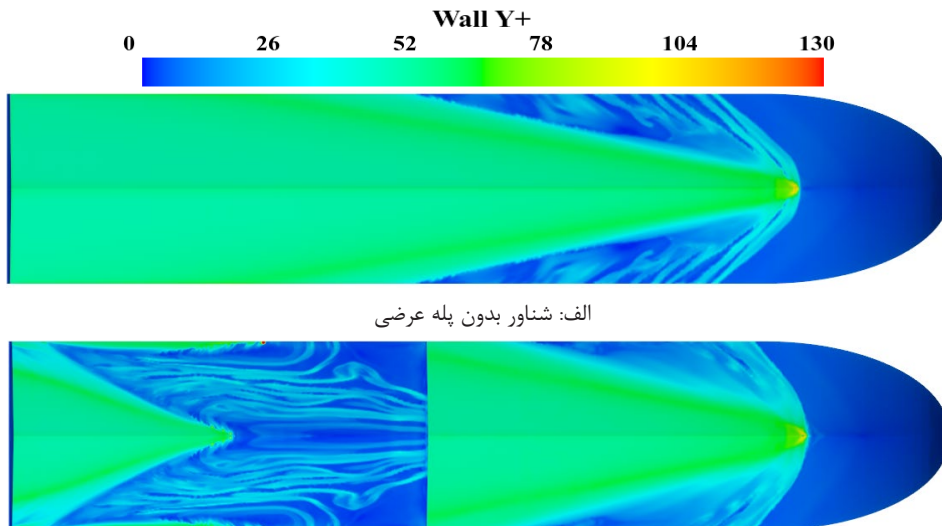
ب: شبکه‌بندی لایه‌ای منشوری در محل پله عرضی

الف: شبکه‌بندی شش ضلعی بر روی بدنه شناور

شکل ۳- شبکه‌بندی فضای محاسباتی

پارامترهای y, V, v و Re در رابطه (۱۰) به ترتیب بیانگر فاصله‌ی دیواره از شبکه‌بندی لایه مرزی، سرعت شناور، ضریب ویسکوزیته سیال و عدد رینولدز می‌باشد [۲۳]. در شکل ۴ کانتور تغییرات Y^+ کف شناور با و بدون پله عرضی در عدد فرود طولی ۲ نشان داده شده است.

در این شبیه‌سازی به‌منظور محاسبه دقیق میزان تنش و فشار جریان سیال، در اطراف شناور از شبکه‌بندی لایه‌ای منشوری استفاده شده است که مقدار مولفه‌های وابسته به مقدار بی‌بعد Y^+ تعیین می‌گردد [۱] که مقدار آن مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.



الف: شناور بدون پله عرضی

ب: شناور مجهز به پله عرضی بدون زاویه

شکل ۴- مقادیر Y^+ در نقاط مختلف کف شناور در عدد فرود طولی ۲

۴-۳- مطالعه شبکه‌بندی

با توجه به اهمیت شبکه‌بندی بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در این پژوهش به منظور اطمینان از عدم وابستگی نتایج به تعداد شبکه، چهار حالت شبکه‌بندی مختلف از نقطه نظر تعداد شبکه در نظر گرفته شده‌است و میزان مؤلفه‌های مقاومت، تریوم و سطح خیس کف شناور برای چهار حالت مذکور محاسبه شده‌است. بررسی عدم وابستگی نتایج در حالت‌های ذکر شده برای شناور با و بدون پله عرضی در عدد فرود طولی ۲ ارزیابی گردیده‌است. نتایج مقدار مقاومت، تریوم و سطح خیس کف شناور مربوط به حالت‌های مختلف شبکه‌بندی در جدول ۶ نشان داده شده‌است.

نتایج مؤلفه‌های هیدرودینامیکی در تعداد شبکه‌بندی مختلف نشان می‌دهد که از حالت سوم به بعد ($10^3 \times 1940$)

تعداد شبکه (تعداد شبکه تاثیر قابل توجهی بر رفتار شناور ندارد و حل از تعداد شبکه مستقل گردیده‌است. در شبیه‌سازی حاضر با توجه به نتایج مذکور حالت سوم به عنوان شبکه‌بندی پایه در نظر گرفته شده‌است. پس از استقلال حل از شبکه‌بندی نتایج حلگر و کیفیت شبکه‌بندی فضای محاسباتی با استفاده از روش شاخص همگرایی شبکه یا GCI که توسط کلیک و همکاران [۳۲] ارائه گردیده، ارزیابی شده‌است. این روش با استفاده از برون‌یابی رچارد داوسون [۳۳] خطای گسسته سازی را تخمین می‌زند. در پژوهش حاضر عدم قطعیت نتایج عددی با استفاده از روش مذکور برای شبکه‌بندی‌های ذکر شده در جدول ۶ ارزیابی گردیده‌است. نتایج حاصل از ارزیابی عدم قطعیت برای حالت ذکر شده در جدول ۷ ارائه شده‌است.

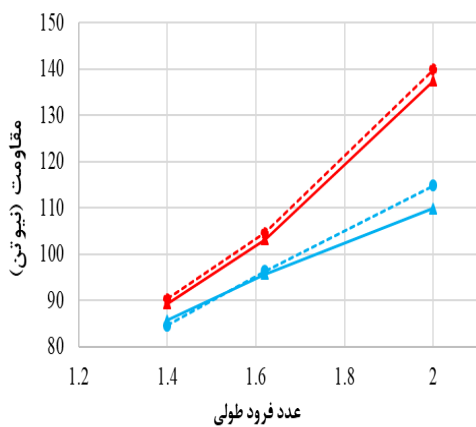
جدول ۶- تغییر مؤلفه‌های هیدرودینامیکی شناور با و بدون پله عرضی در تعداد مختلف شبکه برای عدد فرود طولی ۲

شناور مجهز به پله عرضی			شناور بدون پله عرضی			تعداد شبکه ($\times 10^2$)
سطح خیس (مترمربع)	تریوم (درجه)	مقاومت (نیوتن)	سطح خیس (مترمربع)	تریوم (درجه)	مقاومت (نیوتن)	
۰/۸۲۴	۲/۴	۱۰۲/۸۶	۰/۹۱	۲/۲۳	۱۳۵/۱	۵۴۰
۰/۸۵۶	۲/۴۹	۱۰۴/۳۹	۰/۹۳۹	۲/۳۷۶	۱۳۶/۹	۷۳۰
۰/۸۹۲	۲/۵۷	۱۰۴/۹۲	۰/۹۷۹	۲/۴۵	۱۳۷/۵	۱۹۴۰
۰/۸۹۵	۲/۵۸	۱۰۵/۱۱	۰/۹۸۲	۲/۴۶	۱۳۷/۷۱	۲۹۰۰

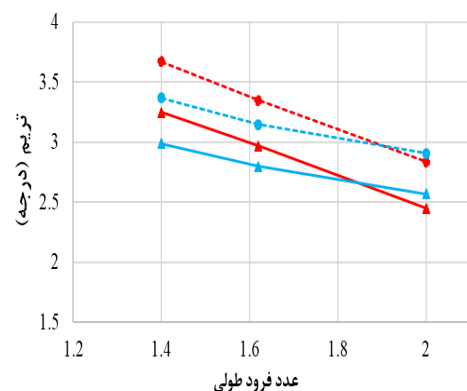
جدول ۷- خطای گسسته سازی مؤلفه‌های هیدرودینامیکی بر مبنای روش GCI

شناور مجهز به پله عرضی			شناور بدون پله عرضی			مشخصات	ردیف
سطح خیس	تریوم	مقاومت	سطح خیس	تریوم	مقاومت		
۰/۸۵۶	۲/۴۹	۱۰۵/۱۱	۰/۹۳۹	۲/۴۶	۱۳۷/۵	ϕ_1	۱

۰/۷۸۶	۲/۵۵	۱۰۴/۹۲	۰/۹۴۸	۲/۴۵	۱۳۶/۹	φ_2	۲
۰/۷۹۲	۲/۵۸	۱۰۴/۳۹	۰/۹۵۳	۲/۳۷۶	۱۳۵/۱	φ_3	۳
۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	F_{21}	۴
۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	F_{32}	۵
۰/۰۷	-۰/۰۶	-۰/۵۳	-۰/۰۰۹	-۰/۰۷۴	-۰/۰۶	ε_{21}	۶
-۰/۰۳۲	-۰/۰۹	-۱/۵۳	-۰/۰۲۹	-۰/۱۴۶	-۱/۸	ε_{32}	۷
۰/۶۹	۲/۵۵	۱۰۴/۹۲	۰/۹۴۸	۲/۴۵	۱۳۷/۵	φ_{21ext}	۸
۳/۵۸	۰/۱۴۶	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۹	۰/۱	۰/۰۰۵	ε_{21ext}	۹
۱/۹۵	۰/۱۸۳	۰/۰۰۸۳	۰/۰۱۱	۰/۱۲۵	۰/۰۰۶۵	$GCI_{21medium}$	۱۰



الف: تغییرات مقاومت شناور در اعداد فرود طولی مختلف



ب: تغییرات تیریم شناور در اعداد فرود طولی مختلف

شکل ۵- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی مقاومت و تیریم شناور با و بدون پله عرضی

۵- بررسی و تحلیل نتایج

۵-۱- بررسی اثر تغییر زاویه پله بر مؤلفه‌های مقاومت

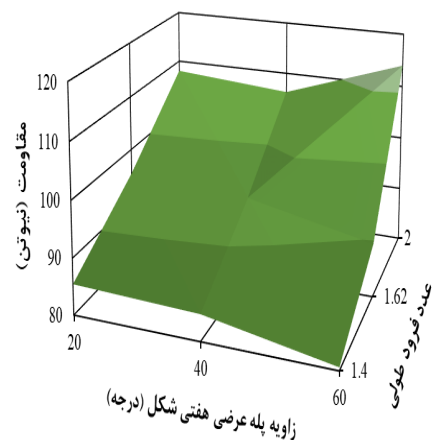
در این بخش تأثیر ایجاد زاویه در پله عرضی بر مقاومت شناور بررسی و تحلیل گردیده‌است که زاویه ایجاد شده در پله عرضی در دو حالت هفتی و هشتی شکل برای سه زاویه

پارامترها و روابط مربوط به روش شاخص همگرایی شبکه به طور کامل در مرجع [۳۲] ذکر گردیده‌است. نتایج مربوط به بررسی عدم قطعیت برای شبیه‌سازی حاضر نشان می‌دهد که مقدار GCI به دست آمده برای مولفه‌های مقاومت و تیریم شناور با و بدون پله عرضی کمتر از ۱٪ است که بیانگر دقت قابل قبول شبکه‌بندی انجام شده در محاسبه مولفه‌های هیدرودینامیکی شناور می‌باشد.

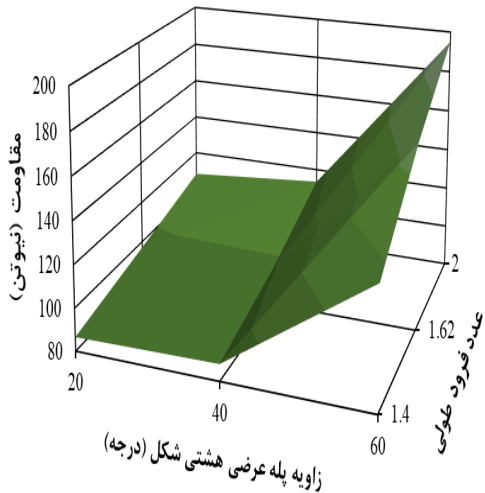
۴- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر نتایج حاصل از روش عددی و با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۳] برای شناور با و بدون پله عرضی به منظور اعتبار سنجی شبیه‌سازی عددی مقایسه شده‌است. در این راستا نتایج مربوط به مولفه‌های مقاومت و تیریم شناور با و بدون پله عرضی ارزیابی گردیده‌است. در شکل ۵ نتایج عددی و آزمایشگاهی در حالت‌های مذکور مورد مقایسه قرار گرفته‌است. نتایج نشان می‌دهد که میانگین خطای ایجاد شده در میزان مقاومت شناور با و بدون پله عرضی به ترتیب برابر ۱/۴٪ و ۱/۲٪ می‌باشد همچنین میزان تیریم شناور نسبت به نتایج آزمایشگاهی دقت مناسبی داشته‌است در نتیجه شبیه‌سازی حاضر به خوبی می‌تواند رفتار شناور را محاسبه و پیش‌بینی نماید و از دقت لازم برخوردار می‌باشد.

۲۰، ۴۰ و ۶۰ در نظر گرفته شده است. در شکل ۶ تأثیر تغییر زاویه پله‌های عرضی هفتی و هشتی شکل بر میزان مقاومت شناور در اعداد فرود طولی مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در پله‌های هفتی شکل افزایش زاویه از ۲۰ به ۴۰ درجه موجب کاهش میزان مقاومت شناور در کلیه اعداد فرود طولی مورد بررسی گردیده است که علت آن افزایش میزان هوادهی ایجاد شده در کف شناور می‌باشد. میزان کاهش مقاومت شناور در دو زاویه مذکور نسبت به شناور با پله عرضی بدون زاویه به طور میانگین در اعداد فرود مورد بررسی به ترتیب ۰٫۷۶٪ و ۲٪ کاهش یافته است. افزایش میزان زاویه ایجاد شده در پله عرضی به ۶۰ درجه، موجب افزایش ۳٫۲٪ میزان مقاومت شناور در عدد فرود طولی ۲ نسبت به شناور با پله عرضی بدون زاویه گردیده است که عامل آن کاهش قابل توجه میزان هوادهی در حالت مذکور می‌باشد. در پله‌های عرضی هشتی شکل میزان مقاومت شناور نسبت به پله‌های عرضی بدون زاویه افزایش یافته است به طوری که در زوایای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه میزان مقاومت به ترتیب ۱٫۱۵٪، ۲٫۷۵٪ و ۲۰٪ افزایش یافته است که عامل آن کاهش میزان هوادهی ایجاد شده در محل پله عرضی هشتی شکل می‌باشد. بر این مبنا پله عرضی هشتی شکل عملکرد مناسبی از لحاظ کاهش میزان مقاومت نداشته است. در نتیجه در حالت کلی از نقطه نظر کاهش میزان مقاومت، شناور با پله عرضی هفتی شکل در زاویه ۴۰ درجه عملکرد مناسبی نسبت به سایر موارد بررسی شده در کاهش میزان مقاومت شناور داشته است.



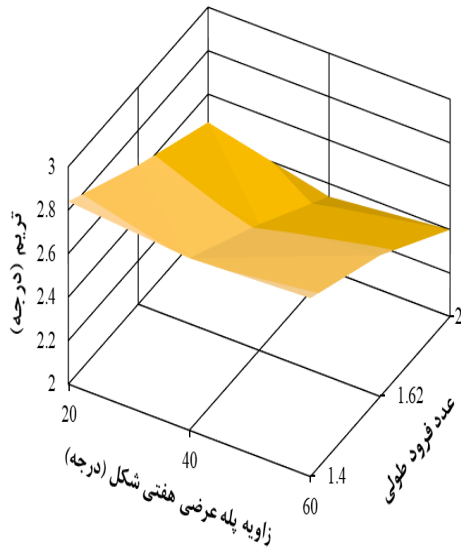
الف: پله‌های عرضی هفتی شکل (زاویه پله‌های عرضی به سمت پاشنه)



ب: پله‌های عرضی هشتی شکل (زاویه پله‌های عرضی به سمت سینه)

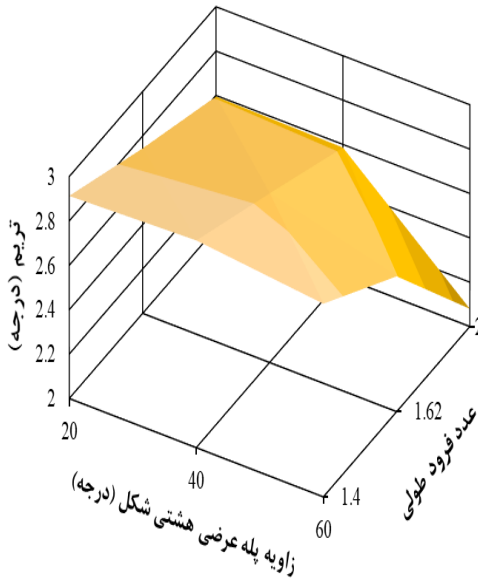
شکل ۶- تأثیر تغییر زاویه پله‌های عرضی بر میزان مقاومت شناور در اعداد فرود طولی مختلف

مقاومت کل وارد بر بدنه شناور شامل دو مؤلفه مقاومت فشاری (اختلاف فشار در سینه و پاشنه) و مقاومت اصطکاکی است. در شکل ۷ مولفه‌های مقاومت برای سه حالت شناور بدون پله، شناور مجهز به پله عرضی بدون زاویه و شناور با پله عرضی هفتی شکل در زاویه ۴۰ درجه (حالت بهینه پله عرضی زاویه‌دار) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اضافه نمودن پله عرضی به شناور موجب افزایش میزان مقاومت فشاری وارد بر شناور گردیده است که عامل آن خط فشار ایجاد شده در پشت پله عرضی می‌باشد همچنین افزودن پله به بدنه شناور با ایجاد هوادهی و کاهش سطح خیس باعث کاهش میزان مقاومت اصطکاکی گردیده است. مقایسه مولفه‌های مقاومت برای شناور مجهز به پله عرضی با و بدون زاویه نشان می‌دهد که اضافه نمودن زاویه به پله عرضی تأثیر قابل توجهی بر میزان مقاومت فشاری نداشته است اما با کاهش بیشتر سطح خیس موجب کاهش مقاومت اصطکاکی در شناور با پله هفتی شکل (در زاویه بهینه ۴۰ درجه) نسبت به شناور با پله بدون زاویه به طور میانگین ۲٫۹۵٪ کاهش یافته است. بر این اساس پله عرضی هفتی شکل در ارتفاع، طول و زاویه بهینه با کاهش میزان سطح خیس شناور و افزایش هوادهی قادر به کاهش مقاومت اصطکاکی و به تبع آن مقاومت کل شناور می‌باشد.



■ 2.2-2.2 ■ 2.2-2.4 ■ 2.4-2.6 ■ 2.6-2.8 ■ 2.8-3

الف: پله‌های عرضی هفتی شکل (زاویه پله‌های عرضی به سمت پاشنه)

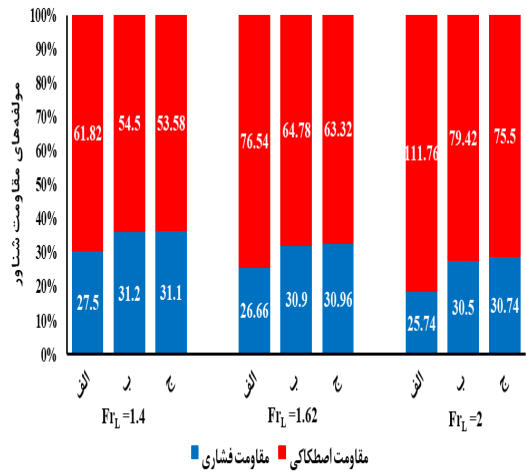


■ 2.2-2.2 ■ 2.2-2.4 ■ 2.4-2.6 ■ 2.6-2.8 ■ 2.8-3

ب: پله‌های عرضی هشتی شکل (زاویه پله‌های عرضی به سمت سینه)

شکل ۸- تاثیر تغییر زاویه پله‌های عرضی بر میزان تریم شناور در اعداد فرود طولی مختلف

مقاومت اصطکاکی در شناورهای تندرو سهم بیشتری در میزان مقاومت کل شناور دارد (شکل ۷). مهم‌ترین عامل در میزان مقاومت اصطکاکی شناور چگالی و لزجت بالای سیال آب می‌باشد که موثرترین راهبرد در کاهش آن، بیرون آوردن بدنه شناور از آب یا به عبارتی کاهش سطح خیس شناور است. در شکل ۹ میزان اثرگذاری ایجاد زاویه در پله عرضی بر تغییر سطح خیس وارد بر شناور نشان داده

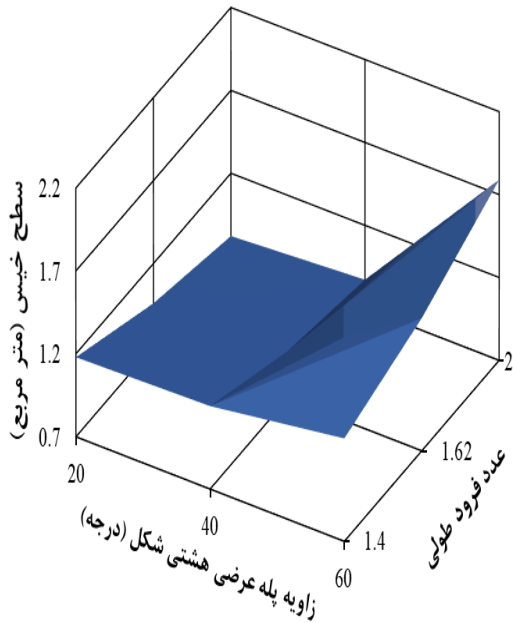


الف: شناور بدون پله عرضی ب: شناور مجهز به پله عرضی بدون زاویه ج: شناور مجهز به پله عرضی هفتی شکل شکل ۷- سهم مقاومت فشاری و اصطکاکی در مقاومت کل شناور

۲-۵- تریم و سطح خیس شناور

در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی رفتار دینامیکی شناور، تأثیر اضافه نمودن پله عرضی و بر غلتش شناور حول محور عرضی و همچنین تغییر سطح خیس کف شناور سنجیده شده است. در شکل ۸ تاثیر ایجاد زاویه در پله عرضی در اعداد فرود مختلف برای دو حالت پله عرضی هفتی و هشتی شکل بر میزان زاویه تریم شناور نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت میزان زاویه تریم در هر دو حالت پله عرضی کاهش یافته است. در پله عرضی هفتی شکل با زاویه ۴۰ درجه میزان تریم از دو زاویه دیگر کمتر شده است و پله عرضی در این حالت عملکرد بهتری در کاهش حرکات شناور داشته است. همچنین با افزایش زاویه پله به ۶۰ درجه میزان اثرگذاری پله عرضی در ایجاد فشار در پاشنه شناور کمتر و تریم شناور نسبت به زاویه ۴۰ درجه افزایش یافته است. با افزایش زاویه در پله‌های عرضی هشتی شکل تریم شناور کاهش یافته است به طوری که در زاویه ۶۰ درجه تریم شناور نسبت به حالت بدون زاویه ۱۹٫۴٪ کاهش یافته است که این امر موجب افزایش قابل توجه میزان مقاومت گردیده است (شکل ۶ ب) لذا بکارگیری پله عرضی هشتی شکل عملکرد مناسبی بر بهبود رفتار هیدرو دینامیکی شناور نداشته است. همچنین با در نظر گرفتن تأثیر پله عرضی هفتی شکل بر کاهش میزان مقاومت و تریم شناور، زاویه ۴۰ درجه عملکرد مناسبی در بهبود حرکات شناور داشته است و میزان تریم شناور را نسبت به شناور بدون پله و شناور مجهز به پله عرضی بدون زاویه به طور میانگین به ترتیب ۱۰٫۶٪ و ۴٫۸۷٪ کاهش داده است.

الف: پله‌های عرضی هفتی شکل (زاویه پله‌های عرضی به سمت پاشنه)

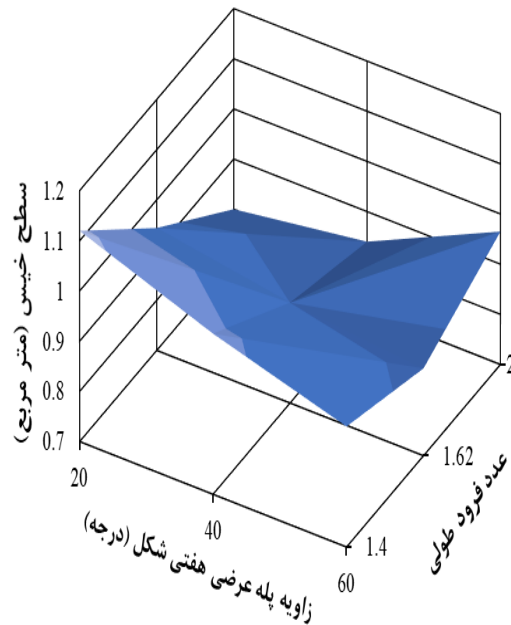


■ 1.7-2.2 ■ 1.2-1.7 ■ 0.7-1.2

ب: پله‌های عرضی هشتی شکل (زاویه پله‌های عرضی به سمت سینه)

شکل ۹- تاثیر تغییر زاویه پله‌های عرضی بر میزان سطح خیس شناور در اعداد فرود طولی مختلف

شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که در پله‌های هفتی شکل کم‌ترین میزان سطح خیس مربوط به پله عرضی با زاویه ۴۰ درجه می‌باشد که در آن هوادهی بیشتری در محل پله ایجاد گردیده‌است و موجب کاهش میزان سطح خیس (شکل ۹ الف) و در پی آن کاهش مقاومت شناور در این حالت شده‌است (شکل ۶ الف). میزان کاهش سطح خیس شناور با پله عرضی هفتی شکل نسبت به پله عرضی بدون زاویه به‌طور میانگین معادل ۶/۹٪ است. در پله‌های عرضی با زاویه هشتی شکل هوادهی در محل پله عرضی ایجاد نشده‌است به همین علت سطح خیس شناور نسبت به سطح خیس کف شناور در حالت بدون زاویه افزایش یافته‌است (شکل ۹ ب). در نتیجه پله‌های عرضی با زاویه هشتی شکل تاثیری منفی بر کاهش سطح خیس شناور دارند و عملکرد مناسبی در بهبود مولفه‌های هیدرودینامیکی شناور نداشته‌اند.

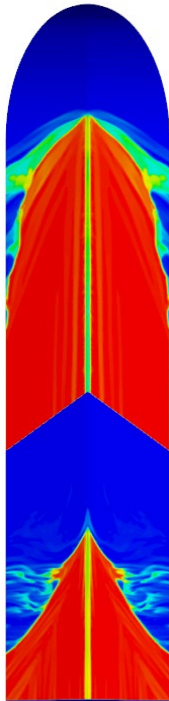


■ 1.1-1.2 ■ 1-1.1 ■ 0.9-1 ■ 0.8-0.9 ■ 0.7-0.8

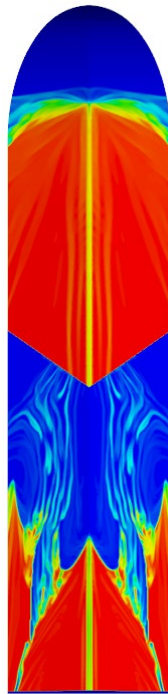
ایجاد نموده‌است که کاهش بیشتر مقاومت را در پی دارد. پله عرضی بدون زاویه نسبت به پله عرضی هشتی شکل مساحت هوادهی بیشتری در کف شناور ایجاد نموده‌است و سطح خیس شناور را کاهش داده‌است.

در شکل ۱۰ سطح خیس کف شناور بدون پله عرضی و شناور مجهز به پله عرضی با و بدون زاویه در عددی فرود طولی ۲ نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که ایجاد پله به طور کلی با ایجاد هوادهی موجب کاهش سطح خیس کف شناور گردیده‌است. همچنین پله عرضی هفتی شکل هوادهی گسترده‌تری در کف شناور نسبت به دو حالت دیگر

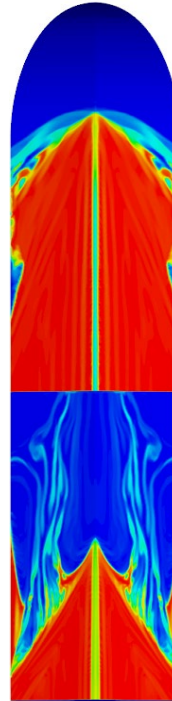
Volume Fraction of water



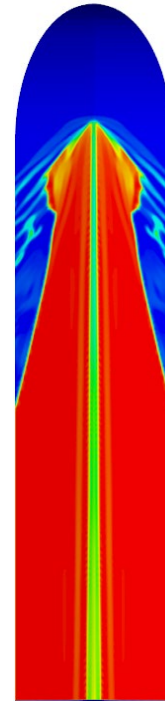
د: شناور با پله عرضی هشتی شکل با زاویه ۴۰ درجه



ج: شناور با پله عرضی هفتی شکل با زاویه ۴۰ درجه

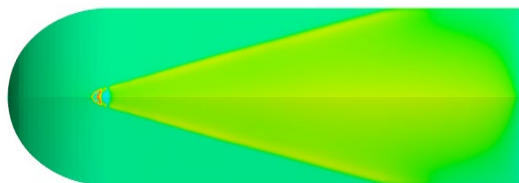


ب: شناور با پله عرضی بدون زاویه



الف: شناور بدون پله عرضی

شناور مجهز به پله عرضی هفتی شکل (شکل ۱۱ ج) فشاری بیشتری در انتهای شناور نسبت به سایر حالت‌های بررسی شده ایجاد نموده است که موجب کاهش بیشتر تریم در این حالت شده است که این عمل موجب افزایش پایداری طولی شناور و جلوگیری از ایجاد ناپایداری طولی پورپویزینگ در شناور گردیده است.



الف: شناور بدون پله عرضی

شکل ۱۰- سطح خیس کف شناور در عدد فرود طولی ۲

۳-۵- توزیع فشار وارد بر کف شناور

جریان سیال در محل برخورد به بدنه شناور یک خط فشار ایجاد می‌نماید که موجب ایجاد تریم در شناور می‌گردد. با ایجاد پله عرضی در کف شناور جریان در محل پله عرضی از بدنه شناور جدا می‌گردد و پس از طی مسیری دوباره به بدنه شناور برخورد می‌کند و خط فشاری در پاشنه شناور ایجاد می‌نماید که این امر موجب ایجاد نیروی برا در پاشنه شناور و کاهش میزان تریم و افزایش پایداری طولی در شناور تندرو می‌گردد. در شکل ۱۱ کانتور توزیع فشار وارد بر کف شناور با و بدون پله عرضی در عدد فرود طولی ۲ نشان داده شده است. کانتور فشار مربوط به پله عرضی با زاویه ۴۰ درجه می‌باشد که نسبت به سایر زوایا از نقطه نظر میزان مقاومت، تریم و سطح خیس عملکرد بهتری داشته است. مشاهده می‌شود که ایجاد پله در بدنه شناور موجب ایجاد خط فشار در انتهای شناور شده است که این عمل موجب کاهش تریم شناور مجهز به پله عرضی گردیده است (شکل ۸). همچنین ایجاد پله عرضی در کف

• شناور مجهز به پله هفتی شکل نسبت به شناور با پله‌های بدون زاویه و پله هشتی شکل عملکرد بهتری در میزان کاهش مقاومت داشته‌است. به طوری که شناور مجهز به پله هفتی شکل در حالت بهینه (زاویه ۴۰ درجه پله عرضی) نسبت به شناور مجهز به پله عرضی بدون زاویه به طور میانگین در اعداد فرود مورد بررسی ۲ درصد مقاومت شناور را کاهش داده‌است.

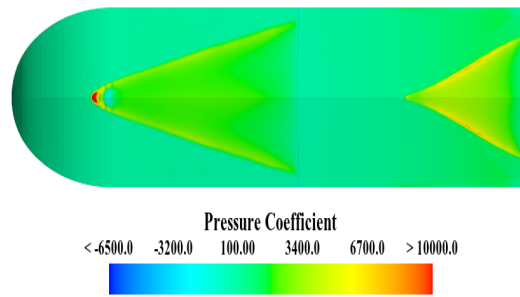
• شناور مجهز به پله عرضی هشتی شکل به نسبت پله‌های بدون زاویه و هفتی شکل عملکرد بهتری در کاهش میزان تریم شناور در زاویه ۶۰ درجه داشته‌است که این عمل موجب افزایش قابل توجه مقاومت شناور گردیده‌است و عملکرد هیدرودینامیکی شناور را کاهش داده‌است.

• شناور مجهز به پله عرضی هفتی شکل در حالت بهینه هوادهی گسترده‌تری به نسبت شناور با پله عرضی بدون زاویه و هشتی شکل در کف شناور ایجاد نموده‌است و عملکرد بهتری در کاهش میزان سطح خیس شناور داشته‌است.

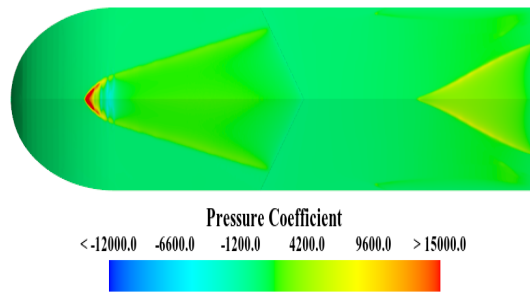
• خط فشار ایجاد شده در پاشنه شناور به واسطه ایجاد پله عرضی هفتی شکل نسبت به سایر حالت‌های پله عرضی (پله عرضی بدون زاویه و هشتی شکل) مقدار بیشتری داشته‌است که این عمل موجب کاهش میزان تریم شناور و بهبود پایداری طولی گردیده‌است.

۷- مراجع

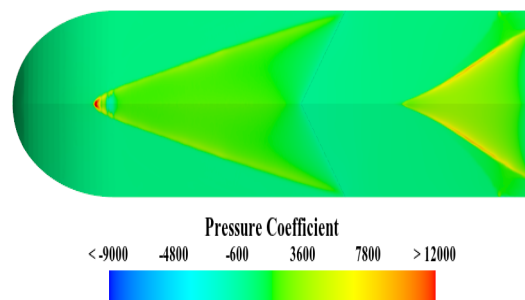
- [1] A. Ebrahimi, R. Shafaghat, A. Hajiabadi, and M. Yousefifard, "Numerical and Experimental Investigation of the Aero-Hydrodynamic Effect on the Behavior of a High-Speed Catamaran in Calm Water," *J. Mar. Sci. Appl.*, vol. 21, no. 3, pp. 56–70, 2022, doi: 10.1007/s11804-022-00295-6.
- [2] S. Park *et al.*, "Single- and two-phase CFD V&V for high-speed stepped planing hulls," *Ocean Eng.*, vol. 261, p. 112047, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112047.
- [3] and E. S. H. John R. Dawson RM, "Effect of varying depth of step, angle of after body kell, length of after body



ب: شناور با پله عرضی بدون زاویه



ج: شناور با پله عرضی هفتی شکل



د: شناور با پله عرضی هشتی شکل

شکل ۱۱- کانتور فشار وارد بر کف شناور در عدد فرود طولی ۲

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش میزان اثرگذاری ایجاد زاویه در پله عرضی بر رفتار دینامیکی شناور تندرو مورد ارزیابی قرار گرفته‌است که برای نیل به این هدف در گام اول با استفاده از روش عددی میزان مقاومت و تریم شناور بدون پله عرضی و شناور مجهز به پله عرضی بدون زاویه محاسبه شده‌است. با نتایج آزمایشگاهی موجود اعتبارسنجی گردیده‌است. سپس با توسعه روش عددی میزان و نحوه اثرگذاری ایجاد زاویه در پله عرضی بر رفتار هیدرودینامیکی و پایداری طولی شناور ارزیابی گردیده‌است. در این راستا دو حالت پله عرضی زاویه‌دار به سمت سینه یا هشتی شکل و پله عرضی زاویه‌دار به سمت پاشنه یا هفتی شکل در نظر گرفته شده‌است که در سه عدد فرود طولی ۱/۴، ۱/۶۲ و ۲ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

- doi: 10.1007/s11804-020-00182-y.
- [12] F. Cucinotta, E. Guglielmino, and F. Sfravara, "A critical CAE analysis of the bottom shape of a multi stepped air cavity planing hull," *Appl. Ocean Res.*, vol. 82, pp. 130–142, 2019, doi: 10.1016/j.apor.2018.11.003.
- [13] A. Najafi, H. Nowruzi, M. J. Ameri, and M. Karami, "An experimental study of the wetted surfaces of two- stepped planing hulls," *Ocean Eng.*, vol. 222, p. 106164, 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108589.
- [14] P. Ghadimi, S. Panahi, and S. Tavakoli, "Hydrodynamic study of a double-stepped planing craft through numerical simulations," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 1, pp. 1–15, 2019, doi: 10.1007/s40430-018-1501-1.
- [15] A. Najafi and H. Nowruzi, "On hydrodynamic analysis of stepped planing crafts," *J. Ocean Eng. Sci.*, vol. 4, no. 3, pp. 238–251, 2019, doi: 10.1016/j.joes.2019.04.007.
- [16] S. M. Sajedi and P. Ghadimi, "Experimental investigation of the effect of two steps on the performance and longitudinal stability of a mono-hull high-speed craft," *Cogent Eng.*, vol. 7, no. 1, p. 1790980, 2020, doi: 10.1080/23311916.2020.1790980.
- [17] S. M. Sajedi and P. Ghadimi, "Experimental and Numerical Investigation of Stepped Planing Hulls in Finding an Optimized Step Location and Analysis of Its Porpoising Phenomenon," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/3580491.
- [18] L. Vitiello, S. Mancini, R. N. Bilandi, A. Dashtimanesh, F. De Luca, and V. Nappo, "A comprehensive stepped planing hull systematic series: Part 1 - Resistance test," *Ocean Eng.*, vol. 266, p. 112242, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112242.
- [19] G. Fridsma, "A Systematic Study of the Rough-Water Performance of Planing Boats," Stevens Inst of Tech Hoboken NJ Davidson Lab, 1969. [Online]. Available: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0708694>
- [20] A. M. Javad, A. D. A. Hossein, N. Amin, chine, and Gross," *load. Lagley Meml. Aeronaut. Lab. Langley Field, VA.*
- [4] D. Savitsky and M. Morabito, "Surface wave contours associated with the forebody wake of stepped planing hulls," *Mar. Technol.*, vol. 47, no. 1, pp. 1–16, 2010, doi: 10.5957/mtsn.2010.47.1.1.
- [5] D. J. Taunton, D. A. Hudson, and R. A. Shenoi, "Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls-part 1: performance in calm water," *Int. J. Small Cr. Technol.*, vol. 152, pp. 55–75, 2010.
- [6] D. J. Taunton, D. A. Hudson, and R. A. Shenoi, "Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls - part II: Performance in waves," *Trans. R. Inst. Nav. Archit. Part B Int. J. Small Cr. Technol.*, vol. 153, no. 1, pp. 55–75, 2011, doi: 10.3940/rina.ijset.2011.b1.97.
- [7] W. R. Garland and K. J. Maki, "A numerical study of a two-dimensional stepped planing surface," *Trans. - Soc. Nav. Archit. Mar. Eng.*, vol. 120, no. 02, pp. 545–557, 2013, doi: 10.5957/jspd.2012.28.2.60.
- [8] S. T. G. Veysi, M. Bakhtiari, H. Ghassemi, and M. Ghiasi, "Toward numerical modeling of the stepped and non-stepped planing hull," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 37, no. 6, pp. 1635–1645, 2015, doi: 10.1007/s40430-014-0266-4.
- [9] H. Nourghasemi, M. Bakhtiari, and H. Ghassemi, "Numerical study of step forward swept angle effects on the hydrodynamic performance of a planing hull," *Sci. Journals Marit. Univ. Szczecin*, vol. 51, no. 123, pp. 35–42, 2017.
- [10] H. Kazemi, M. Salari, H. Nowruzi, and A. Najafi, "Hydrodynamics analysis of stepped planing hull under different physical and geometrical conditions," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 9, pp. 1–12, 2019, doi: 10.1007/s40430-019-1866-9.
- [11] H. Kazemi, M. M. Doustdar, A. Najafi, H. Nowruzi, and M. J. Ameri, "Hydrodynamic Performance Prediction of Stepped Planing Craft Using CFD and ANNs," *J. Mar. Sci. Appl.*, vol. 20, no. 1, pp. 67–84, 2021,

- tehnike. 2015;66(4):1-22.”
- [31] F. De Luca, S. Mancini, S. Miranda, and C. Pensa, “An extended verification and validation study of CFD simulations for planing hulls,” *J. Sh. Res.*, vol. 60, no. 2, pp. 101–118, 2016, doi: 10.5957/JOSR.60.2.160010.
- [32] I. B. Celik, U. Ghia, P. J. Roache, C. J. Freitas, H. Coleman, and P. E. Raad, “Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications,” *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 130, no. 7, pp. 0780011–0780014, 2008, doi: 10.1115/1.2960953.
- [33] L. F. Richardson, “IX. The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam,” *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A, Contain. Pap. a Math. or Phys. Character*, vol. 210, no. 459–470, pp. 307–357, 1911, doi: 10.1098/rsta.1911.0009.
- and K. Hamid, “Effect of Angle Change in the Aft-Wise Transverse Step on the Hydrodynamic Performance of Planing Hulls,” *J. Mar. Sci. Appl.*, pp. 1–11, 2025, doi: 10.1007/s11804-025-00642-3.
- [21] F. R. Menter, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,” *AIAA J.*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994, doi: 10.2514/3.12149.
- [22] F. Stern, J. Yang, Z. Wang, H. Sadat-Hosseini, and M. Mousaviraad, “Computational ship hydrodynamics: Nowadays and way forward,” *Int. Shipbuild. Prog.*, vol. 60, no. 1–4, pp. 3–105, 2013, doi: 10.3233/ISP-130090.
- [23] X. Bi, J. Zhuang, and Y. Su, “Seakeeping analysis of planing craft under large wave height,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 4, p. 1020, 2020, doi: 10.3390/W12041020.
- [24] ITTC, “9.1.0 Practical Guidelines for Ship CFD Applications,” 2011.
- [25] Siemens, “PLM STAR-CCM+ software user’s guide version 16.04, Siemens CD-adapco.”
- [26] “ITTC, Practical guidelines for ship CFD applications, in (7.5-03-02-03). Revision-01. 2011”.
- [27] J. Suneela, P. Krishnankutty, and V. A. Subramanian, “Hydrodynamic performance of planing craft with interceptor-flap hybrid combination,” *J. Ocean Eng. Mar. Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 421–438, 2021, doi: 10.1007/s40722-021-00211-0.
- [28] P. M. Carrica, R. V. Wilson, R. W. Noack, and F. Stern, “Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids,” *Comput. Fluids*, vol. 36, no. 9, pp. 1415–1433, 2007, doi: 10.1016/j.compfluid.2007.01.007.
- [29] A. De Marco, S. Mancini, S. Miranda, R. Scognamiglio, and L. Vitiello, “Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planing hull,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 64, pp. 135–154, 2017, doi: 10.1016/j.apor.2017.02.004.
- [30] “Begovic E, Bertorello C, Mancini S. Hydrodynamic performances of small size swath craft. Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske