

بررسی تأثیر مشخصه‌های هندسی اسپری ریل بر مولفه‌های هیدرودینامیکی و مقاومت شناور در آب های آرام

امین نجفی^۱، مهدی رایجی^۲، محمدرضا نجفی^{۳*}

^۱ استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، Najafi.sharif@yahoo.com

^۲ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، Alabd.rasool@chmail.ir

^۳ استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، Drmrnajafi@ihu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

سطح خیس ناشی از اسپری آب یکی از عوامل ایجاد مقاومت در شناورهای تندرو می‌باشد. بر این مبنا تأثیر زائده اسپری ریل در راستای کاهش مقاومت شناور بررسی شده و تأثیر مشخصه‌های هندسی آن شامل زاویه زیرین، عرض و تعداد اسپری ریل‌ها بر مولفه‌های هیدرودینامیکی و مقاومت شناور با استفاده از روش عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با داده‌های مشابه آزمایشگاهی برای شناور بدون زائده اعتبارسنجی گردیده است. روش تاگوچی ۱۸ طرح آزمایش پیشنهاد نموده است که هر طرح آزمایش در دو حالت کلی قرارگیری اسپری ریل‌ها (در راستای چاین و موازی با کیل) برای عدد فرود عرضی ۱/۹۹ و ۳/۳۳ شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که دو مشخصه هندسی زاویه زیرین و تعداد اسپری‌ها با افزایش عدد فرود شناور رابطه مستقیم دارند به طوری که در حالت حرکتی پروازی زاویه زیرین مثبت با بیشترین تعداد اسپری ریل کاهش بیشتری در میزان مقاومت شناور ایجاد نموده است به علاوه مقدار بهینه مشخصه هندسی عرض اسپری ریل با افزایش عدد فرود کاهش یافته است در نتیجه مقدار عرض اسپری ریل با افزایش عدد فرود رابطه عکس داشته است. همچنین اسپری ریل‌های موازی با کیل به نسبت اسپری ریل‌های در راستای چاین نقش مؤثرتری در کاهش مقاومت شناور دارند. مقدار تریم و بالآمدگی شناور برای اسپری ریل‌های موازی با کیل در مقایسه با اسپری ریل‌های موازی با چاین کمتر بوده است که این امر موجب کاهش احتمال وقوع ناپایداری طولی پورپوزینگ در شناور می‌گردد.

ناریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵

کلمات کلیدی:

مقاومت شناور

اسپری ریل

مولفه‌های هیدرودینامیکی

ناپایداری طولی پورپوزینگ

Investigation of the Effects of Geometrical Characteristics of the Spray Rail on Hydrodynamic Components and Floating Resistance in Calm Waters

Amin Najafi¹, Mahdi Rayeji², Mohammad Reza Najafi^{3*}

¹ Assistant Professor, Imam Hossein Comprehensive University; Najafi.sharif@yahoo.com

² MSc in mechanical engineering, Imam Hossein Comprehensive University; Alabd.rasool@chmail.ir

³ Assistant Professor, Imam Hossein Comprehensive University; Drmrnajafi@ihu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 14 Nov 2024

Accepted: 25 Dec 2024

Available online: 25 Dec 2024

Keywords:

Floating Resistance

Spray rail

Hydrodynamic components

Longitudinal stability Porpoising

ABSTRACT

The wet surface caused by water spray is one of the factors of creating resistance in high-speed floats. On this basis, the effect of the sprayer appendage in reducing the buoyancy resistance has been investigated and the effect of its geometric characteristics, including the bottom angle, width and number of spray rails, on the hydrodynamic components and the buoyancy resistance has been investigated using a numerical method. The results of numerical simulations have been validated with similar laboratory data for the float without appendages. Taguchi's method has proposed 18 test designs, that each test design is simulated in two general positions of spray rails (in line with the chine and parallel to the keel) for the transverse landing number of 1.99 and 3.33. The results show that the two geometric characteristics of the bottom angle and the number of sprays have a direct relationship with

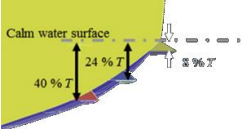
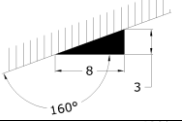

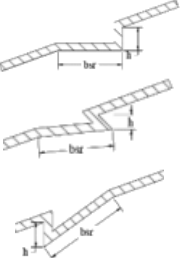
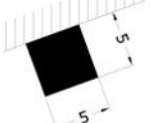
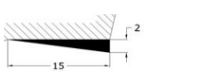
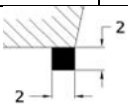
the increase in the landing number of the float, so that in the flight mode, the positive bottom angle with the highest number of rail sprays has caused a greater decrease in the resistance of the float, in addition to the optimal value of the width geometric characteristic. The rail spray has decreased with the increase of Froud number, as a result, the width of the rail spray has an opposite relationship with the increase of Froud number. Also, spray rails parallel to the keel have a more effective role in reducing floating resistance than spray rails in line with the chine. The amount of trim and rise of the float for the spray of rails parallel to the keel is less compared to the spray of rails parallel to the chine, which reduces the possibility of longitudinal porpoising instability in the float.

۱ - مقدمه

حرکت در سرعت‌های بالا، قابلیت مانورپذیری و دیگر ویژگی‌های خاص شناورهای تندرو موجب افزایش تقاضا برای استفاده از این شناورها گردیده است. نیروی مقاومت یکی از مهم‌ترین مولفه‌های هیدرودینامیکی در طراحی شناورهای تندرو به حساب می‌آید [۱]. مهم‌ترین عامل در ایجاد نیروی مقاومت، سطح خیس در معرض سیال آب است [۲]. سطح خیس در معرض فشار موجب ایجاد نیروی برا در شناور می‌شود اما سطح خیس ناشی از اسپری آب موجب ایجاد نیروی برا در شناور نمی‌گردد و فقط با افزایش سطح خیس، مقاومت شناور را افزایش می‌دهد [۳][۴]. بر این اساس کاهش سطح خیس ناشی از اسپری آب می‌تواند موجب کاهش مقاومت شناور گردد. [۵]. استفاده از اسپری ریل در بدنه‌هایی با نسبت طول به عرض کمتر، تأثیر بیشتری بر کاهش مقاومت داشته است و در موقعیت مناسب موجب کاهش مقاومت شناور می‌گردد [۶][۷]. سئو و همکاران [۸] اثر موقعیت اسپری ریل را بر میزان پایداری، مقاومت و دیگر پارامترهای هیدرودینامیکی شناور با استفاده از روش آزمایشگاهی در آب آرام و موج مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که بکارگیری اسپری ریل در ارتفاعی برابر با ۲۴ درصد آب‌خور شناور موجب بهبود مولفه‌های هیدرودینامیکی شناور گردیده است. لاکتوس و همکاران [۹] نحوه اثر گذاری دو زائده اینترسپتور اسپری و اسپری ریل‌های طولی را بر میزان کاهش مقاومت شناور مورد مقایسه و بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که اینترسپتور اسپری با توجه به موقعیت قرار گیری در سرعت مشخصی تأثیر بیشتری بر کاهش میزان مقاومت و افزایش نیروی برا نسبت به اسپری ریل‌های طولی داشته است. در حالی که در سایر سرعت‌ها موجب افزایش میزان مقاومت شناور گردیده است. مولچانف و همکاران [۱۰] در ۲۰۱۹ عملکرد اسپری ریل و اسپری دفلکتور را بر عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور تندرو مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که اسپری ریل در تمامی سرعت‌ها موجب کاهش مقاومت شده است در حالی که اسپری دفلکتور با توجه به موقعیت قرار گیری فقط قادر به کاهش مقاومت ناشی از اسپری آب در سرعت مشخصی گردیده است. در ادامه کاستالید و همکاران [۱۱] در ۲۰۲۱ تأثیر فاصله اسپری دفلکتور از خط سکون را بر عملکرد شناور تندرو

تک بدنه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از اسپری دفلکتور در فواصل بیشتر از خط سکون موجب تأثیر بیشتری بر کاهش مقاومت شناور در سرعت طراحی داشته است. ساموئل و همکاران [۱۲] در ۲۰۲۱ تأثیر اسپری ریل‌های قرار گرفته در کف شناور را بر مولفه‌های هیدرودینامیکی مقاومت، تریم و بالآمدگی مورد تحلیل قرار داده است. در این بررسی‌ها سه مقطع مختلف در سه تعداد متفاوت (دو، چهار و شش اسپری ریل قرار گرفته در کف شناور) ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت شناور مجهز به دو، چهار و شش اسپری ریل نسبت به شناور پایه به ترتیب حدود ۱/۸، ۳/۸ و ۴/۹ کاهش یافته است. همچنین تریم و بالآمدگی شناور مجهز به اسپری ریل نسبت به حالت پایه تغییر چندانی نداشته است. لاکتوس و همکاران [۱۳] در ۲۰۲۲ مقاومت، تریم و بالآمدگی شناور را با مقاطع مختلف اسپری ریل را تحلیل و بررسی نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از اسپری ریل‌هایی با مقطع مثلثی موجب بهبود عملکرد شناور شده است. در جدول ۱ مشخصه‌های هندسی اسپری ریل‌های بکار گرفته شده در پژوهش‌های مذکور بیان گردیده است که شامل نحوه چیدمان اسپری ریل‌ها در کف شناور، شکل و ابعاد کلی مقطع و طول اسپری ریل‌ها می‌باشد. تمامی پژوهش‌های بررسی شده تأثیر اضافه نمودن اسپری ریل را بر مولفه‌های هیدرودینامیکی از قبیل مقاومت، تریم و بالآمدگی بررسی نموده‌اند و در هیچ یک از پژوهش‌ها تأثیر مشخصات هندسی مقطع اسپری ریل در راستای طول شناور و شکل قرار گیری اسپری ریل‌ها در کف شناور بر مولفه‌های هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار نگرفته است. این در حالی است که به‌منظور درک بهتر جهت استفاده از زائده اسپری ریل در بهبود رفتار شناور، بررسی مقدار و نحوه اثر گذاری این زائده‌ها بر مولفه‌های هیدرودینامیکی شناور امری ضروری است که در پژوهش‌های گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر همین مبنا در پژوهش حاضر تأثیر مشخصه‌های هندسی مقطع اسپری ریل شامل تغییرات زاویه زیرین و عرض اسپری ریل در راستای طول شناور و همچنین حالت کلی قرار گیری اسپری ریل‌ها در کف شناور مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱- مشخصه‌های هندسی اسپری ریل

مشخصه‌های هندسی اسپری ریل				محقق
طول	شکل مقطع	نوع مقطع	چیدمان	
از قسمت پاشنه آغاز شده است و تا میانه شناور امتداد می‌یابد.		مثلثی	۳ مقطع مثلثی قرار گرفته در نزدیکی چاین (عرض اسپری ریل ۲۲/۵٪ طول خط آب می‌باشد)	سنو و همکاران [۷]
محل قرارگیری دفلکتور بر اساس طول خیس چاین و کیل و زاویه خط سکون تعیین شده است.	ارتفاع مقطع عرضی در راستای طول دفلکتور از ۰/۲۵ تا ۱/۳ سانتی‌متر تغییر می‌کند.	مثلثی	سه حالت اسپری دفلکتور در فواصل ۱/۷ و ۲/۲ و ۳/۵ سانتی‌متر از خط سکون	کاستالید و همکاران [۱۱]
سه اسپری ریل در هر طرف در ناحیه اسپری		مثلثی در راستای طول	دو حالت کلی اسپری ریل‌هایی که در راستای طول و اینترسپتور اسپری	لاکتوس و همکاران [۹]
یک اینترسپتور اسپری در جلوی خط سکون به موازات خط سکون		اینترسپتور با مقطع مثلثی		
از ابتدای سینه تا خط سکون یا ریشه اسپری		مثلثی	سه حالت تک، دو و سه اسپری در هر طرف در نظر گرفته شده است.	ساموئل و همکاران [۱۲]
اسپری چاین‌ها بر روی چاین شناور از پاشنه تا میانه شناور کشیده شده‌اند.		اسپری ریل با مقطع مستطیلی	شناور با و بدون اسپری ریل در دو حالت اینترسپتور اسپری و اسپری ریل قرار گرفته بر روی چاین	لاکتوس و همکاران [۱۳]
		اسپری چاین با مقطع مثلثی		
		اسپری اینترسپتور با مقطع مستطیلی		

مشخصات اصلی شناورهای مورد بررسی در جدول ۲ بیان شده است. مشخصه‌های هندسی اسپری ریل که در تحقیق حاضر بررسی شده‌اند شامل زاویه زیرین، تعداد و عرض مقطع اسپری ریل و همچنین حالت کلی قرارگیری اسپری ریل‌ها در کف شناور موازی با کیل و موازی با چاین می‌باشند (شکل ۱).

جدول ۲- مشخصات اصلی شناور مورد بررسی

مشخصه	نماد	واحد	زوایای خیز کف
طول کل	LOA	m	۲۵
			۱/۵

۲- تعریف مسئله

در این پژوهش تأثیر مشخصه‌های هندسی اسپری ریل بر مولفه‌های هیدرودینامیکی شناور مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در این راستا در گام اول با به‌کارگیری روش تاگوچی آزمون‌هایی جهت بررسی مشخصه‌های هندسی اسپری ریل طراحی گردیده است و سپس با استفاده از نرم‌افزار دینامیکی سیالات محاسباتی STAR-CCM+ V17.06 آزمون‌های تعیین شده مورد محاسبه قرار گرفته است و در نهایت میزان و نحوه اثرگذاری مشخصه‌های هندسی اسپری ریل بر مولفه‌های هیدرودینامیکی شناور تعیین شده است.

روش تاگوچی در واقع ترکیبی از تئوری طراحی آزمایش و تابع کاهش کیفیت است که در طراحی‌های مهندسی به طور گسترده استفاده می‌گردد [۱۶] [۱۷]. در پژوهش حاضر به منظور تعیین تأثیر مشخصه‌های هندسی اسپری ریل بر میزان نیروی مقاومت، زاویه تریم و بالآمدگی شناور از طرح آزمایش تاگوچی استفاده شده است. بر این اساس شکل مقطع اسپری ریل به صورت مثلثی، فاصله اسپری ریل‌ها از یکدیگر برابر و طول اسپری ریل‌ها از ابتدا تا انتهای شناور در نظر گرفته شده است. در طراحی آزمایش سه مولفه عرض اسپری ریل، زاویه زیرین اسپری ریل و تعداد اسپری ریل‌ها در کف شناور به عنوان فاکتورهای آزمایش در نظر گرفته شده‌اند. سطوح در نظر گرفته شده برای فاکتورهای مذکور در جدول ۴ ارائه گردیده است. با توجه به فاکتورها و سطوح در نظر گرفته شده تاگوچی ۱۸ طرح آزمایش را پیشنهاد می‌دهد که در جدول ۵ ارائه گردیده است. محاسبات برای هر طرح آزمایش تعیین شده در دو حالت قرار گیری اسپری ریل‌ها (موازی با چابین و موازی با کیل) برای دو حالت حرکتی نیمه‌جاب‌جایی ($Fr_B = 1/99$) و پروازی ($Fr_B = 3/33$) انجام شده است.

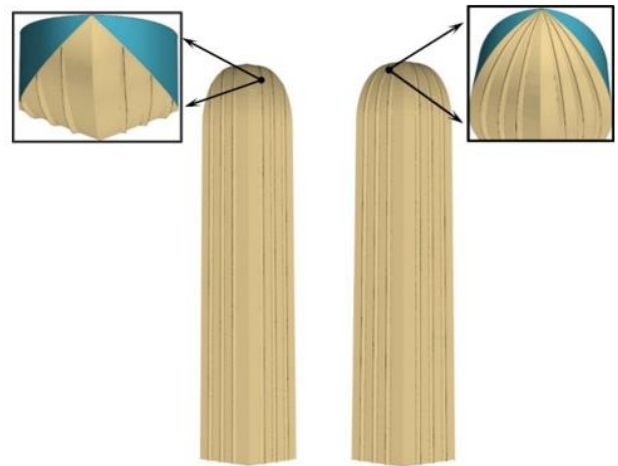
جدول ۴- فاکتورها و سطوح مورد بررسی در طرح آزمایش تاگوچی

مرتبۀ فاکتورها	فاکتورهای مورد بررسی		
	تعداد اسپری ریل	درصد عرض اسپری ریل به عرض مقطع	زاویه زیرین اسپری ریل (درجه)
۱	۲	۲	-۸
۲	۴	۳	-۴
۳	۶	۴	صفر
۴	-	-	۴
۵	-	-	۸
۶	-	-	۱۲

جدول ۵- طرح آزمایش تاگوچی با ۱۸ آزمون

شماره آزمایش	مرتبۀ فاکتورها		
	تعداد اسپری ریل‌ها	درصد عرض اسپری ریل به عرض مقطع	زاویه زیرین اسپری ریل
۱	۱	۱	۱
۲	۲	۲	۱
۳	۳	۳	۱
۴	۱	۱	۲
۵	۲	۲	۲
۶	۳	۳	۲
۷	۲	۱	۳
۸	۳	۲	۳

عرض	B	m	۰/۳
آبخور در پاشنه <td>T_{AP} <td>m <td>۰/۰۹۴۲</td> </td></td>	T_{AP} <td>m <td>۰/۰۹۴۲</td> </td>	m <td>۰/۰۹۴۲</td>	۰/۰۹۴۲
جاب‌جایی <td>Δ <td>N <td>۱۶۱/۳۷۴</td> </td></td>	Δ <td>N <td>۱۶۱/۳۷۴</td> </td>	N <td>۱۶۱/۳۷۴</td>	۱۶۱/۳۷۴
موقعیت مرکز ثقل طولی از سینه <td>LCG <td>m <td>۰/۹۷۴</td> </td></td>	LCG <td>m <td>۰/۹۷۴</td> </td>	m <td>۰/۹۷۴</td>	۰/۹۷۴
موقعیت مرکز ثقل عمودی از کیل <td>VCG <td>m <td>۰/۰۸۸۲</td> </td></td>	VCG <td>m <td>۰/۰۸۸۲</td> </td>	m <td>۰/۰۸۸۲</td>	۰/۰۸۸۲
تریب استاتیکی <td>τ <td>deg <td>۲/۲۸</td> </td></td>	τ <td>deg <td>۲/۲۸</td> </td>	deg <td>۲/۲۸</td>	۲/۲۸



الف) اسپری ریل در راستای چابین ب) اسپری ریل در راستای کیل

شکل ۱- دو حالت کلی قرارگیری اسپری ریل در کف شناور

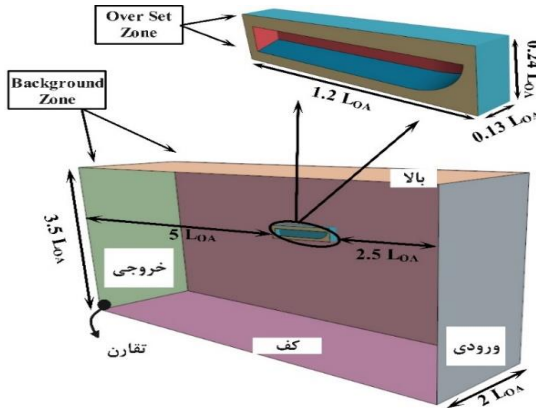
۳- مطالعه آزمایشگاهی

در این تحقیق مطالعه آزمایشگاهی به منظور صحت‌سنجی نتایج عددی انجام شده است. این آزمایش‌ها در آزمایشگاه ملی دریایی خلیج فارس مطابق با توصیه‌های کفرانس بین‌المللی حوضچه کشش (ITTC) صورت گرفته است [۱۴][۱۵]. آزمایش‌ها بر روی شناور مورد بررسی در محدوده عدد فرود عرضی ($Fr_B = \frac{V}{\sqrt{g.B}}$) ۰/۶۶ تا ۳/۳۳ انجام شده است. مولفه‌های هیدرودینامیکی محاسبه شده در این آزمایش‌ها شامل نیروی مقاومت وارد بر شناور، زاویه تریم و بالآمدگی می‌باشند. مولفه‌های هیدرودینامیکی محاسبه شده در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مولفه‌های هیدرودینامیکی اندازه‌گیری شده در مطالعه آزمایشگاهی

سرعت (متر بر ثانیه)	عدد فرود عرضی	تریب (درجه)	بالآمدگی (میلی‌متر)	مقاومت (نیوتن)
۱/۱۴	۰/۶۶	۲/۵۲	-۲/۶۹	۴/۸۲۶
۲/۲۸	۱/۳۳	۴/۹	-۳/۲	۱۷/۸۵
۳/۴۲	۱/۹۹	۵/۱۷	۹/۸۷	۲۰/۸۴
۴/۵۶	۲/۶۶	۵/۸۳	۲۴/۶۴	۲۴/۹۱۷
۵/۷۱	۳/۳۳	۵/۲۸	۳۵/۳۸	۲۷/۸۶

همچنین فاصله دیواره کناری برای به حداقل رساندن تأثیر مرز جانبی بر روی شناور، ۲ برابر طول شناور تعیین شده است. با توجه به تقارن بدنه‌ی شناور و جریان سیال شبیه‌سازی به صورت متقارن انجام شده است. شرایط مرزی در نظر گرفته شده بری فضای محاسباتی مطابق جدول ۷ تعیین گردیده است.



شکل ۲- ابعاد و مرزهای فضای محاسباتی

جدول ۷- شرایط مرزی فضای محاسباتی

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

در این شبیه‌سازی گام زمانی مطابق با رابطه (۱) تعیین شده است [۲۲] که در آن V و l به ترتیب بیانگر سرعت و طول خیس شده‌ی شناور می‌باشند.

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

شبیه‌سازی حاضر در حالت ناپایا و به صورت سه بعدی و با در نظر گرفتن جریان دو فازی انجام شده است. همچنین اطمینان از عدم وابستگی نتایج به زمان بر اساس تغییر مولفه‌های هیدرودینامیکی در روند حل مشخص گردیده است [۲۳]. تنظیمات در نظر گرفته شده برای حل مسئله در جدول ۸ ارائه گردیده است.

جدول ۸ - تنظیمات حلگر در شبیه‌سازی عددی

مشخصات	تنظیمات تعیین شده
نوع حلگر	ناپایا
روش دوفازی	حجم سیال
روش کوپل سرعت و فشار	الگوریتم SIMPLE

۱	۳	۳	۹
۳	۱	۴	۱۰
۱	۲	۴	۱۱
۲	۳	۴	۱۲
۲	۱	۵	۱۳
۳	۲	۵	۱۴
۱	۳	۵	۱۵
۳	۱	۶	۱۶
۱	۲	۶	۱۷
۲	۳	۶	۱۸

۴- مطالعه عددی

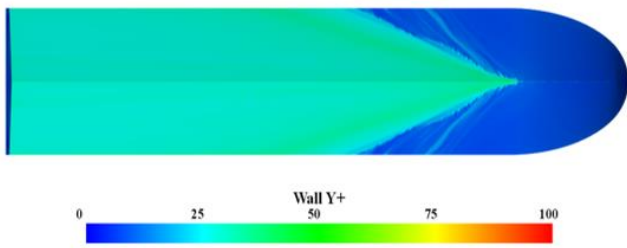
برای مدل‌سازی جریان آشفتگی از مدل آشفتگی $k-\omega$ SST استفاده شده است. این مدل در نواحی با عدد رینولدز پایین (نواحی نزدیک به دیواره) از مدل آشفتگی $k-\omega$ استفاده می‌نماید و در نواحی با عدد رینولدز بالا (نواحی دور از دیواره) از مدل $k-\epsilon$ استفاده می‌کند [۱۸]. به همین دلیل این مدل یکی از متداول‌ترین و دقیق‌ترین مدل‌های آشفتگی در شبیه‌سازی هیدرودینامیکی شناورهای تندرو به حساب می‌آید [۱۹]. با بهره‌گیری از معادلات مربوط به مدل آشفتگی $k-\omega$ SST [۲۰] ضرایب ثابت مدل آشفتگی مطابق جدول ۶ در نظر گرفته می‌شوند.

جدول ۶- ضرایب ثابت در معادلات مدل آشفتگی $k-\omega$ SST [۲۰]

Φ_2	Φ_1
$a_1 = 0.31$	$a_1 = 0.31$
$\sigma_{k1} = 0.85$	$\sigma_{k2} = 1$
$\sigma_{\omega 1} = 0.5$	$\sigma_{\omega 2} = 0.856$
$\beta_1 = 0.075$	$\beta_2 = 0.0828$
$\beta^* = 0.09$	$\beta^* = 0.09$
$k = 0.41$	$k = 0.41$
$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 1} k^2}{\sqrt{\beta^*}}$	$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2} k^2}{\sqrt{\beta^*}}$

۴-۱- دامنه محاسباتی، شرایط مرزی و تنظیمات حلگر

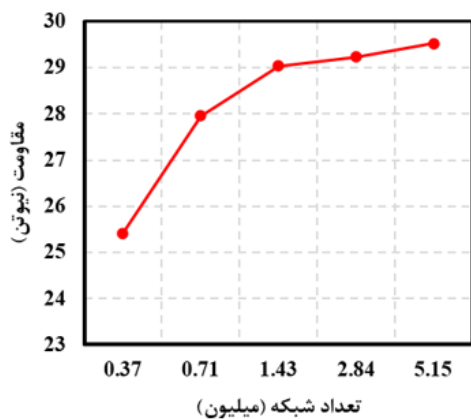
ابعاد فضای محاسباتی و سطوح در نظر گرفته شده در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی ابعاد فضای محاسباتی مطابق با حداقل معیارهای ITTC در نظر گرفته شده است [۲۱]. بر این اساس فاصله مرز ورودی تا سینه‌ی شناور ۲/۵ برابر طول شناور تعیین گردیده است و فاصله‌ی پاشنه شناور تا مرز خروجی به‌منظور جلوگیری از جریان بازگشتی و تعیین مشخصات و یک ایجاد شده در پشت شناور ۵ برابر طول در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی مرزهای بالا و پایین فضای محاسباتی ۳/۵ برابر طول شناور است.



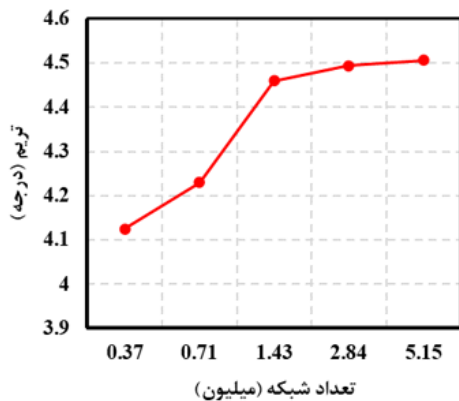
شکل ۴- مقادیر y^+ در نقاط مختلف کف شناور

۴-۳- بررسی حساسیت شبکه بندی

به منظور بررسی عدم وابستگی یا استقلال حل از تعداد شبکه، پنج حالت شبکه بندی در نظر گرفته شده است. در شکل ۵ نتایج مولفه های هیدرودینامیکی شامل مقاومت و تریم برای تعداد شبکه مختلف عدد فرود عرضی ۳/۳۳ نشان داده شده است. مشاهده می شود که از حالت سوم به بعد افزایش تعداد شبکه تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد و حل از تعداد شبکه بندی مستقل شده است؛ لذا برای داشتن دقت کافی در حل مسئله و کاهش زمان محاسبات حالت سوم به عنوان شبکه بندی پایه در نظر گرفته شده است.



(الف) تغییرات نیروی مقاومت در تعداد شبکه بندی مختلف



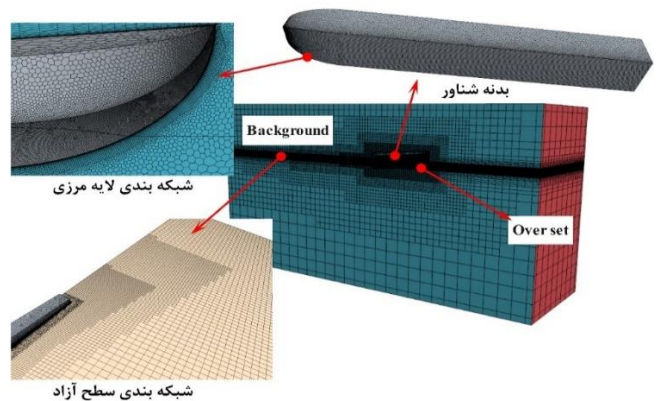
(ب) تغییرات زاویه ترییم شناور در تعداد شبکه بندی مختلف

شکل ۵ - تغییر مولفه های هیدرودینامیکی شناور در تعداد مختلف شبکه

روش گسسته سازی زمان	بالادست مرتبه اول
تعداد تکرار حل در هر گام زمانی	۵
روش درون یابی در ناحیه Overset	خطی (Linear)

۴-۲- شبکه بندی فضای محاسباتی

کیفیت و نوع شبکه بندی فضای محاسباتی از عوامل مهم در دقت نتایج شبیه سازی عددی است. کاریکا و همکاران [۲۴] و ماکرو و همکاران [۲۵] در تحقیقات خود نشان دادند که استفاده از شبکه بندی دینامیکی در شبیه سازی حرکات شناور تندرو دقت محاسبات را افزایش می دهد. بر این اساس در شبیه سازی حاضر از شبکه بندی دینامیکی استفاده شده است در این روش فضای محاسباتی به دو بخش Background و Overset تقسیم می شود. به منظور کاهش تعداد شبکه بندی و همچنین کاهش زمان محاسبات، ناحیه Overset با شبکه بندی شش ضلعی بی سازمان و ناحیه Background با استفاده از شبکه بندی Trimmed با سازمان شبکه بندی شده است [۲۶] [۲۷]. فضای محاسباتی با توجه به الگوی رفتار شناور و اهمیت قسمت های مختلف به ۱۲ بخش با تعداد شبکه بندی مختلف تقسیم شده است. در شکل ۳ شبکه بندی بخش های مختلف فضای محاسباتی نشان داده شده است.



شکل ۳- شبکه بندی بخش های مختلف فضای محاسباتی

بر اساس توصیه ITTC [۲۸] مقدار y^+ در جریان های آشفته باید بین ۳۰ تا ۳۰۰ باشد. در این پژوهش مقدار y^+ در سرعت های مختلف کمتر از ۱۰۰ است. در شکل ۴ کانتور y^+ در عدد فرود عرضی ۳/۳۳ برای شناور پایه ارائه شده است.

$$e_{exe}^{32} = \left| \frac{\varphi_{ext}^{23} - \varphi_3}{\varphi_{ext}^{23}} \right| \quad (8)$$

$$GCI_{fine}^{32} = \frac{1.25e_a^{32}}{r_{32}^{p_{avg}} - 1} \quad (9)$$

در روابط (۷)، (۸) و (۹) پارامترهای e_a^{32} ، e_{exe}^{32} و GCI به ترتیب بیانگر خطای نسبی تخمینی، خطای نسبی برون‌یابی و شاخص هگرایی شبکه‌بندی هستند. در جدول ۹ پارامترهای به دست آمده از روش مذکور برای هر کدام از متغیرهای مورد بررسی ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل، مقدار عدم قطعیت به دست آمده برای متغیرهای مورد بررسی ناچیز است و شبکه‌بندی انجام شده دقت قابل قبولی دارد.

جدول ۹- خطای گسسته سازی مولفه‌های هیدرودینامیکی بر مبنای روش GCI

ردیف	مشخصات	مقاومت	تریم	بالاآمدگی
۱	φ_1	۲/۹۸	۴/۴۹۴	۳۲/۹
۲	φ_2	۲/۹۸	۴/۴۶	۳۲/۶۶
۳	φ_3	۲/۸۵	۴/۱	۲۹/۸
۴	r_{21}	۱/۲۵۸	۱/۲۵۸	۱/۲۵۸
۵	r_{32}	۱/۲۶۱	۱/۲۶۱	۱/۲۶۱
۶	ε_{21}	-۰/۰۷	-۰/۰۳۴	۰/۹۱
۷	ε_{32}	-۰/۳۷	-۰/۱۶	-۴/۵۶
۸	φ_{21ext}	۳/۰۰۶	۴/۵۰۳	۳۱/۵۱۸
۹	e_{21a}	۲/۳۴۱	۰/۷۵۶	۲/۸۶۶
۱۰	e_{21ext}	۰/۵۵۹	۰/۲۰۹	۰/۷۳۳
۱۱	$GCI_{21medium}$	۰/۷۰۲	۰/۲۶۲	۰/۹۱

۴-۴- اعتبارسنجی مدل عددی

در شکل ۶ نتایج عددی و آزمایشگاهی مقدار مقاومت، تریم و بالاآمدگی در محدوده عدد فرود عرضی ۰/۶۶ تا ۳/۳۳ مقایسه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد میانگین خطای مقاومت محاسبه شده با استفاده از روش عددی در مقایسه با روش آزمایشگاهی کمتر از ۲/۵ درصد می‌باشد. همچنین تریم و بالاآمدگی شناور نیز با نتایج آزمایشگاهی همخوانی مناسبی داشته است. در نتیجه می‌توان گفت که شبیه‌سازی حاضر به خوبی می‌تواند مولفه‌های هیدرودینامیکی شناور را محاسبه کند و دقت و کارایی لازم جهت پیش‌بینی رفتار شناور را دارد.

در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی نتایج حلگر و کیفیت شبکه‌بندی از روش شاخص همگرایی شبکه یا GCI که توسط کلیک و همکاران [۲۹] ارائه گردیده، استفاده شده است. این روش بر مبنای برون‌یابی ریچارد داوسون [۳۰] عمل می‌کند و خطای گسسته سازی را تخمین می‌زند. در این شبیه‌سازی عدم قطعیت نتایج عددی با بکارگیری روش مذکور بر مبنای سه شبکه‌بندی مختلف با نرخ رشد یکسان محاسبه شده است. در این راستا در گام اول ابعاد شبکه‌بندی مطابق رابطه (۲) تعیین می‌گردد.

$$h_i = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n V_i \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، h_i بیانگر اندازه شبکه Δ و V بیانگر حجم سلول شبکه Δ و N نشان دهنده تعداد کل شبکه‌بندی می‌باشد. ابعاد شبکه‌بندی در هر مرحله باید در رابطه (۳) صدق کند.

$$\frac{h_i}{h_{i+1}} > 1.3 \quad (3)$$

همچنین مقدار متوسط ترتیب تغییرات و همچنین خطای نسبی مطابق روابط (۴) و (۵) تعیین می‌گردد.

$$p_{avg} = \frac{1}{\ln(r_{21})} |\ln|\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}| + q(p)| \quad (4)$$

در رابطه (۴)، p_{avg} بیانگر متوسط تغییرات شبکه‌بندی و همچنین در این رابطه $\varepsilon_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$ و $\varepsilon_{32} = \varphi_3 - \varphi_2$ متغیرهای کلیدی در حل مسئله می‌باشند که در شبیه‌سازی حاضر نیروی مقاومت، زاویه تریم و بالاآمدگی شناور در نظر گرفته شده‌اند.

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \quad (5)$$

در رابطه (۵)، $q(p)$ بیانگر خطای نسبی می‌باشد همچنین در این رابطه r_{21} و r_{32} بیانگر نرخ رشد شبکه‌بندی می‌باشند که برابر ۱/۴۱ تعیین شده‌اند. خطای نسبی برون‌یابی مطابق روابط (۶) تا (۹) تعیین شده است.

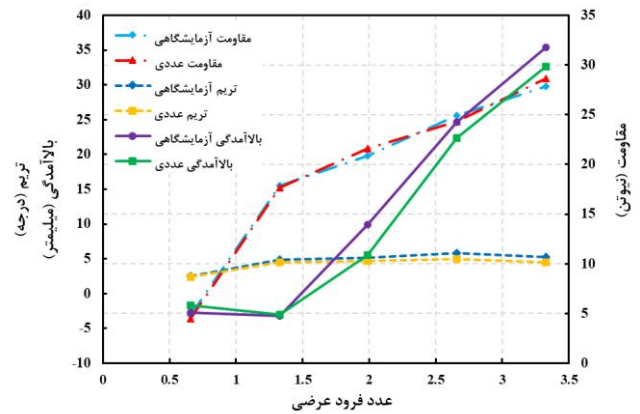
$$\varphi_{txt}^{32} = \frac{(r_{21}^{p_{avg}} \varphi_1 - \varphi_2)}{(r_{21}^p - 1)} \quad (6)$$

$$e_a^{32} = \left| \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{\varphi_2} \right| \quad (7)$$

بهینه مشخصه هندسی عرض اسپری ریل با افزایش عدد فرود کاهش یافته است در نتیجه مقدار عرض اسپری ریل با افزایش عدد فرود رابطه عکس دارد. در شکل ۷ (ج) و (د) مشاهده می‌شود که مشخصه‌های زاویه زیرین و تعداد و عرض اسپری ریل‌ها به ترتیب در بیشترین تأثیر را بر میزان تریم و بالآمدگی شناور داشته است که عامل آن، تأثیر بیشتر مشخصه‌های ذکر شده بر میزان نیروی برا ایجاد شده در ناحیه اسپری آب می‌باشد.

جدول ۱۰- نتایج طرح آزمایش تاگوچی برای شناور مجهز به اسپری ریل‌های در راستای چاین

شماره آزمایش	عدد فرود عرضی	مقاومت کل (نیوتن)	تریم (درجه)	بالآمدگی (میلی‌متر)
۱	۱/۹۹	۲۱/۱۲۱	۴/۷۱۵	۰/۹۱۹
	۳/۳۳	۲۸/۲۱۴	۴/۴۶۵	۲۳/۵۸۹
۲	۱/۹۹	۲۱/۱۲۸	۴/۷۸۳	۱/۶۰۲
	۳/۳۳	۲۸/۲۲۲	۴/۴۳۵	۲۴/۳۵۶
۳	۱/۹۹	۲۱/۳۳۶	۴/۸۵۸	۳/۰۵
	۳/۳۳	۲۸/۳۰۱	۴/۴۷۷	۲۳/۵۳۱
۴	۱/۹۹	۲۰/۹۸۸	۴/۷۸۱	۱/۹۲۳
	۳/۳۳	۲۷/۷۸۴	۴/۴۳۲	۲۴/۲۶۳
۵	۱/۹۹	۲۰/۹۹۴	۴/۷۸۹	۱/۳۳۴
	۳/۳۳	۲۷/۸۰۴	۴/۴۲۵	۲۴/۲۸
۶	۱/۹۹	۲۱/۱۹۶	۴/۸۴۷	۲/۵۲۵
	۳/۳۳	۲۸/۲۷	۴/۵۳۸	۲۵/۳۰۸
۷	۱/۹۹	۲۱/۱۵	۴/۷۶۲	۰/۸۶۷
	۳/۳۳	۲۷/۴۳۲	۴/۴۶۵	۲۳/۸۸۵
۸	۱/۹۹	۲۰/۸۶۲	۴/۷۸۴	۱/۵۹۷
	۳/۳۳	۲۷/۵۴۲	۴/۵۵۹	۲۴/۹۹
۹	۱/۹۹	۲۱/۰۷۹	۴/۷۲۳	۱/۳۶۷
	۳/۳۳	۲۸/۶۳۶	۴/۴۴۴	۲۳/۸۷۸
۱۰	۱/۹۹	۲۱/۱۵۶	۴/۷۶۵	۱/۱۳۷
	۳/۳۳	۲۶/۹۳۸	۴/۴۹۹	۲۳/۹۴۲
۱۱	۱/۹۹	۲۱/۳۳۴	۴/۷۱۷	۱/۲۲۵
	۳/۳۳	۲۸/۳۴۶	۴/۴۸۲	۲۳/۶۵
۱۲	۱/۹۹	۲۰/۹۶۳	۴/۷۵	۱/۹۶۶
	۳/۳۳	۲۷/۷۴۳	۴/۴۴۱	۲۴/۱
۱۳	۱/۹۹	۲۱/۳۰۷	۴/۷۲۶	۱/۴۶۳
	۳/۳۳	۲۷/۷۰۸	۴/۴۶	۲۳/۶۶۲
۱۴	۱/۹۹	۲۱/۲۴۸	۴/۷۷۴	۲۱/۸۶۹
	۳/۳۳	۲۷/۲۹	۴/۵۰۳	۲۴/۳۶۹
۱۵	۱/۹۹	۲۱/۳۷	۴/۷۱۶	۱/۳۷۶
	۳/۳۳	۲۸/۷۱۵	۴/۴۸	۲۳/۶۹۷
۱۶	۱/۹۹	۲۱/۵۴۹	۴/۷۱۹	۱/۴۶۲
	۳/۳۳	۲۷/۳۳۹	۴/۴۶	۲۳/۷۰۷
۱۷	۱/۹۹	۲۱/۶۹	۴/۷۱۴	۱/۲۰۶
	۳/۳۳	۲۸/۳۲۱	۴/۴۷۴	۲۳/۵۵۹



شکل ۶- مقایسه نتایج نیروی مقاومت، زاویه تریم و بالآمدگی حاصل از روش عددی و آزمایشگاهی

تأثیر مشخصه‌های هندسی اسپری ریل بر مولفه‌های هیدرودینامیکی شناور با استفاده از تحلیل سیگنال به نوبت در این مقاله سنجیده شد که نسبت استاندارد آن شامل سه نوع هرچه کمتر - بهتر، هرچه به مقدار اسمی نزدیک‌تر - بهتر و هرچه بزرگ‌تر - بهتر می‌باشد [۳۱]. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی بر مبنای نسبت استاندارد هر چه "کوچکتر-بهتر" مورد تحلیل قرار گرفته‌اند که در این حالت هر چه نرخ سیگنال به نویز خروجی‌ها بیشتر باشد مولفه‌های هیدرودینامیکی مورد بررسی مقدار کمتری دارند. در ادامه نتایج حاصل از تحلیل نرخ سیگنال به نویز برای دو حالت قرار گیری اسپری ریل‌ها تحلیل و بررسی شده است.

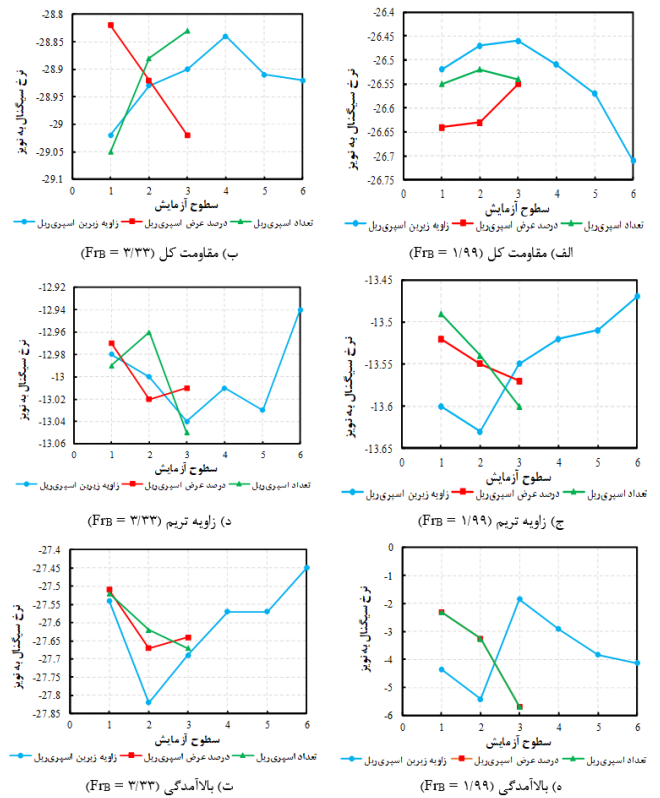
۱-۵- اسپری ریل‌های در راستای چاین

در این قسمت نتایج عددی حاصل از طرح آزمایش تاگوچی برای اسپری ریل‌های در راستای چاین که در جدول ۱۰ ارائه گردیده است با استفاده از روش سیگنال به نویز مورد تحلیل قرار گرفته است. بر این اساس تأثیر مشخصه‌های هندسی اسپری ریل شامل زاویه زیرین، عرض و تعداد اسپری ریل‌ها بر مولفه‌های هیدرودینامیکی شناور بررسی شده است. در شکل ۷ نتایج تحلیل تاگوچی برای مولفه‌های هیدرودینامیکی مقاومت کل، زاویه تریم و بالآمدگی شناور ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که زاویه زیرین اسپری ریل و تعداد اسپری ریل‌ها به ترتیب در عدد فرود عرضی ۱/۹۹ و ۳/۳۳ بیشترین تأثیر را بر میزان مقاومت شناور داشته است (شکل ۷ (الف) و (ب)). زوایای زیرین صفر و ۴ درجه و همچنین تعداد ۴ و ۶ اسپری ریل به ترتیب در اعداد فرود ذکر شده عملکرد بهتری در میزان کاهش مقاومت شناور داشته‌اند. در نتیجه دو مشخصه هندسی زاویه زیرین و تعداد اسپری‌ها (در محدوده مورد بررسی در پژوهش حاضر) با افزایش عدد فرود شناور رابطه مستقیم دارند به طوری که در حالت حرکتی پروازی زاویه زیرین مثبت با بیشترین تعداد اسپری ریل کاهش بیشتری در میزان مقاومت شناور ایجاد نموده است. مقدار

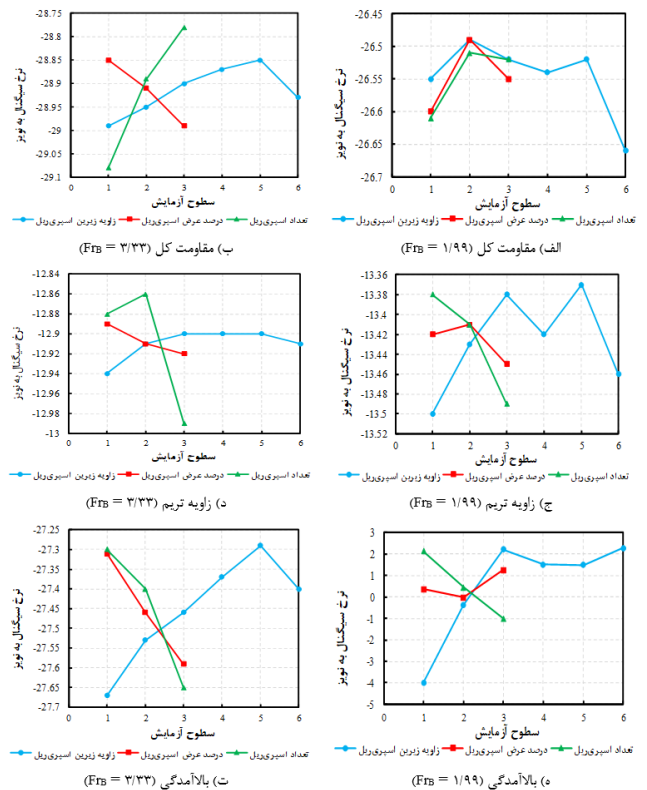
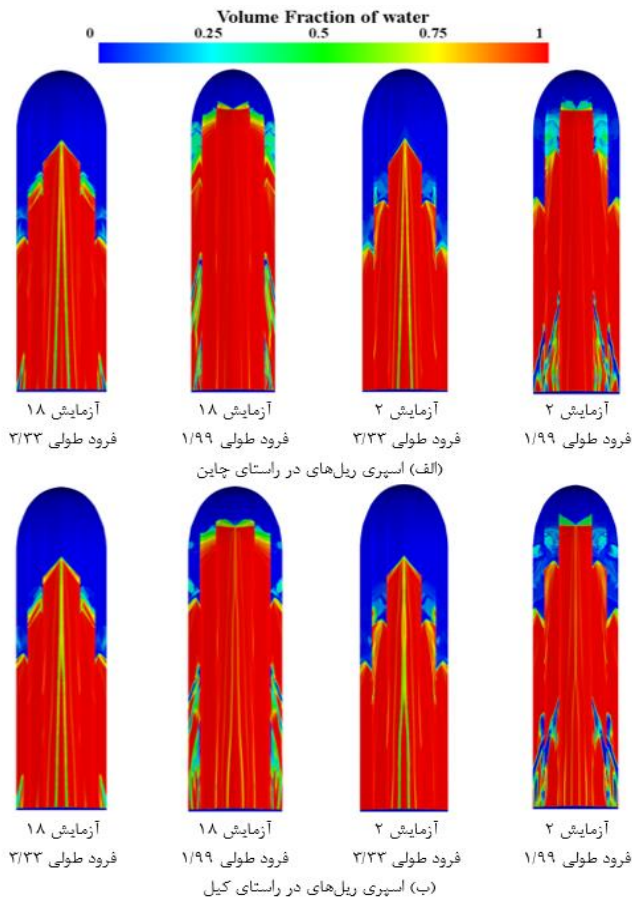
جدول ۱۱ - نتایج طرح آزمایش تاگوجی برای شناور مجهز به اسپری ریل‌های در موازی کیل

شماره آزمایش	عدد فرود عرضی	مقاومت کل (نیوتن)	تربیم (درجه)	بالا آمدگی (میلی‌متر)
۱	۱/۹۹	۲۱/۴۰۸	۴/۷۱۶	۱/۴۴۱
	۳/۳۳	۲۸/۲۷۳	۴/۳۹۶	۲۳/۴۸۶
۲	۱/۹۹	۲۰/۹۵۵	۴/۶۷۵	۱/۴۴۷
	۳/۳۳	۲۸/۱۷۸	۴/۳۸۸	۲۳/۷۴۴
۳	۱/۹۹	۲۱/۴۱	۴/۸۰۳	۱/۸۹۷
	۳/۳۳	۲۸/۰۴۸	۴/۵۲۴	۲۵/۳۱۹
۴	۱/۹۹	۲۱/۳۲۲	۴/۶۴۲	۰/۷۲۲
	۳/۳۳	۲۸/۲۶۶	۴/۴۱۸	۲۲/۹۳۸
۵	۱/۹۹	۲۰/۹۶۵	۴/۷۱۱	۱/۲۶۶
	۳/۳۳	۲۷/۹۸۴	۴/۳۸۵	۲۳/۵۶۲
۶	۱/۹۹	۲۱/۰۳۹	۴/۷۳۲	۱/۲۳۷
	۳/۳۳	۲۷/۷۸۳	۴/۴۶۴	۲۴/۹۲۵
۷	۱/۹۹	۲۱/۴۳۵	۴/۶۶۶	۰/۸۹۱
	۳/۳۳	۲۷/۳۹۱	۴/۴۰۷	۲۳/۲۲۷
۸	۱/۹۹	۲۰/۷۲۷	۴/۶۷۹	۰/۸۰۶
	۳/۳۳	۲۷/۴۳۸	۴/۴۶۲	۲۴/۳۳۶
۹	۱/۹۹	۲۱/۴۰۳	۴/۶۶۱	۰/۶۴۷
	۳/۳۳	۲۸/۷۲۹	۴/۳۷۶	۲۳/۲۴
۱۰	۱/۹۹	۲۱/۱۷۹	۴/۶۹۲	۰/۷۱۵
	۳/۳۳	۲۶/۹۱۱	۴/۴۴۱	۲۳/۳۵۵
۱۱	۱/۹۹	۲۱/۳۱۳	۴/۶۴۷	۰/۸۶۸
	۳/۳۳	۲۸/۳۶۸	۴/۴۱۸	۲۲/۹۹۸
۱۲	۱/۹۹	۲۱/۲۰۴	۴/۷۲۷	۰/۹۵۶
	۳/۳۳	۲۷/۹۴۳	۴/۳۸۵	۲۳/۷
۱۳	۱/۹۹	۲۱/۱۹۱	۴/۶۵	۰/۹۲۱
	۳/۳۳	۲۷/۶۷۵	۴/۳۹۲	۲۲/۸۶۵
۱۴	۱/۹۹	۲۱/۱	۴/۶۸۹	۱/۱۴۷
	۳/۳۳	۲۶/۹۳۸	۴/۴۴۹	۲۳/۵۹۷
۱۵	۱/۹۹	۲۱/۲۸۴	۴/۶۴۱	۰/۵۶۶
	۳/۳۳	۲۸/۵۵۱	۴/۴۰۸	۲۲/۹۸۸
۱۶	۱/۹۹	۲۱/۶۸۸	۴/۷۶۳	۱/۲۸۱
	۳/۳۳	۲۷/۶۴۲	۴/۴۲	۲۳/۳۰۲
۱۷	۱/۹۹	۲۱/۶۲۴	۴/۷۰۴	۰/۶۹۳
	۳/۳۳	۲۸/۴۴۶	۴/۴۲۹	۲۳/۳۸۲
۱۸	۱/۹۹	۲۱/۲۷۴	۴/۶۶۵	۰/۵۱۱
	۳/۳۳	۲۷/۷۸۷	۴/۴۱۴	۲۳/۶۲۶

۱/۷۸	۴/۷۲۱	۲۱/۶۲۵	۱/۹۹	۱۸
۲۴/۰۴۷	۴/۴۳۸	۲۷/۹۲۳	۳/۳۳	



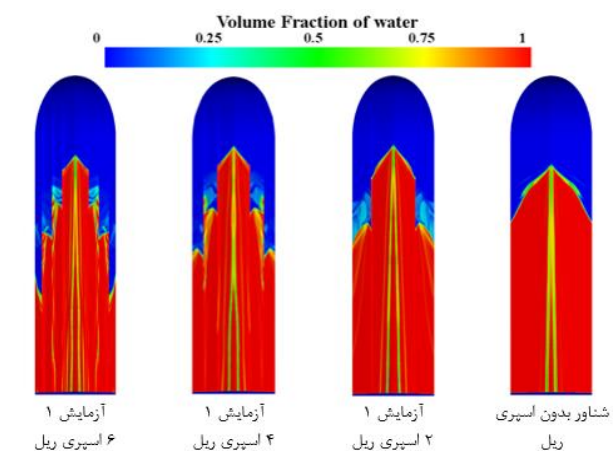
در شکل ۸ نتایج مربوط به طرح آزمایش تاگوجی برای اسپری ریل‌های موازی با کیل نشان داده شده است. در این تحلیل تأثیر مشخصه‌های زاویه زیرین، تعداد و عرض اسپری ریل‌ها بر مولفه‌های هیدرودینامیکی بررسی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که زاویه زیرین و تعداد اسپری ریل‌ها به ترتیب موثرترین مشخصه اسپری ریل بر میزان مقاومت در اعداد فرود عرضی ۱/۹۹ و ۳/۳۳ است (شکل ۸ الف) و (ب)) که در این حالت بهینه‌ترین مشخصه‌های زاویه زیرین و تعداد اسپری ریل‌ها به منظور کاهش مقاومت به ترتیب برابر ۴- و ۶ در اعداد فرود عرضی مذکور می‌باشد. میزان عرض اسپری ریل به نسبت دو مشخصه دیگر تأثیر کمتری بر میزان مقاومت شناور دارد به طوری که در حالت حرکتی پروازی کاهش عرض اسپری ریل موجب کاهش مقاومت گردیده است. مشخصه‌های زاویه زیرین، تعداد و عرض اسپری ریل به ترتیب موثرترین عوامل در میزان تربیم و بالا آمدگی شناور بوده است که در این حالت مقدار تربیم و بالا آمدگی با میزان زاویه زیرین اسپری ریل رابطه مستقیم و با عرض و تعداد اسپری ریل‌ها رابطه عکس دارد.



شکل ۸- تحلیل نتایج حاصل از روش ناگوچی برای اسپری ریل‌های موازی کیل

شکل ۹ - سطح خیس کف شناور در اعداد فرود عرضی ۱/۹۹ و ۳/۳۳ برای آزمایش ۲ و ۱۸

همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد اسپری ریل‌ها موجب کاهش سطح خیس ناشی از اسپری آب در ناحیه سینه شناور شده است. بر این اساس افزایش تعداد اسپری ریل‌ها از ۲ به ۶ موجب کاهش سطح خیس و در نتیجه کاهش مقاومت شناور گردیده است به طوری که مقاومت در سه آزمایش مذکور نسبت به شناور پایه به ترتیب ۱/۳۳، ۱/۶۵ و ۲/۳ درصد کاهش یافته است.



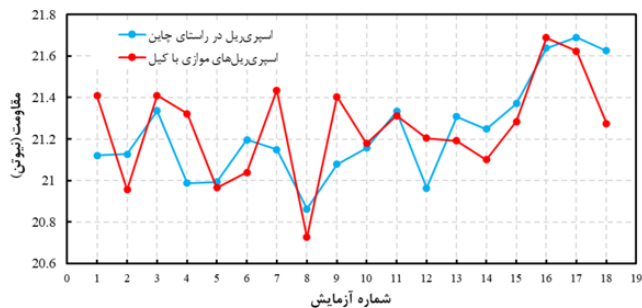
شکل ۱۰- سطح خیس کف شناور مجهز به اسپری ریل‌های در راستای کیل در عدد فرود عرضی ۳/۳۳

۳-۵- سطح خیس شده شناور

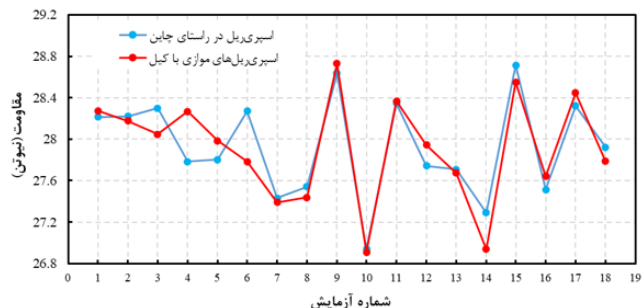
با توجه به چگالی و لزجت بالای سیال آب نسبت به هوا، سطح در معرض سیال آب یکی از عوامل مهم در میزان مقاومت وارد بر شناور به حساب می‌آید. در شکل ۹ سطح خیس کف شناور در آزمایش ۲ و ۱۸ در دو حالت قرارگیری اسپری ریل نشان داده شده است. در آزمایش‌های مذکور زاویه زیرین اسپری ریل به ترتیب بیشترین (۱۲) و کمترین (۸-) مقدار می‌باشد البته در آزمایش ۲ عرض اسپری ریل کمتر از آزمایش ۱۸ و تعداد اسپری ریل‌ها برابر ۲ است. مقایسه دو حالت ذکر شده نشان می‌دهد که در عدد فرود ۱/۹۹ و ۳/۳۳ کاهش زاویه زیرین موجب افزایش سطح خیس و در نهایت افزایش مقاومت شناور گردیده است. همچنین اسپری ریل‌های موازی با کیل نسبت به اسپری ریل‌های موازی با چپین تأثیر بیشتری بر کاهش سطح خیس شناور داشته‌اند. در شکل ۱۰ سطح خیس کف شناور پایه و شناور مجهز به اسپری ریل در آزمایش اول تا سوم نشان داده شده است. سطح خیس ارائه شده برای اسپری ریل موازی با کیل در عدد فرود عرضی ۳/۳۳ می‌باشد. در سه آزمایش مذکور تعداد اسپری ریل‌ها به ترتیب برابر ۲، ۴ و ۶ و همچنین عرض اسپری ریل برابر ۲، ۳ و ۴ درصد عرض شناور در هر مقطع می‌باشد. مشاهده می‌شود که در هر سه آزمایش اضافه نمودن اسپری ریل به بدنه شناور موجب کاهش سطح خیس کف شناور گردیده است.

۴-۵ - توزیع فشار

در شکل ۱۱ فشار وارد بر کف شناور در آزمایش ۱ و ۱۸ برای اسپری ریل‌های موازی با کیل در عدد فرود عرضی ۱/۹۹ و ۳/۳۳ نشان داده شده است و با شناور پایه مورد مقایسه قرار گرفته است. مولفه‌های هندسی زاویه زیرین اسپری ریل، تعداد اسپری ریل‌ها و همچنین درصد عرض اسپری ریل به عرض مقطع شناور در آزمایش ۱ به ترتیب برابر ۸-، ۲ و ۲ و در آزمایش ۱۸ برابر ۱۲، ۴ و ۴ است بر این اساس کلیه مشخصه‌های هندسی مورد بررسی در آزمایش ۱۸ نسبت به آزمایش ۱ افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مشخصه‌های اسپری ریل باعث تغییر در توزیع فشار ایجاد شده در ناحیه سینه شناور شده است. همچنین از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که اضافه نمودن اسپری ریل با تغییر توزیع فشار در سینه شناور و ایجاد ناحیه فشار منفی در پشت اسپری ریل در مجموع موجب کاهش فشار در ناحیه سینه شناور گردیده است در نتیجه می‌توان گفت که اضافه نمودن اسپری ریل باعث کاهش فشار در خط سکون (محل برخورد آب به بدنه شناور) می‌گردد که این عمل موجب کاهش اختلاف فشار در سینه و پاشنه شناور می‌شود و مقاومت فشاری شناور نیز کاهش می‌یابد. همچنین کاهش فشار در خط سکون باعث کاهش میزان تریب و بالآمدگی شناور می‌گردد و احتمال وقوع ناپایداری طولی در شناور کاهش می‌یابد.

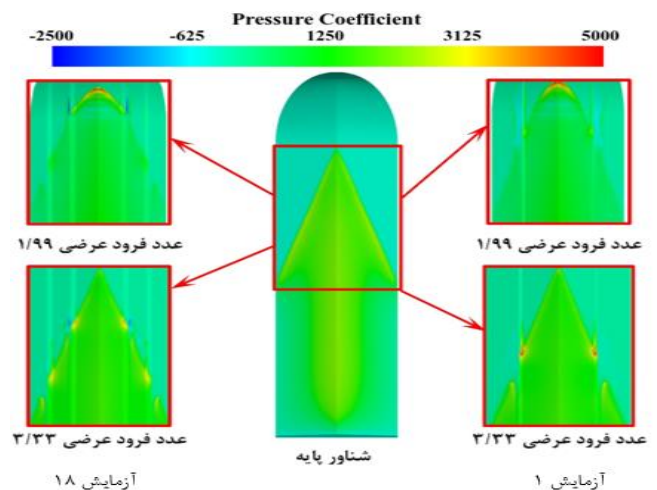


الف) مقاومت شناور مجهز به اسپری ریل در عدد فرود عرضی ۱/۹۹



ب) مقاومت شناور مجهز به اسپری ریل در عدد فرود عرضی ۳/۳۳

شکل ۱۲ - نتایج مقاومت شناور مجهز به اسپری ریل در آزمایش‌های مختلف



شکل ۱۱ - مقایسه کانتور ضریب فشار وارد بر کف شناور در آزمایش ۱ و ۱۸ با شناور پایه

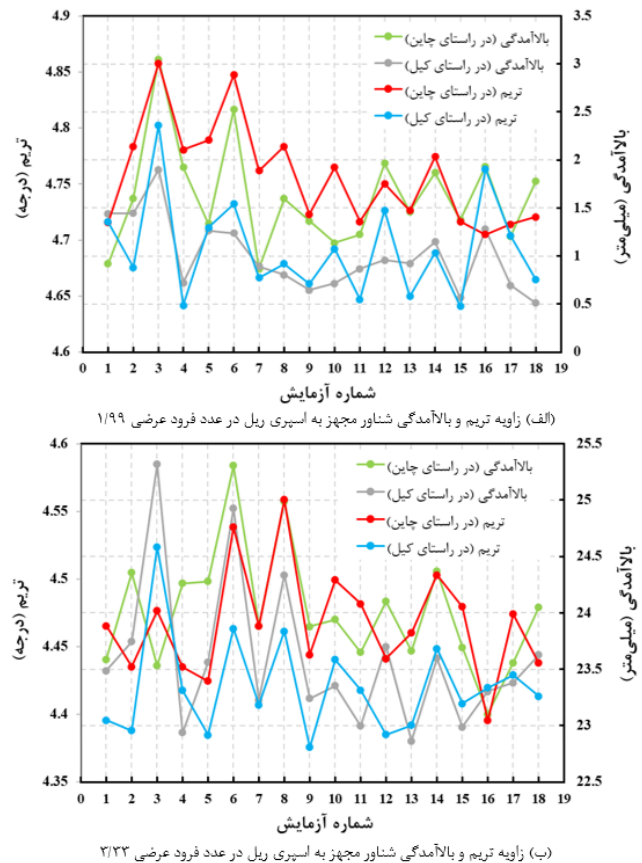
۵-۵ - مقایسه دو حالت قرارگیری اسپری ریل‌ها

در شکل ۱۲ تغییر مقاومت شناور در آزمایش‌های مورد بررسی برای دو حالت اسپری ریل‌های در راستای چاین و موازی با کیل نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که کمترین مقدار مقاومت در هر دو عدد فرود عرضی ۱/۹۹ و ۳/۳۳ مربوط به شناور مجهز به اسپری

- اضافه نمودن اسپری ریل به کف شناور باعث کاهش فشار در خط سکون شده است که این عمل موجب کاهش اختلاف فشار در سینه و پاشنه شناور گردیده و مقاومت فشاری شناور کاهش یافته است. همچنین کاهش فشار در خط سکون باعث کاهش میزان تریم و بالآمدگی شناور شده است و احتمال وقوع ناپایداری طولی در شناور کاهش یافته است.
- اسپری ریل‌های موازی با کیل به نسبت اسپری ریل‌های در راستای چاین نقش مؤثرتری در کاهش مقاومت شناور داشته‌اند. همچنین مقدار تریم و بالآمدگی شناور برای اسپری ریل‌های موازی با کیل در مقایسه با اسپری ریل‌های موازی با چاین کمتر بوده است که این امر موجب کاهش احتمال ناپایداری طولی در شناور می‌گردد.
- قرارگیری اسپری ریل‌ها موازی با کیل تأثیر بیشتری بر کاهش سطح خیس شناور نسبت به اسپری ریل‌های قرار گرفته در راستای چاین داشته است.

۷- مراجع

- [1] D. Savitsky, "Hydrodynamic Design of Planing Hulls," *Mar. Technol. SNAME News*, vol. 1, no. 04, pp. 71-95, 1964, doi: 10.5957/mt1.1964.1.4.71.
- [2] O. M. Faltinsen, *Hydrodynamics of high-speed marine vehicles*, vol. 9780521845. Cambridge university press, 2006. doi: 10.1017/CBO9780511546068.
- [3] D. Savitsky, M. F. DeLorme, and R. Datla, "Inclusion of whisker spray drag in performance prediction method for high-speed planing hulls," *Mar. Technol. SNAME News*, vol. 44, no. 1, pp. 35-56, 2007, doi: 10.5957/mt1.2007.44.1.35.
- [4] L. Larsson and E. Baba, "Ship resistance and flow computations," *Adv. Fluid Mech.*, vol. 5, pp. 1-75, 1996.
- [5] D. Savitsky and M. Morabito, "Origin and characteristics of the spray patterns generated by planing hulls," *Trans. - Soc. Nav. Archit. Mar. Eng.*, vol. 120, no. 02, pp. 306-326, 2013, doi: 10.5957/jspd.2011.27.2.63.
- [6] E. P. Clement, "Reduction of Planing Boat Resistance by Deflection of the Whisker Spray," 1964. [Online]. Available: <https://dome.mit.edu/handle/1721.3/49020?show=full>
- [7] L. Olin, M. Altimira, J. Danielsson, and A. Rosén, "Numerical modelling of spray sheet deflection on planing hulls," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.*, vol. 231, no. 4, pp. 811-817, 2017, doi: 10.1177/1475090216682838.
- [8] J. Seo et al., "Model tests on resistance and seakeeping performance of wave-piercing high-speed vessel with spray rails," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 8, no. 5, pp. 442-455, 2016, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2016.05.010.
- [9] M. Lakatoš, K. Tabri, A. Dashtimanesh, and H.



شکل ۱۳- نتایج تریم و بالآمدگی شناور مجهز به اسپری ریل در آزمایش‌های مختلف

۶- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر نقش مشخصه‌های هندسی اسپری ریل بر مولفه‌های هیدرودینامیکی مقاومت، تریم و بالآمدگی شناور مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصه‌های هندسی مورد بررسی شامل زاویه زیرین، عرض و تعداد اسپری ریل‌ها می‌باشند که در دو حالت کلی موازی با کیل و در راستای چاین در کف شناور قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده عبارت‌اند از:

- مشخصه‌های هندسی زاویه زیرین، تعداد و عرض اسپری ریل‌ها به ترتیب مؤثرترین مشخصه‌های هندسی اسپری ریل بر میزان مولفه‌های هیدرودینامیکی و مقاومت شناور بوده است.
- دو مشخصه هندسی زاویه زیرین و تعداد اسپری‌ها با افزایش عدد فرود شناور رابطه مستقیم دارند به طوری که در حالت حرکتی پروازی زاویه زیرین مثبت با بیشترین تعداد اسپری ریل کاهش بیشتری در میزان مقاومت شناور ایجاد نموده است همچنین مقدار بهینه مشخصه هندسی عرض اسپری ریل با افزایش عدد فرود کاهش یافته است در نتیجه مقدار عرض اسپری ریل با افزایش عدد فرود رابطه عکس دارد.

- combination,” *J. Ocean Eng. Mar. Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 421–438, 2021, doi: 10.1007/s40722-021-00211-0.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [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] 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.
- [28] “ITTC. Practical guidelines for ship CFD applications (75-03-02-03)p 1–20Revision-01. 2014.”
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] D. Diakoulaki, G. Mavrotas, and L. Papayannakis, “Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 22, no. 7, pp. 763–770, 1995, doi: 10.1016/0305-0548(94)00059-H.
- Andreasson, “Numerical Modelling of a Planing Craft with a V-Shaped Spray Interceptor Arrangement in Calm Water,” in *Progress in Marine Science and Technology*, IOS Press, 2020, pp. 33–42. doi: 10.3233/PMST200024.
- [10] B. Molchanov, S. Lundmark, M. Fürth, and M. Green, “Experimental validation of spray deflectors for high speed craft,” *Ocean Eng.*, vol. 191, no. October, p. 106482, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106482.
- [11] L. Castaldi, F. Osmak, M. Green, M. Fürth, and J. Bonoli, “The effect of spray deflection on the performance of high speed craft in calm water,” *Ocean Eng.*, vol. 229, p. 108892, 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108892.
- [12] Samuel, A. Trimulyono, P. Manik, and D. Chrismianto, “A numerical study of spray strips analysis on fridsma hull form,” *Fluids*, vol. 6, no. 11, p. 420, 2021, doi: 10.3390/fluids6110420.
- [13] M. Lakatoš, T. Sahk, H. Andreasson, and K. Tabri, “The effect of spray rails, chine strips and V-shaped spray interceptors on the performance of low planing high-speed craft in calm water,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 122, p. 103131, 2022, doi: 10.1016/j.apor.2022.103131.
- [14] “<https://ittc.info/members/member-organisations/national-iranian-marine-laboratory-nimala/>.”
- [15] “Propulsion Committee. Final report and recommendations to the 23rd ITTC, Proceeding of Twenty-third ITTC,. (2002).”
- [16] N. Celik, G. Pusat, and E. Turgut, “Application of Taguchi method and grey relational analysis on a turbulated heat exchanger,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 124, pp. 85–97, 2018, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.10.007.
- [17] A. F. Kaya and A. Acir, “Enhancing the aerodynamic performance of a Savonius wind turbine using Taguchi optimization method,” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 44, no. 2, pp. 5610–5626, 2022, doi: 10.1080/15567036.2022.2088898.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] ITTC, “Practical guidelines for ship CFD applications (7.5-03-02-03). p. 1–20,” 2014.
- [22] “ITTC, Practical guidelines for ship CFD applications, in (7.5-03-02-03). Revision-01. 2011”.
- [23] J. Suneela, P. Krishnankutty, and V. A. Subramanian, “Hydrodynamic performance of planing craft with interceptor-flap hybrid