

بررسی تاثیر نحوه قرارگیری اسپری ریل ها بر روی رفتار

هیدرودینامیکی یک شناور تندرو

ابوذر حاجی زاده^۱، مفید گرجی^۲، امین نجفی^۳

۱- عضو هیات علمی دانشگاه دریایی امام خمینه‌ای (مدظله‌العالی)، دانشکده شناوری، گروه مکانیک دریایی، ab.hajizadeh@chmail.ir

۲- عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه تبدیل انرژی، gorji@nit.ac.ir

۳- عضو هیات علمی دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام) تهران، دانشکده مهندسی مکانیک، najafi.sharif@yahoo.com

چکیده:

اسپری ریل به عنوان یک المان اضافه شده به بدنه شناورهای تندرو، در صورت طراحی و نصب صحیح، می تواند در بهبود رفتار هیدرودینامیکی شناورهای تندرو نقش مهمی را ایفا کند. در کار حاضر با استفاده از مدل سازی های عددی برای شرایط مختلف نصب، با بررسی تاثیر برخی از مشخصه های هندسی این المان بر روی پارامترها و رفتار هیدرودینامیکی یک شناور خاص و مقایسه آنها، نحوه بهینه قرارگیری اسپری ریل در یک شناور تندرو از نظر موازی بودن با کیل و یا در راستای چاین بودن مورد توجه قرار گرفته است. مشخصه های هندسی اسپری ریل نظیر شکل مقطع آن، طول، محل نصب، فاصله اسپری ریل ها از یکدیگر و تعداد آنها، بر عملکرد اسپری ریل مؤثر می باشد. در این کار پارامترهای مقاومت، تریم و بالآمدگی یک شناور تندرو با دو زاویه خیزکف ۲۰ و ۲۵ درجه و در دو حالت نیمه جابجایی و پروازی (اعداد فرود ۱/۹۹ و ۳/۳۳) مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که قرارگیری اسپری ریل در حالت موازی با کیل در مقایسه با قرارگیری آن در راستای چاین، اثرات بهتری بر روی رفتار هیدرودینامیکی شناورهای تندرو دارد.

واژه های کلیدی:

شناور تندرو، اسپری ریل، کیل، چاین، مقاومت، رفتار هیدرودینامیکی

Investigating the effect of spray rail placement on the hydrodynamic behavior of a high-speed craft

Abouzar Hajizadeh¹, Mostafa Gorji², Amin Najafi³

Scientific Member, Maritime University of Imam Khomeini, Faculty of Maritime Technology, Marine Mechanics Group, ab.hajizadeh@chmail.ir

Scientific Member, Babol Noshirvani Industrial University, Faculty of Mechanical Engineering, Energy Conversion Group, gorji@nit.ac.ir

Scientific Member, Imam Hussein (AS) University, Tehran, Faculty of Mechanical Engineering, najafi.sharif@yahoo.com

Abstract:

Spray rail, as an element added to the hull of high-speed crafts, can play a crucial role in improving the hydrodynamic behavior of these vessels if designed and installed correctly. In the present work, by using numerical modeling for different installation conditions, by examining the effect of some geometric characteristics of this element on the parameters and hydrodynamic behavior of a specific vessel and comparing them, the optimal way to place the spray rail in a high-speed craft in terms of being parallel to the keel or in line with the chine has been considered. The geometric characteristics of the spray rail, such as its cross-sectional shape, length, installation location, distance between the spray rails, and number, significantly impact the performance of the spray rail. In this work, the resistance, trim and heave parameters of a high-speed craft with two deadrise angles of 20 and 25 degrees and in two states of semi-displacement and planing (Froude numbers 1.99 and 3.33) have been studied. The results show that placing the spray rail parallel to the keel has better effects on the hydrodynamic behavior of high-speed crafts compared to placing it along the chine.

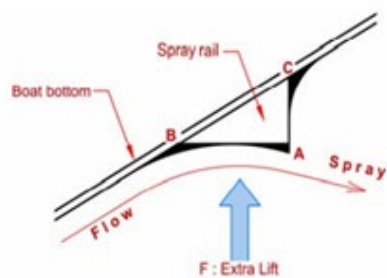
Keywords:

High-speed craft, Spray rail, Keel, Chine, Resistance, Hydrodynamic behavior.

۱- مقدمه

سطح خیس کف شناور به دو بخش کلی سطح خیس در معرض فشار و سطح خیس ناشی از اسپری آب تقسیم می‌شود. سطح خیس ناشی از اسپری آب، با افزایش سطح کل خیس شده شناور، مقاومت^۲ شناور را افزایش می‌دهد. مقاومت ناشی از سطح خیس اسپری را مقاومت اسپری می‌گویند. مقاومت اسپری ۱۵ تا ۲۰ درصد مقاومت کل شناور را شامل می‌شود [1]. بر این مبنا کاهش سطح خیس ناشی از اسپری آب می‌تواند مقدار مقاومت شناور را کاهش دهد. یکی از روش‌های کارآمد و مؤثر در کاهش سطح خیس ناشی از اسپری آب، استفاده از زائده‌ای به نام اسپری ریل است. اسپری ریل‌ها نوارها یا المان‌هایی هستند که در راستای طولی شناور گسترده می‌شوند. انتظار می‌رود این ریل‌ها جریان آب را به دور از بدنه هدایت کنند و موجب کاهش سطح خیس شناور و در نتیجه کاهش مقاومت اصطکاکی شناور شوند. همچنین انتظار می‌رود نصب اسپری ریل‌ها در کف شناور موجب افزایش نیروی لیفت هیدرودینامیکی وارد بر شناور و کاهش غلتش طولی^۳ و بهبود پایداری عرضی شناور گردد. نیروی درگ کل یک شناور تندرو، عبارت است از نیروهای ویسکوز و موج ایجادشده اطراف شناور و نیروی ناشی از هوا که در خلاف جهت حرکت شناور، با سرعتی ثابت و در یک خط مستقیم در آب راکد بر آن وارد می‌شود. مقاومت اصطکاکی بزرگترین مؤلفه از مقاومت کل یا همان نیروی درگ شناور است. ترکیب شرایط محیطی دریا و شکل بدنه کشتی‌ها باعث تغییر مقادیر مقاومت اصطکاکی باعث کاهش سرعت شناور در آب می‌شود. یکی از روش‌های جبران کاهش ناخواسته سرعت شناور، افزایش نیروی موتور و در نتیجه افزایش مصرف سوخت آن است. استفاده از این روش علاوه بر تحمیل هزینه‌های ناشی از قیمت بسیار بالای سوخت شناور، باعث افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌گردد. بنابراین شناسایی روش‌هایی برای کاهش مقاومت اصطکاکی بدنه شناورها با استفاده از روش‌های علمی نقش بسیار مهمی در کاهش هزینه‌ها و آلودگی محیط زیست خواهد داشت.

مطابق دستورالعمل‌های ارائه شده در استاندارد "۱۹۰۳۰" که دائماً در حال توسعه و بروزرسانی است؛ استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای تخمین مقاومت کشتی در آب‌خورهای مختلف مورد توجه بوده و قابل قبول می‌باشد [2]. روش‌های عددی که به کمک دینامیک سیالات محاسباتی انجام می‌شود؛ جزئیات بیشتری از نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌کند. در سال‌های اخیر روش شبیه‌سازی عددی به‌عنوان روشی قابل اعتماد از لحاظ علمی برای درک نحوه قرارگیری فیزیک جریان بر روی بدنه کشتی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است؛ البته این روش فقط در مقیاس محدودی از عددهای رینولدز قابلیت اجرا دارد. لارسن [3] در کتاب اصول طراحی شناور، به اصول طراحی اسپری ریل‌ها پرداخته است. شناورهای با مقطع عرضی ۷ برای عملکرد خوب دریامانی در دریا بکار برده می‌شوند ولی این مقطع، نیروی لیفت هیدرودینامیکی مناسبی ایجاد نمی‌کنند. یک روش برای ایجاد نیروی لیفت هیدرودینامیکی شناورهای تندرو، اضافه نمودن اسپری ریل در راستای طولی بدنه است. یک نمونه اسپری ریل در شکل ۱ نشان داده شده است. نقطه A یعنی جایی که آب بدنه را ترک می‌کند تا حد امکان تیز ساخته می‌شود. ولی نقطه B و C باید به‌صورت منحنی باشد تا باعث ازدیاد مقدار مقاومت شناور نشود. برای افزایش مقدار لیفت هیدرودینامیکی، سطح بین نقاط A و B به‌صورت منحنی و رو به پایین ساخته می‌شود. مقدار طول AB برابر $0.06[B/2]$ است که B عرض شناور در همان مقطع است (عرض اسپری ریل در طول شناور متغیر است) [4].



شکل ۱- نمای عرضی اسپری ریل [4]

جیم راسل به‌عنوان یکی از محققین حوزه شناورهای تندروی مسابقه‌ای بخشی از تجربیات خود را در مجله شناورهای مسابقه‌ای بیان نموده است. موقعیت اسپری ریل‌ها به سرعت و بارگذاری (تناژ) بدنه بستگی دارد؛ لذا اسپری ریل‌ها در یک

² Drag

³ Rolling

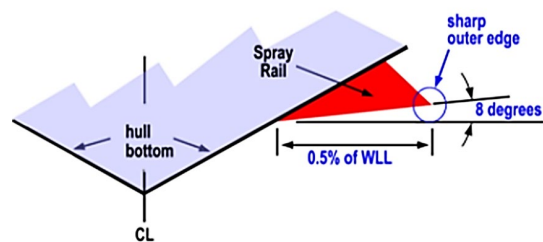
اصلی کاهش مقاومت در این حالت را کاهش قابل ملاحظه سطح خیس شناور در سرعت طراحی دانست. ساموئل و همکاران [8] در سال ۲۰۲۱، تأثیر شکل مقاطع و تعداد اسپیری ریل‌ها را بر مقاومت، تریم و جابه‌جایی عمودی یک شناور تندرو بررسی نمودند. این بررسی‌ها بر روی شناور فریزما^۵ و با استفاده از روش عددی انجام شده است. در این مقاله ابتدا تعداد اسپیری ریل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است؛ همچنین در این پژوهش سه مقطع عرضی مختلف برای شناور در نظر گرفته شده است.

نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که مقاومت شناور مجهز به اسپیری ریل تا عدد فرود ۱ تفاوت چندانی با شناور بدون اسپیری ریل ندارد ولی در اعداد فرود بزرگ‌تر از ۱ (حالت حرکتی پروازی)، شناور مجهز به اسپیری ریل مقاومت کمتری نسبت به شناور پایه دارد. همچنین در میان سه حالتی که شناور مجهز به اسپیری ریل است؛ مقاومت شناور نسبت به حالت پایه به ترتیب ۱/۸، ۳/۸ و ۴/۹ درصد برای حالت یک، دو و سه اسپیری ریل کاهش می‌یابد.

میتروفان و همکاران (۲۰۲۳) بررسی کردند که چگونه قرار دادن یک آنتی اسپیری ریل^۶ در ارتفاعات مختلف در امتداد دماغه کشتی می‌تواند بر مقاومت در برابر کشش تأثیر بگذارد. آنها خاطرنشان کردند که آنتی اسپیری ریل‌ها به طور گسترده برای افزایش راندمان کشتی‌های گشتی با کاهش مقاومت کل و ارتفاع موج در سرعت‌های بالاتر استفاده می‌شوند. شبیه‌سازی‌های عددی آنها نشان داد که آنتی اسپیری ریل‌ها، کشش کل را در هر هفت موقعیت ارتفاعی آزمایش شده کاهش می‌دهند [18].

ابراهیمی و همکاران (۲۰۲۴) مشخصات هندسی ریل اسپیری، شامل زاویه زیرین، عرض و تعداد ریل‌های اسپیری را تغییر دادند تا اثرات آنها را بر رفتار هیدرودینامیکی مخزن با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ارزیابی کنند [19]. حاجی‌زاده و گرجی در سال ۲۰۲۵ به بررسی چگونگی تأثیر هندسه اسپیری ریل بر مقاومت، تریم، بالآمدگی و سطح خیس شده شناورهای تندرو پرداختند. در این کار روش طراحی آزمایش تاگوچی برای ارزیابی تأثیر هندسه اسپیری ریل به کار گرفته شد. یافته‌ها نشان داد که اسپیری ریل‌های با عرض باریک‌تر و زوایای زیرین کوچک‌تر، باعث کاهش بیشتر مقاومت می‌شوند. همچنین، اسپیری ریل با تغییر توزیع فشار در اطراف

سرعت خاص (سرعت طراحی) بهترین عملکرد را خواهند داشت. تحقیقات راسل نشان می‌دهد که اسپیری ریل‌ها باید نسبتاً کوتاه بوده و تا انتهای بدنه امتداد نداشته باشند؛ چون این طول اضافی تأثیری بر روی اسپیری نداشته و از طرفی باعث افزایش مقاومت نیز می‌شود. تحقیقات نشان داده است که بهترین شکل مقطع اسپیری ریل، مثلثی است. این شکل بهینه شامل یک لبه بیرونی تیز است که برای تسهیل جداسازی اسپیری از بدنه لازم است. از دیگر ویژگی‌های طراحی اسپیری ریل می‌توان به زاویه پایینی ۸ درجه و عرضی برابر با ۰/۵ درصد طول خط آب اشاره کرد. در شکل ۲ نمایی از هندسه اسپیری ریل پیشنهادی جیم راسل نشان داده شده است [5].



شکل ۲- نمایی از اسپیری ریل جیم راسل و ابعاد آن [5]

سئو^۴ و همکاران [7] در سال ۲۰۱۶، اثر موقعیت اسپیری ریل شناور را بر پایداری، مقاومت و دیگر پارامترهای هیدرودینامیکی آن به روش آزمایشگاهی در آب آرام و موج بررسی کردند. در این کار برای بررسی اثر موقعیت اسپیری ریل بهینه، از یک اسپیری ریل مثلثی با عرض ۲۲/۵ درصد ارتفاع آب‌خور معادل ۱۴ میلی‌متر در سه موقعیت ۴۰، ۲۴، ۸ درصد ارتفاع آب‌خور از لبه چاین (معادل ۵، ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر) استفاده شده است. طراحی‌های انجام شده بر اساس عدد فرود ۴/۱۵۸ بوده و پارامترهایی چون تریم، مقاومت، بالآمدگی مرکز ثقل و سطح خیس به‌عنوان پارامترهای خروجی از تست‌های آزمایشگاهی بدنه در آب آرام استخراج شد.

با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان گفت که در سرعت طراحی، بدنه با اسپیری ریل در موقعیت ۲۴ درصد ارتفاع آب‌خور، بهینه‌ترین حالت ممکن را دارا است؛ چون علاوه بر داشتن بیشترین کاهش تریم نسبت به بدنه بدون اسپیری ریل، مقاومت کمتری نیز نسبت به آن دارد. در این حالت، تریم ۲۱ درصد و مقاومت ۶/۲۸ درصد کاهش داشته و همچنین بالآمدگی مرکز ثقل حدود ۴۰ درصد افزایش یافته است. می‌توان علت

⁶ anti-spray rail

⁴ Jeonghwa Seo

⁵ Fridsma

راستای چاین) مورد توجه قرار گرفته و با مقایسه نتایج بدست آمده، نحوه قرارگیری بهینه آن بیان می‌شود.

۲- شبیه سازی عددی

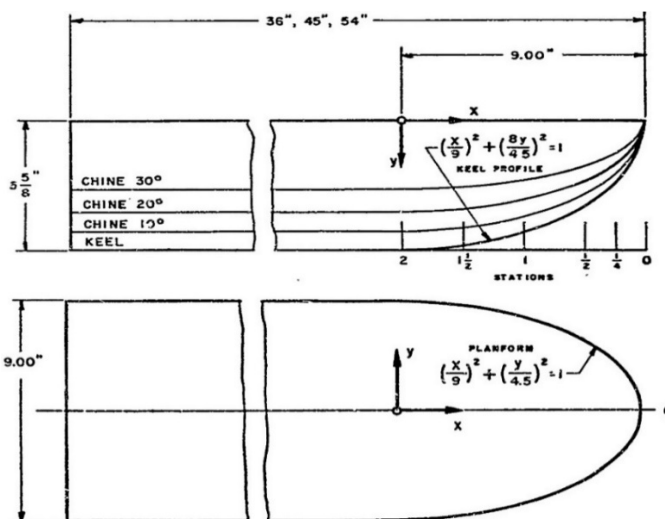
در تحقیق حاضر به منظور بررسی تأثیر اسپری ریل و انتخاب بهترین نحوه قرارگیری آن، شناور فریزما به عنوان شناور پایه انتخاب گردیده است. هندسه مدل با استفاده از هندسه مدل فریزما [9] با دو زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه استخراج گردیده و مدل‌ها به طول ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است. مشخصات اصلی این مدل‌ها در جدول ۱ و همچنین خطوط بدنه آن در شکل ۳ دیده می‌شود.

دماغه شناور، به کاهش مقاومت فشاری کمک می‌کند. آنها نشان دادند که نصب اسپری ریل منجر به کاهش حداقل ۴/۷ درصد مقاومت کل در مقایسه با بدنه خالی شده است [20].

در مجموع و با بررسی کارهای انجام شده، نتایج بدست آمده به طور کلی نشان می‌دهد که وجود اسپری ریل در یک سرعت طراحی و موقعیت مناسب باعث کاهش سطح خیس، افزایش نیروی لیفت و در نتیجه کاهش تریم شناور، کاهش مقاومت و افزایش بالآمدگی در مرکز ثقل شناور می‌شود؛ اما همانطور که بیان شد تاکنون بر روی نحوه قرارگیری اسپری ریل‌ها مطالعه زیادی صورت نگرفته است. در کار حاضر به کمک بررسی سطح خیس، تغییرات مقاومت، تریم و بالآمدگی، موضوع نحوه قرارگیری اسپری ریل (موازی با کیل و یا در

جدول ۱- مشخصات مدل شناور فریزما با زوایای خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه

مشخصه	نماد	واحد	مقدار
طول کل	LOA	m	۱/۵
عرض	B	m	۰/۳
عرض/طول	L/B	-	۵
آبخور در پاشنه	T _{AP}	m	۰/۰۹۴۲
وزن جابجایی	Δ	N	۱۶۱/۳۷۴
موقعیت مرکز ثقل طولی از سینه	LCG	m	۰/۹۷۴
موقعیت مرکز ثقل عمودی از کیل	VCG	m	۰/۰۸۸۲
تریم	τ	deg	۲/۲
عدد فرود عرضی	F _{TB}	-	۳/۹۹۲ - ۰/۶۶۴
عدد فرود حجمی	F _{TV}	-	۴/۳۳۸ - ۰/۷۲۲
زاویه خیز کف	β	deg	۲۰ و ۲۵ درجه



شکل ۳- خطوط بدنه شناور فریزما [9]

فریزما مجموعه‌ای از تست‌ها را بر روی مدل یک شناور پروازی با زاویه خیز کف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه در سه طول مختلف در آب آرام و موج منظم انجام داد و تأثیر زاویه خیز کف، تریم، وزن، سرعت، نسبت طول به عرض و خصوصیات موج را بر روی عملکرد هیدرودینامیکی شناور بررسی کرد.

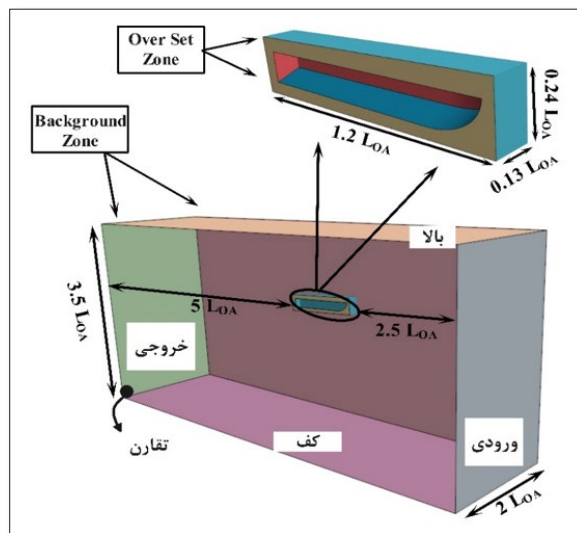
۲-۱- دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی راه بسیار کم‌هزینه و کارآمدی را برای حل مسائل در مقایسه با آزمایش‌های تجربی فراهم می‌کند. در این پژوهش برای بررسی تأثیر اسپری ریل بر رفتار هیدرودینامیکی شناور مدل و رسیدن به حالت بهینه قرارگیری اسپری ریل، از نرم‌افزار تجاری - Star CCM+ V.2022.1 استفاده شده است. این نرم‌افزار از روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم بهره می‌برد. شبیه‌سازی‌ها در دو زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه و اعداد فرود مختلف بر مبنای حلگر RANS انجام شده است.

۲-۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

ابعاد فضای محاسباتی و سطوح در نظر گرفته شده در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی ابعاد فضای محاسباتی

به گونه‌ای تعیین شده است که حداقل معیارهای ITTC برآورده شود [10,11]. بر این اساس فاصله مرز ورودی تا جلوی شناور ۲/۵ برابر طول شناور در نظر گرفته شده است و فاصله‌ی پاشنه شناور تا مرز خروجی به منظور لحاظ کردن جریان برگشتی و تعیین مشخصات ویک ایجاد شده در پشت شناور، ۵ برابر طول شناور تعیین شده است. فاصله‌ی مرزهای بالا و پایین فضای محاسباتی ۳/۵ برابر طول شناور است. همچنین فاصله‌ی دیواره‌ی 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 تعیین شده برای سطوح فضای محاسباتی مطابق جدول ۲ می‌باشد. برای مرزهای بالا، کف، ورودی و جانبی شرط مرزی سرعت ورودی و در مرز خروجی شرط مرزی فشار خروجی تعیین شده است. همچنین در سطح بدنه شرایط مرزی دیواره بدون لغزش اعمال شده است.

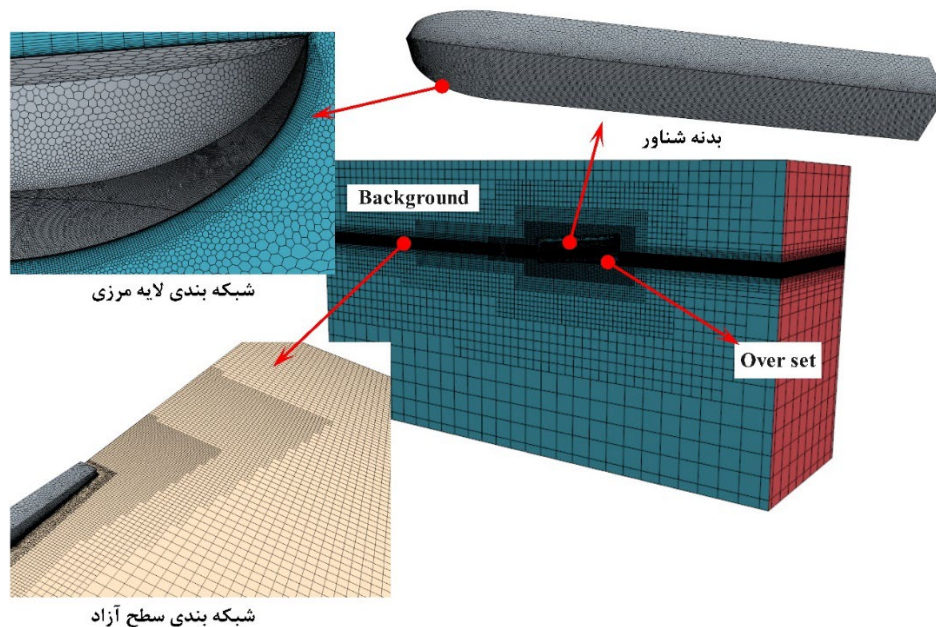


شکل ۴- ابعاد فضای محاسباتی و مرزهای در نظر گرفته شده

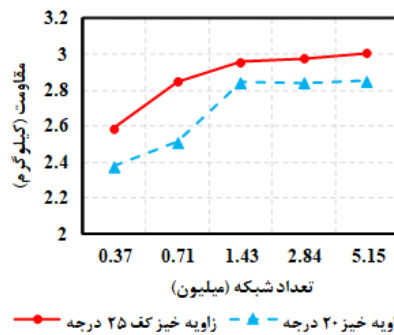
جدول ۲- شرایط مرزی فضای محاسباتی

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	

موجب کاهش تعداد سلول‌ها و زمان محاسبات خواهد شد. بر همین مبنا در این شبیه‌سازی از روش شبکه‌بندی دینامیکی استفاده شده‌است. در این روش فضای محاسباتی به دو بخش Overset و Background تقسیم شده‌است. ناحیه Overset با استفاده از شبکه‌بندی شش‌ضلعی بی‌سازمان و ناحیه Background با استفاده از شبکه‌بندی Trimmed با سازمان شناور و اهمیت قسمت‌های مختلف به ۱۲ بخش با تعداد شبکه‌بندی مختلف تقسیم شده‌است. در شکل ۵ شبکه‌بندی برخی از بخش‌های فضای محاسباتی نشان داده شده‌است.



شکل ۵- شبکه‌بندی بخش‌های مختلف فضای محاسباتی



شکل ۶- بررسی استقلال حل از شبکه

۳- بررسی عددی مؤلفه‌های هندسی اسپری ریل

در پژوهش حاضر به منظور بررسی مؤلفه‌های هندسی اسپری ریل و انتخاب بهترین نحوه قرارگیری آنها بر روی

۲-۳- شبکه‌بندی فضای محاسباتی

دقت نتایج شبیه‌سازی به‌طور مستقیم به کیفیت و نوع شبکه‌بندی وابسته است. کاریکا و همکاران [12] و ماکرو و همکاران [13] 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 بگوویچ و همکاران [14] و همچنین تحقیقات دی‌لوکا و همکاران [15] نشان داد که استفاده از شبکه‌بندی شش‌ضلعی بی‌سازمان در شبکه‌بندی دینامیکی و استفاده از شبکه‌بندی با سازمان در سایر بخش‌های فضای محاسباتی

۴-۲- استقلال حل از شبکه‌بندی و بررسی

حساسیت شبکه‌بندی

به منظور بررسی عدم وابستگی یا استقلال حل از شبکه، پنج حالت شبکه‌بندی برای مدل با دو زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه در سرعت ۵/۷۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده و در شکل ۶ نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که از حالت سوم به بعد افزایش تعداد شبکه تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد و حل از تعداد شبکه‌بندی مستقل شده‌است؛ لذا برای داشتن دقت کافی در حل مسئله و کاهش زمان محاسبات، حالت سوم به عنوان شبکه‌بندی پایه در نظر گرفته شده‌است.

شناور، از طرح آزمایش تاگوچی استفاده شده است. روش تاگوچی^۷ یک رویکرد آماری برای بهبود کیفیت و بهینه‌سازی فرآیندهاست که توسط دکتر گنئیچی تاگوچی، یک مهندس و آماردان ژاپنی، توسعه داده شد. این روش با هدف کاهش واریانس و افزایش کارایی محصولات و فرآیندها طراحی شده است، به گونه‌ای که حتی در شرایط مختلف و متغیر، نتایج بهینه‌تری به دست آید.

یکی از مهم‌ترین اصول و مبانی روش تاگوچی، مبحث طراحی آزمایش‌ها^۸ می‌باشد. در روش تاگوچی، از یک طرح آزمایشی استفاده می‌شود که از آرایه‌های متعامد بهره می‌گیرد. این آرایه‌ها به مهندسان اجازه می‌دهد تا با انجام تعداد محدودی آزمایش، تاثیر چندین پارامتر ورودی را به طور همزمان بررسی کنند. این فرآیند به کاهش تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌ها کمک می‌کند [17].

در این کار به منظور تعیین حالت بهینه برای مشخصه‌های در نظر گرفته شده اسپری‌ریل، از نسبت سیگنال به نویز استفاده گردیده است. نسبت سیگنال به نویز در واقع به تبدیل مجموعه‌ای از داده‌ها و مشاهدات به یک عدد گفته می‌شود که در دو مرحله صورت می‌پذیرد. در مرحله اول میانگین مربعات محاسبه می‌گردد و در مرحله دوم نسبت سیگنال به نویز برای میانگین مربعات وابسته به پارامترهای خروجی و مشخصه‌های کیفی مربوط به آنها به دست می‌آید. نسبت سیگنال به نویزهای استاندارد بر سه نوع می‌باشند: هر چه "کمتر-بهرتر"، هر چه به مقدار اسمی "نزدیک‌تر-بهرتر" و هر چه "بزرگ‌تر-بهرتر".

نتایج این کار، بر مبنای ویژگی هر چه "کوچکتر-بهرتر" در نظر گرفته شده است؛ در این حالت هر چه نرخ سیگنال به نویز خروجی‌ها بیشتر باشد مولفه‌های هیدرودینامیکی مورد بررسی مقدار کمتری دارند. ویژگی هر چه کمتر-بهرتر برای مولفه‌های تریم و بالآمدگی به منظور افزایش دامنه پایداری و همچنین کاهش احتمال ناپایداری طولی (پورپوزینگ^۹) در نظر گرفته شده است؛ لذا مقدار نرخ سیگنال به نویز کمتر

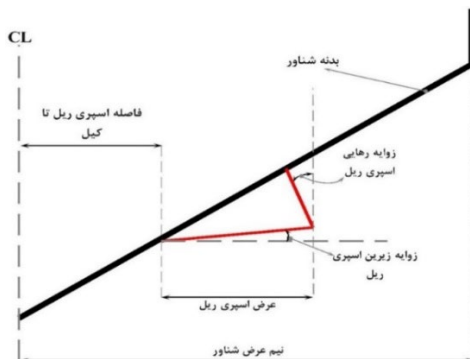
بیانگر تریم و بالآمدگی بیشتر می‌باشد و سیگنال به نویز بیشتر، بیانگر تریم و بالآمدگی کمتر است.

برخی از مؤلفه‌های هندسی مربوط به اسپری‌ریل در شکل ۷ نشان داده شده است. این مؤلفه‌ها عبارت‌اند از:

زاویه زیرین اسپری‌ریل (δ) (زاویه مقطع عرضی اسپری‌ریل با خط افق)، زاویه رهایی (ζ)، عرض (b_{sr})، شکل مقطع، فاصله اسپری‌ریل تا وسط شناور، طول، نحوه قرارگیری، تعداد و فاصله اسپری‌ریل‌ها از یکدیگر.

در این آزمایش برخی از مولفه‌های ذکر شده ثابت در نظر گرفته شده‌اند. بر این اساس شکل مقطع اسپری‌ریل به صورت مثلثی، فاصله اسپری‌ریل‌ها از یکدیگر برابر و طول اسپری‌ریل‌ها از ابتدا تا انتهای شناور در نظر گرفته شده است و متغیرهای آزمایش عرض اسپری‌ریل، زاویه زیرین اسپری‌ریل و تعداد اسپری‌ریل‌ها در کف شناور می‌باشند.

آزمایش برای شناور فریزما با دو زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه در دو حالت قرارگیری مختلف که یکی مسیر اسپری‌ریل در راستای چاین و دیگری موازی با کیل است؛ انجام شده است.



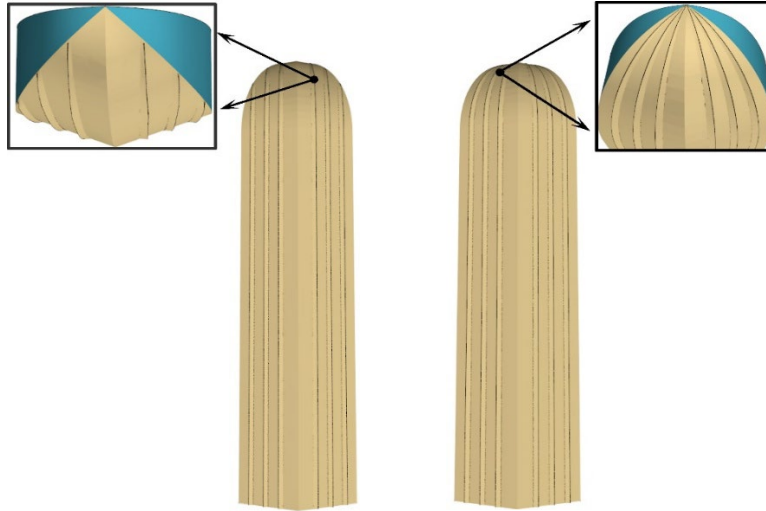
شکل ۷- مولفه‌های هندسی اسپری‌ریل

آزمایش برای دو سرعت ۳/۴۲ m/s (حالت حرکتی نیمه جابجایی) و ۵/۷۱ m/s (حالت حرکتی پروازی) انجام شده است. در شکل ۸ دو حالت قرارگیری اسپری‌ریل (موازی با کیل و در راستای چاین) نشان داده شده است.

⁹ porpoising

⁷ Taguchi Method

⁸ Design of Experiments - DOE

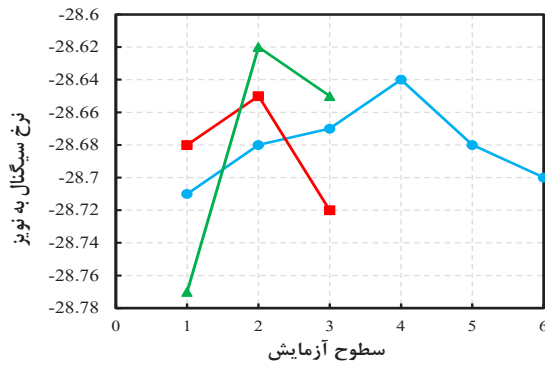


الف) اسپری ریل در راستای چاین ب) اسپری ریل موازی کیل
شکل ۸- دو حالت کلی قرارگیری اسپری ریل‌ها در کف شناور

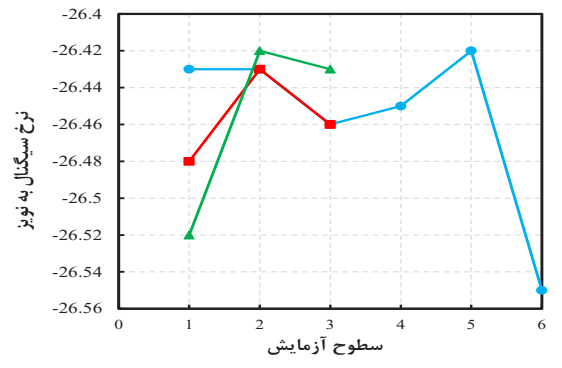
۴- نتایج

در این بخش نتایج مربوط به تست عددی در دو حالت مختلف قرارگیری در راستای چاین و موازی با کیل آورده شده و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

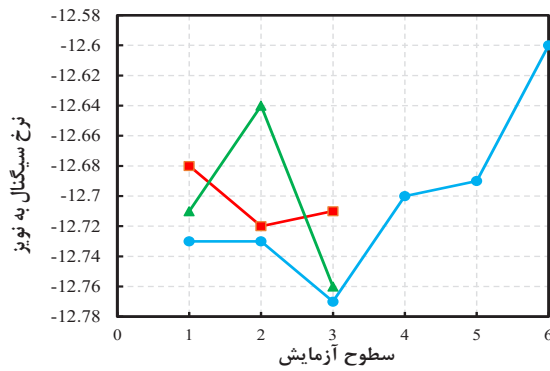
۴-۱- زاویه خیز کف ۲۰ درجه اسپری ریل در راستای چاین
نتایج تحلیل تاگوچی مربوط به زاویه خیز کف ۲۰ درجه با اسپری ریل‌های در راستای چاین برای مقاومت کل، زاویه تریم و بالآمدگی شناور در شکل ۹ ارائه گردیده است.



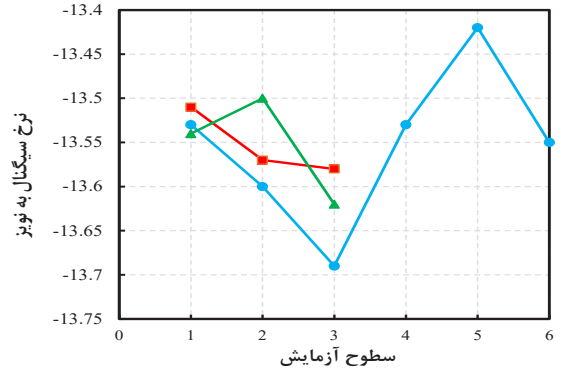
ب) مقاومت کل ($F_{TB} = 3/33$)



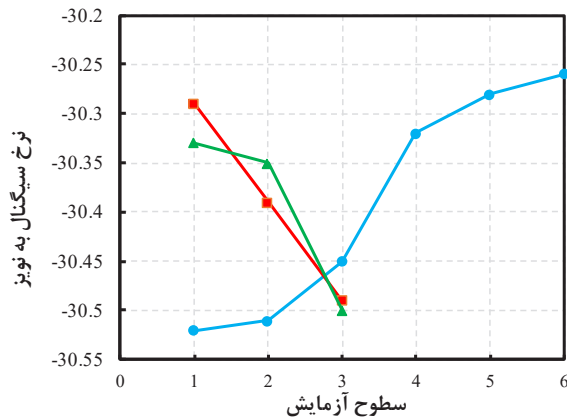
الف) مقاومت کل ($F_{TB} = 1/99$)



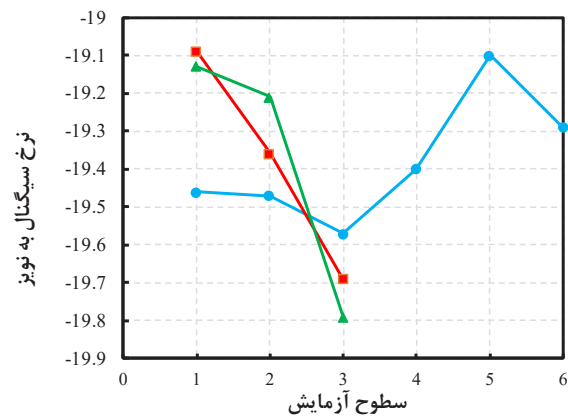
د) زاویه تریم ($F_{TB} = 3/33$)



ج) زاویه تریم ($F_{TB} = 1/99$)



تعداد اسپیری ریل (ت) بالا آمدگی (FRB = ۳/۳۳) زاویه زیرین اسپیری ریل درصد عرض اسپیری ریل



تعداد اسپیری ریل (ت) بالا آمدگی (FRB = ۱/۹۹) زاویه زیرین اسپیری ریل درصد عرض اسپیری ریل

(ت) بالا آمدگی (FRB = ۳/۳۳)

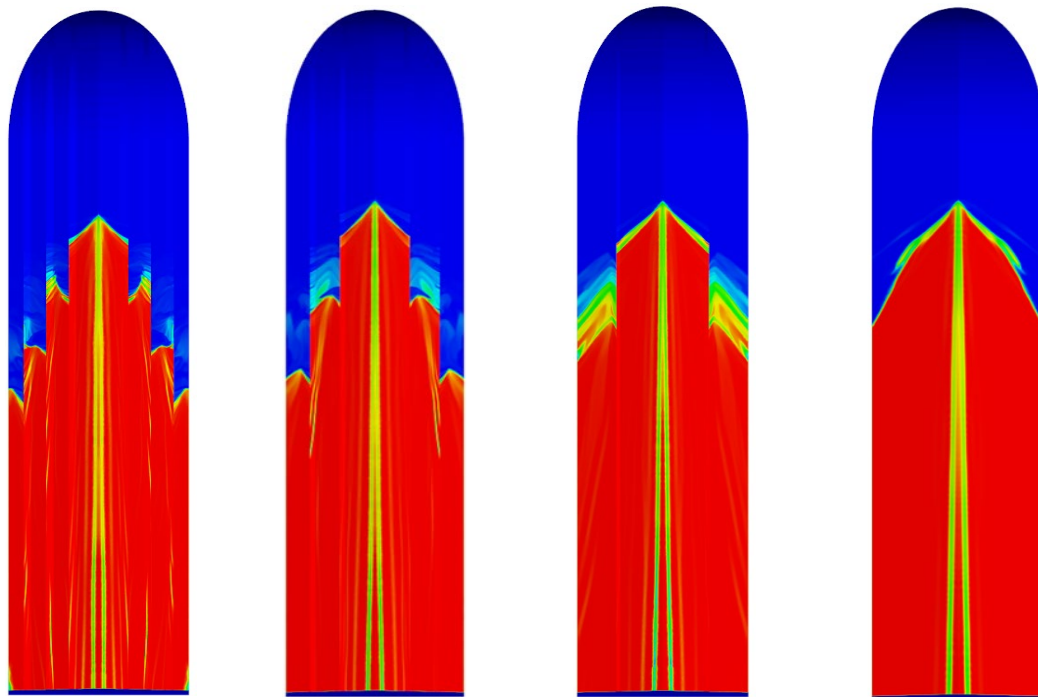
(ت) بالا آمدگی (FRB = ۱/۹۹)

شکل ۹- تحلیل نتایج حاصل از طرح آزمایش تاگوجی برای شناور با زاویه خیز کف ۲۰ درجه و اسپیری ریل‌های در راستای چپین

بر اساس نتایج شکل ۹-الف مشاهده می‌شود که در حالت نیمه پروازی زاویه زیرین اسپیری ریل و همچنین در حالت پروازی شکل ۹-ب تعداد اسپیری ریل‌ها دارای بیشترین تغییر نرخ سیگنال به نوز در اندازه پارامترهای مختلف هستند. در نتیجه این دو پارامتر تاثیر بیشتری بر مقاومت شناور در این دو حالت دارند. در حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی، زاویه زیرین ۸ درجه و در حالت پروازی زاویه زیرین ۴ درجه و همچنین در هر دو حالت حرکتی تعداد چهار اسپیری ریل در کف شناور عملکرد بهتری در میزان مقاومت شناور دارند. در نتیجه می‌توان گفت که افزایش زاویه زیرین در حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی موجب افزایش مقاومت و در حالت پروازی موجب کاهش مقاومت شناور می‌گردد. با بررسی سطح خیس کف شناور در حالت نیمه جابه‌جایی و پروازی، مشاهده می‌شود که در حالت نیمه جابه‌جایی افزایش زاویه زیرین موجب افزایش سطح خیس و در نهایت افزایش مقاومت شناور گردیده است. در حالت حرکتی پروازی دو عامل افزایش هوادهی در انتهای پاشنه شناور و کاهش مساحت مقطع اسپیری ریل با افزایش زاویه زیرین رخ می‌دهند و موجب کاهش سطح خیس و در نهایت کاهش مقاومت شناور شده‌اند. در شکل ۱۰ سطح خیس کف شناور در سه آزمایش مختلف با سطح خیس شناور در حالت بدون اسپیری ریل مقایسه شده‌است. در این سه آزمایش به ترتیب تعداد اسپیری ریل‌ها برابر ۲، ۴ و ۶ و نسبت عرض اسپیری ریل به ترتیب ۲، ۳ و ۴ درصد عرض مقطع می‌باشد. مشاهده می‌شود که در هر سه آزمایش اضافه نمودن اسپیری ریل موجب کاهش سطح خیس ناحیه اسپیری گردیده است. در نتیجه می‌توان گفت که در تمامی حالت‌ها وجود اسپیری ریل باعث کاهش مقاومت شناور نسبت به حالت بدون اسپیری ریل شده‌است که در واقع عامل این کاهش مقاومت، کاهش سطح خیس ناشی از اسپیری آب به وسیله زائده اسپیری ریل است. همچنین از مقایسه سه حالت ب، ج و د در شکل ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که در حالت پروازی افزایش تعداد اسپیری ریل‌ها همزمان با افزایش عرض اسپیری ریل می‌تواند موجب کاهش سطح خیس ناشی از اسپیری آب در ناحیه سینه شناور گردد.

بر اساس نتایج شکل ۹-الف مشاهده می‌شود که در حالت نیمه پروازی زاویه زیرین اسپیری ریل و همچنین در حالت پروازی شکل ۹-ب تعداد اسپیری ریل‌ها دارای بیشترین تغییر نرخ سیگنال به نوز در اندازه پارامترهای مختلف هستند. در نتیجه این دو پارامتر تاثیر بیشتری بر مقاومت شناور در این دو حالت دارند. در حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی، زاویه زیرین ۸ درجه و در حالت پروازی زاویه زیرین ۴ درجه و همچنین در هر دو حالت حرکتی تعداد چهار اسپیری ریل در کف شناور عملکرد بهتری در میزان مقاومت شناور دارند. در نتیجه می‌توان گفت که افزایش زاویه زیرین در حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی موجب افزایش مقاومت و در حالت پروازی موجب کاهش مقاومت شناور می‌گردد. با بررسی سطح خیس کف شناور در حالت نیمه جابه‌جایی و پروازی، مشاهده می‌شود که در حالت نیمه جابه‌جایی افزایش زاویه زیرین موجب افزایش سطح خیس و در نهایت افزایش مقاومت شناور گردیده است. در حالت حرکتی پروازی دو عامل افزایش هوادهی در انتهای پاشنه شناور و کاهش مساحت مقطع اسپیری ریل با افزایش

Volume Fraction of water

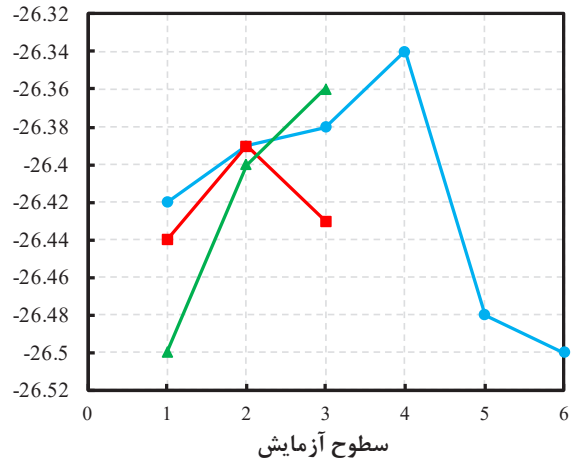
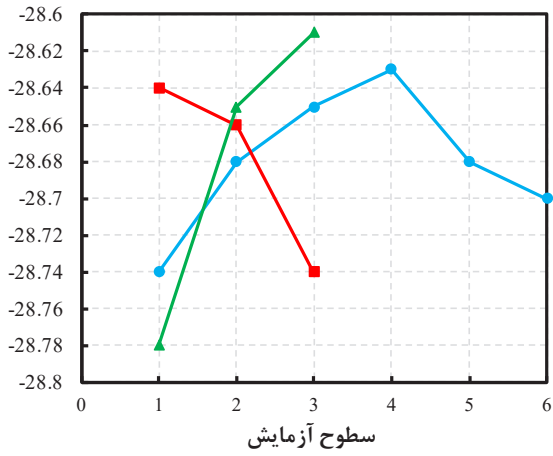


الف) شناور بدون اسپری ب) آزمایش اول ج) آزمایش دوم د) آزمایش سوم
 شکل ۱۰- سطح خیس کف شناور در تعداد مختلف اسپری ریل برای آزمایش ۱، ۲ و ۳ در حالت پروازی (سرعت ۵/۷۱ متر بر ثانیه)

که کاهش زاویه زیرین اسپری ریل موجب افزایش بالآمدگی گردیده است. به علاوه افزایش عرض و تعداد اسپری ریل‌ها موجب افزایش نیروی لیفت وارد بر بدنه شناور و در نتیجه افزایش بالآمدگی شناور شده است.

۲-۴- زاویه خیزکف ۲۰ درجه اسپری ریل موازی با کیل
 نتایج طراحی آزمایش تاگوچی برای مولفه‌های هیدرودینامیکی از قبیل مقاومت، تریم و بالآمدگی در زاویه خیزکف ۲۰ درجه برای اسپری ریل‌های موازی با کیل، بر مبنای نرخ سیگنال به نویز محاسبه گردیده و در شکل ۱۱ ارائه شده است. در ادامه اهمیت تاثیر پارامترهای هندسی زاویه زیرین اسپری ریل، تعداد اسپری ریل‌ها و نسبت عرض اسپری ریل به عرض مقطع بر مولفه‌های هیدرودینامیکی در حالت مذکور بررسی گردیده است؛ در انتها تاثیر دو حالت قرارگیری مختلف اسپری ریل بر میزان مقاومت شناور مقایسه شده است.

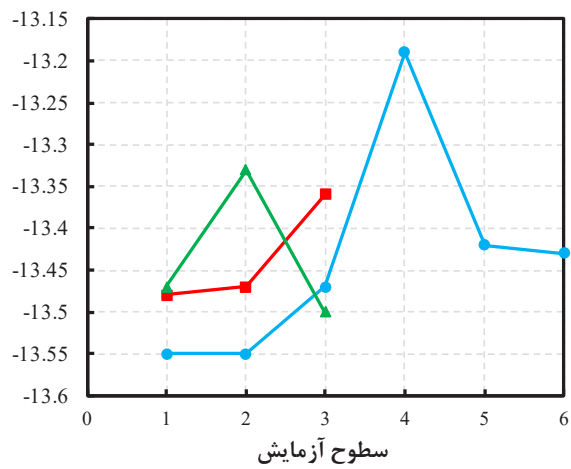
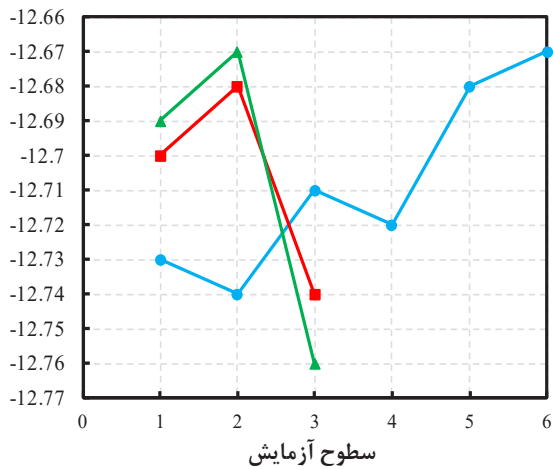
با توجه به نتایج مربوط به تریم شناور در شکل ۹-ج و شکل ۹-د می‌توان نتیجه گرفت که به ترتیب مولفه‌های هندسی زاویه زیرین اسپری ریل، تعداد اسپری ریل‌ها و نسبت عرض اسپری ریل به عرض مقطع، تاثیر بیشتری را در میزان تریم شناور دارند که علت آن تاثیر مولفه‌های هندسی مذکور بر میزان نیروی لیفت تولید شده در ناحیه سینه شناور به واسطه وجود اسپری ریل می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که اضافه نمودن اسپری ریل به شناور آزمایش مورد بحث نسبت به شناور پایه، موجب افزایش نیروی لیفت وارد بر سینه شناور به واسطه افزایش ضریب فشار وارد بر کف شناور گردیده است. نتایج مربوط به بالآمدگی در حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی (شکل ۹-ه نشان می‌دهد که به ترتیب مولفه‌های هندسی عرض، زاویه زیرین و تعداد اسپری ریل‌ها بیشترین تاثیر را بر میزان بالآمدگی شناور دارند که این ترتیب در حالت پروازی شکل ۹-ت زاویه زیرین، عرض و تعداد اسپری ریل‌ها می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد



تعداد اسپیری ریل - درصد عرض اسپیری ریل - زاویه زیرین اسپیری ریل - تعداد اسپیری ریل - درصد عرض اسپیری ریل - زاویه زیرین اسپیری ریل

(ب) مقاومت کل ($Fr_B = 3/33$)

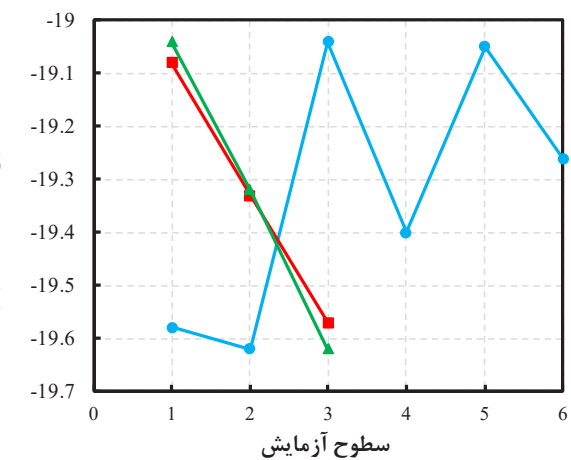
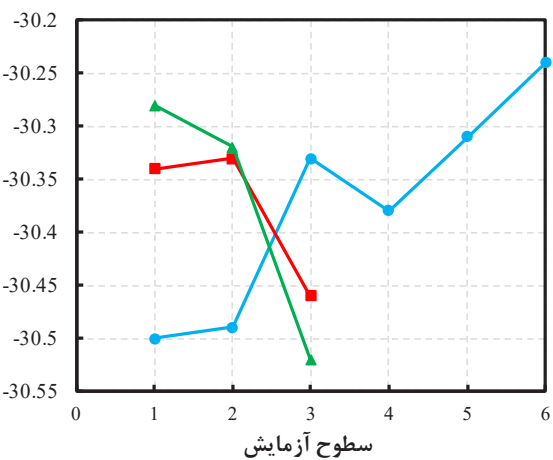
(الف) مقاومت کل ($Fr_B = 1/99$)



تعداد اسپیری ریل - درصد عرض اسپیری ریل - زاویه زیرین اسپیری ریل - تعداد اسپیری ریل - درصد عرض اسپیری ریل - زاویه زیرین اسپیری ریل

(د) زاویه تریم ($Fr_B = 3/33$)

(ج) زاویه تریم ($Fr_B = 1/99$)



تعداد اسپیری ریل - درصد عرض اسپیری ریل - زاویه زیرین اسپیری ریل - تعداد اسپیری ریل - درصد عرض اسپیری ریل - زاویه زیرین اسپیری ریل

(ت) بالآمدگی ($Fr_B = 3/33$)

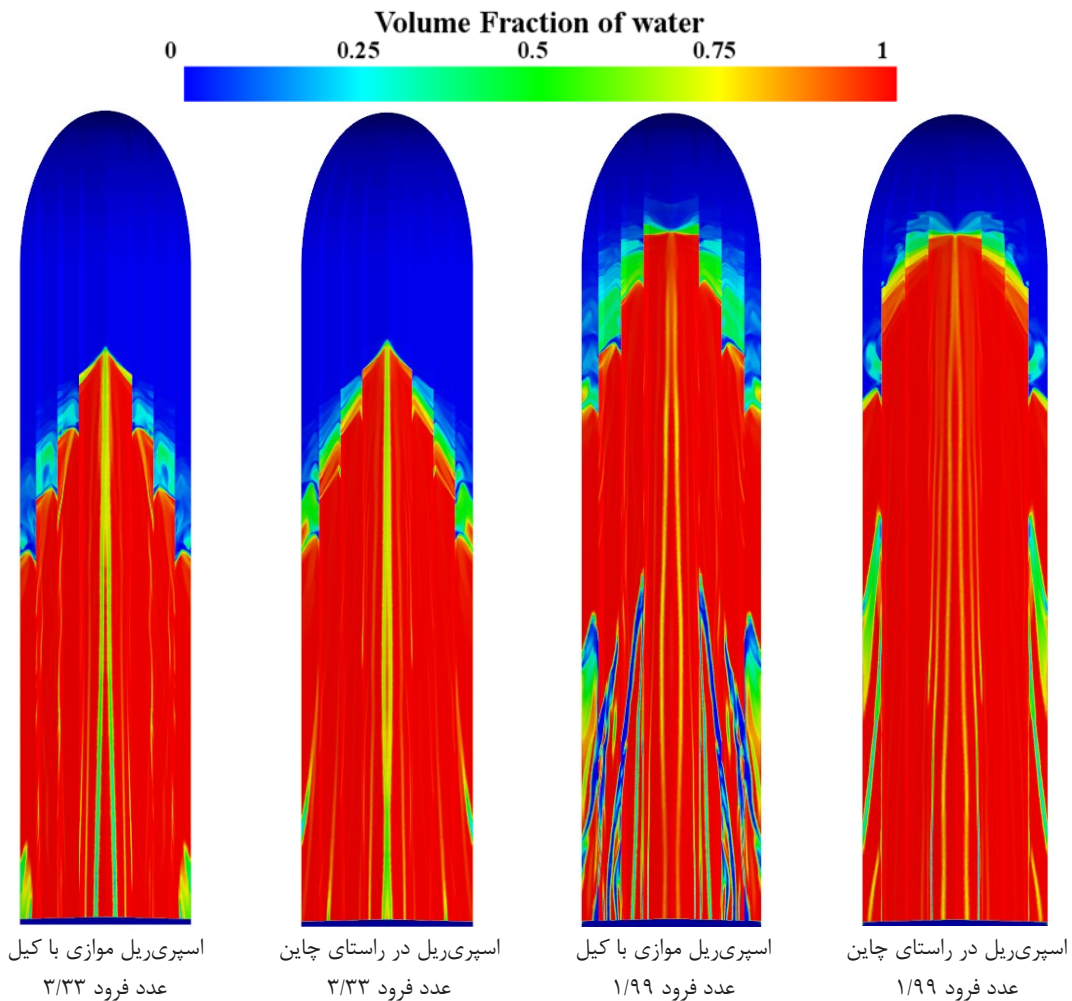
(ه) بالآمدگی ($Fr_B = 1/99$)

شکل ۱۱- تحلیل نتایج حاصل از طرح آزمایش تاگوچی برای شناور با زاویه خیز کف ۲۰ درجه و اسپیری ریل‌های موازی با کیل

شکل ۱۱-الف نشان می‌دهد که اهمیت مولفه‌های هندسی مورد بررسی در هر دو حالت قرارگیری اسپری ریل (موازی با کیل و در راستای چاین) یکسان می‌باشد به طوری که در حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی مولفه هندسی زاویه زیرین اسپری ریل‌ها تاثیر بیشتری بر میزان مقاومت شناور داشته است در حالی که در حالت حرکتی پروازی تعداد اسپری ریل‌ها تاثیر بیشتری نسبت به زاویه زیرین بر مقدار مقاومت شناور دارد (شکل ۱۱-ب)؛ علت این موضوع افزایش میزان اسپری آب در حالت پروازی است که همین امر موجب تاثیر بیشتر تعداد اسپری ریل‌ها در کاهش اسپری و در نتیجه کاهش مقاومت شناور می‌گردد. همچنین در حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی افزایش زاویه

زیرین موجب افزایش مقاومت گردیده است و در حالت پروازی کاهش زاویه زیرین موجب افزایش مقاومت شده‌است.

در شکل ۱۲ سطح خیس کف شناور در یکی از آزمایش‌ها (زاویه زیرین ۴ درجه، نسبت عرض ۲ درصد و تعداد ۶ ریل) برای دو حالت قرارگیری اسپری ریل (در راستای چاین و موازی با کیل) نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که قرارگیری اسپری ریل موازی با کیل عملکرد بهتری در کاهش سطح خیس ناشی از اسپری داشته است که این عامل موجب کاهش بیشتر مقاومت در حالت قرارگیری اسپری ریل‌های موازی با کیل نسبت به اسپری ریل‌های در راستای چاین گردیده است.



شکل ۱۲- سطح خیس کف شناور در حالت نیمه جابه‌جایی (سرعت ۳/۴۲ متر بر ثانیه) و پروازی (سرعت ۵/۷۱ متر بر ثانیه) برای دو حالت قرارگیری

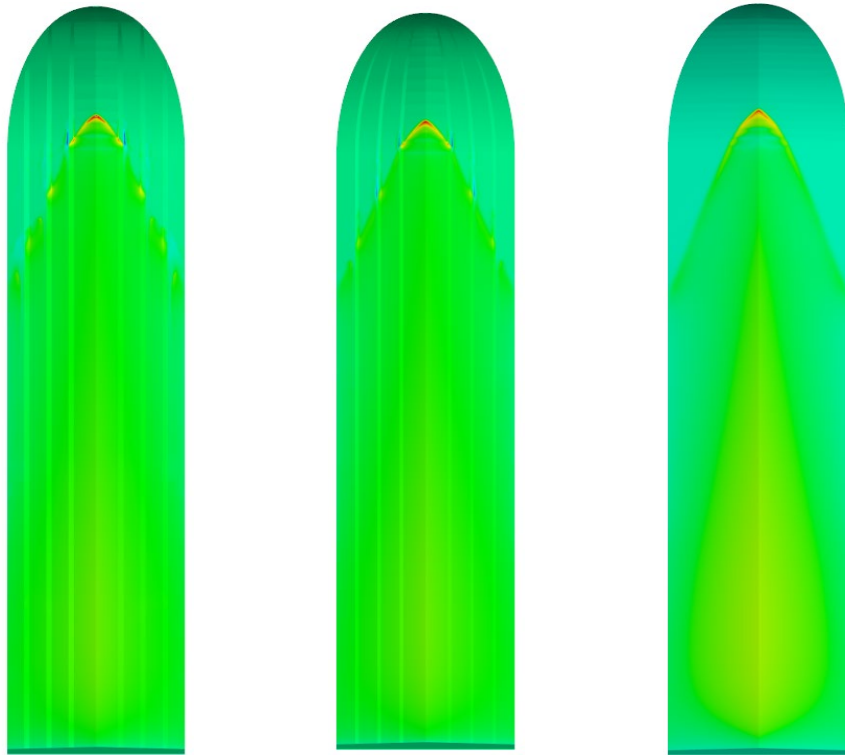
اسپری ریل به ترتیب بیشترین تاثیر را در میزان زاویه تریم شناور دارند. در حالت حرکتی پروازی تعداد اسپری ریل‌ها تاثیر بیشتری بر میزان تریم شناور نسبت به زاویه زیرین

در شکل ۱۱-ج نتایج مربوط به تحلیل زاویه تریم شناور نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که در حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی زاویه زیرین، تعداد و عرض

داشته است که علت این موضوع افزایش اسپری آب در حالت پروازی و افزایش نقش تعداد اسپری ریل‌ها بر میزان نیروی لیفت وارد در ناحیه سینه شناور می‌باشد و این امر موجب تاثیر بیشتر آن بر میزان تریم شناور می‌گردد (شکل ۱۱-د).

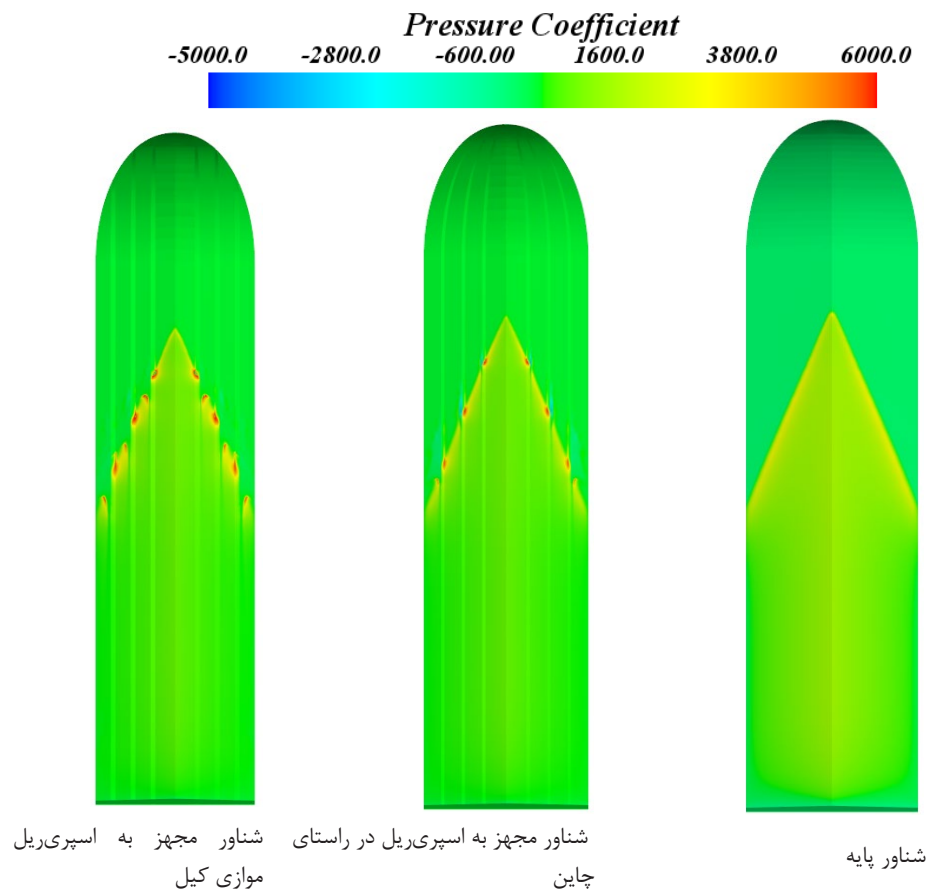
در شکل ۱۳ کانتور ضریب فشار وارد بر کف شناور در حالت با اسپری ریل (موازی با کیل و در راستای چپین) و بدون آن، برای دو حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی و پروازی نشان داده شده‌است. مشاهده می‌گردد که در حالت پروازی در شناور پایه، طول هشتی شکل خط سکون افزایش یافته است در نتیجه مساحت بیشتری تحت تاثیر اسپری آب نسبت به حالت نیمه جابه‌جایی قرار گرفته‌است به همین دلیل افزایش تعداد اسپری ریل‌ها در حالت پروازی تاثیر بیشتری بر کاهش سطح خیس ناشی از اسپری آب و در

نهایت کاهش مقاومت شناور داشته است. بر همین مبنا بکارگیری اسپری ریل در حالت پروازی موثرتر و استفاده از آن بسیار ضروری می‌باشد. همچنین مقایسه ضریب فشار وارد بر کف شناور در هر دو حالت قرارگیری اسپری ریل نشان می‌دهد که استفاده از اسپری ریل‌های موازی با کیل، افزایش فشار بیشتری در خط سکون ایجاد نموده است که این امر موجب افزایش نیروی لیفت در سینه شناور و در نهایت افزایش تریم شناور گردیده است. افزایش تریم شناور به‌واسطه بکارگیری اسپری ریل‌های در راستای کیل، در محدوده تریم بحرانی قرار نمی‌گیرد؛ لذا استفاده از اسپری ریل‌های در راستای کیل موجب افزایش تریم و کاهش سطح خیس در شناور همراه با حفظ پایداری طولی گردیده است.



شناور پایه
 شناور مجهز به اسپری ریل در راستای چپین
 شناور مجهز به اسپری ریل موازی کیل

الف) حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی



ب) حالت حرکتی پروازی

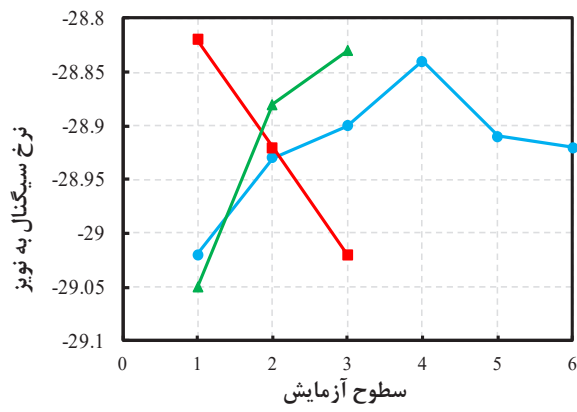
شکل ۱۳- کانتور ضریب فشار وارد بر کف شناور با و بدون اسپری ریل در آزمایش مدنظر برای دو حالت قرارگیری اسپری ریل

افزایش تریم و بالآمدگی شناور می‌گردد. بعلاوه افزایش عرض و تعداد اسپری ریل موجب افزایش نیروی لیفت در شناور و در نتیجه افزایش تریم و بالآمدگی شناور می‌گردد. ۳-۴- زاویه خیزکف ۲۵ درجه با اسپری ریل در راستای چاین

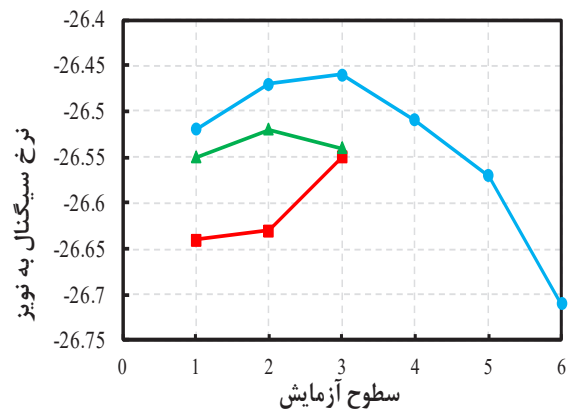
در این بخش نتایج مولفه‌های هیدرودینامیکی حاصل از طرح آزمایش تاگوچی بر مبنای نرخ سیگنال به نویز برای شناور با زاویه خیزکف ۲۵ درجه بررسی و تحلیل شده‌است. در این قسمت جهت اسپری ریل‌ها در راستای چاین شناور در نظر گرفته شده‌است. نتایج تحیل تاگوچی برای مولفه‌های هیدرودینامیکی مقاومت کل، زاویه تریم و بالآمدگی شناور در شکل ۱۴ ارائه گردیده است.

نتایج مربوط به بالآمدگی شناور در شکل ۱۱-ه و ۱۱-ت نشان داده شده‌است. این نتایج بیان می‌کند که مولفه‌های زاویه زیرین، تعداد و عرض اسپری ریل به ترتیب موثرترین مولفه‌های هندسی بر میزان بالآمدگی شناور می‌باشند. در این حالت مشاهده می‌شود که کاهش زاویه زیرین و همچنین افزایش تعداد و عرض اسپری ریل‌ها در کف شناور موجب افزایش میزان بالآمدگی در شناور شده‌است.

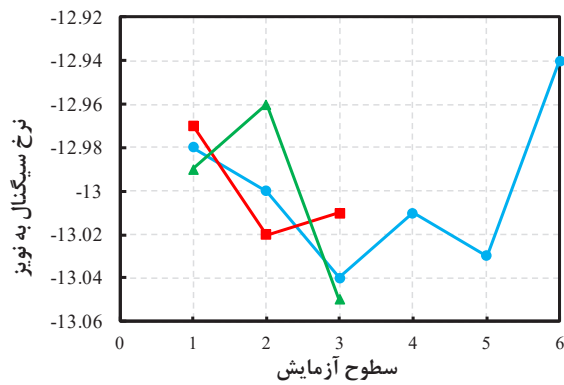
نتایج نشان می‌دهد که در دو حالت قرارگیری اسپری ریل (در راستای چاین و موازی با کیل) اهمیت پارامترهای هندسی مورد بررسی (زاویه زیرین، تعداد و عرض اسپری ریل) در نرخ مولفه‌های هیدرودینامیکی شناور (مقاومت، تریم و بالآمدگی) تغییر نکرده است؛ بطوری‌که در هر دو حالت کاهش زاویه زیرین اسپری ریل موجب



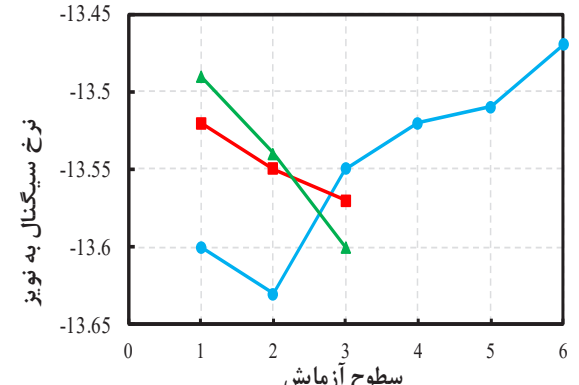
(ب) مقاومت کل ($Fr_B = 3/33$)
 تعداد اسپیری ریل — درصد عرض اسپیری ریل — زاویه زیرین اسپیری ریل



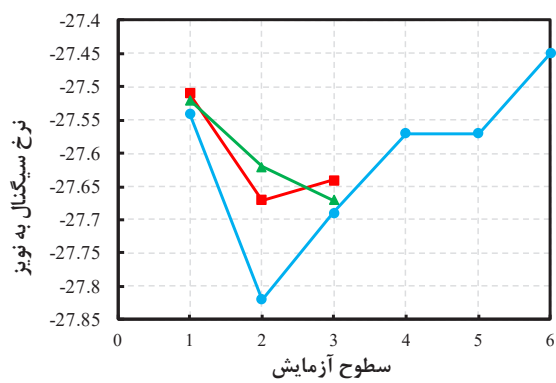
(الف) مقاومت کل ($Fr_B = 1/99$)
 تعداد اسپیری ریل — درصد عرض اسپیری ریل — زاویه زیرین اسپیری ریل



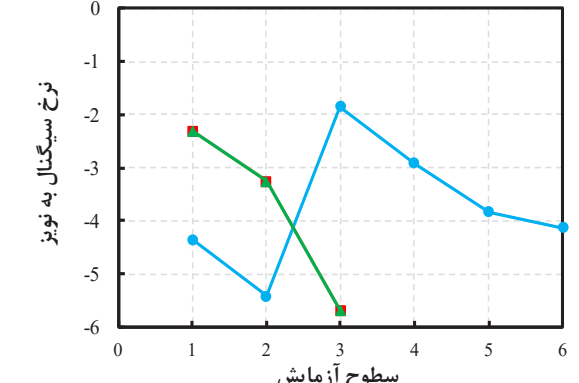
(د) زاویه تریب ($Fr_B = 3/33$)
 تعداد اسپیری ریل — درصد عرض اسپیری ریل — زاویه زیرین اسپیری ریل



(ج) زاویه تریب ($Fr_B = 1/99$)
 تعداد اسپیری ریل — درصد عرض اسپیری ریل — زاویه زیرین اسپیری ریل



(ت) بالا آمدگی ($Fr_B = 3/33$)
 تعداد اسپیری ریل — درصد عرض اسپیری ریل — زاویه زیرین اسپیری ریل

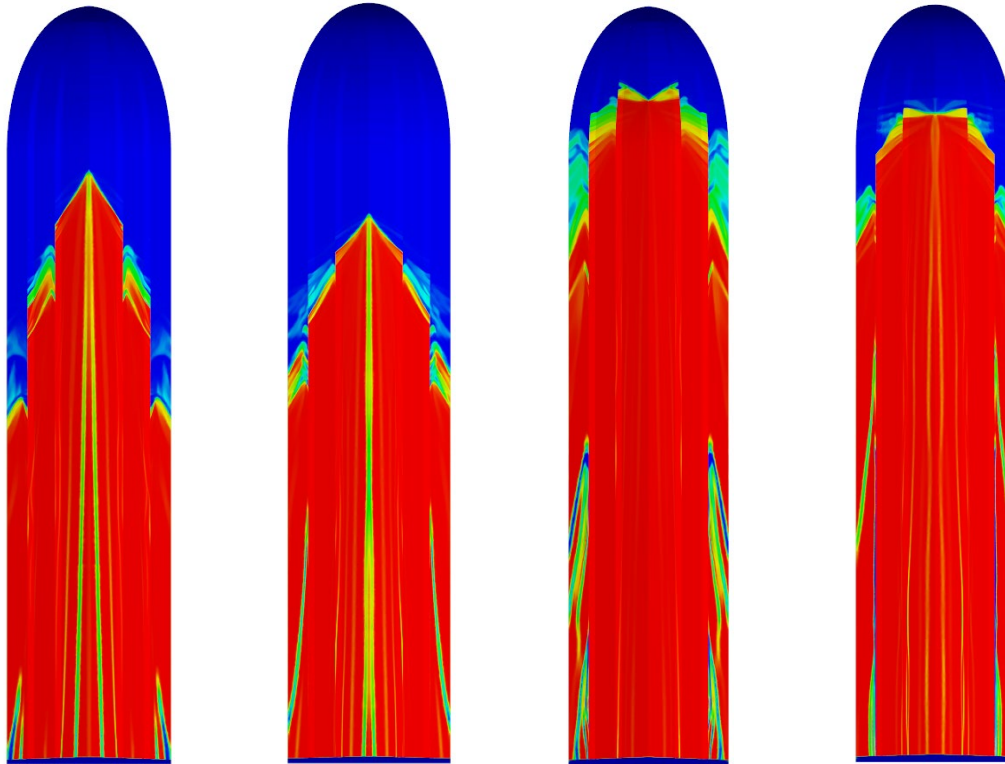
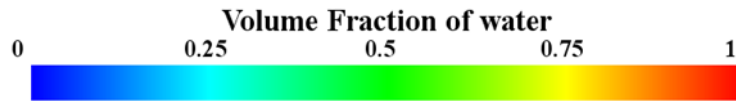


(ه) بالا آمدگی ($Fr_B = 1/99$)
 تعداد اسپیری ریل — درصد عرض اسپیری ریل — زاویه زیرین اسپیری ریل

شکل ۱۴- تحلیل نتایج حاصل از طرح آزمایش تاگوچی برای شناور با زاویه خیز کف ۲۵ درجه و اسپیری ریل‌های در راستای چپین

شناور مجهز به اسپیری ریل‌های در راستای چپین در دو زاویه خیز ۲۰ و ۲۵ درجه مقایسه شده‌است. افزایش زاویه خیز کف در حالت کلی موجب کاهش نیروی لیفت و کاهش بالا آمدگی شناور شده‌است و این موضوع، موجب افزایش سطح خیس و در نهایت باعث افزایش مقاومت شناور گردیده است. همچنین افزایش زاویه خیز کف موجب افزایش میزان اسپیری آب بر روی بدنه شناور شده‌است.

در شکل ۱۴ (الف و ب) نتایج تحلیل تاگوچی مربوط به مقاومت شناور ارائه شده‌است. اهمیت و نحوه اثرگذاری پارامترهای زاویه زیرین، تعداد و عرض اسپیری ریل بر میزان مولفه‌های هیدرودینامیکی تغییر نکرده است و مشابه حالت قرارگیری اسپیری در شناور با خیز کف ۲۰ درجه است. در شکل ۱۵ سطح خیس کف شناور در آزمایشی با شرایط زاویه زیرین ۱۲ درجه، درصد عرض ۴ و تعداد ۴ ریل، برای



زاویه خیز کف ۲۵ درجه
عدد فرود ۳/۳۳

زاویه خیز کف ۲۰ درجه
عدد فرود ۳/۳۳

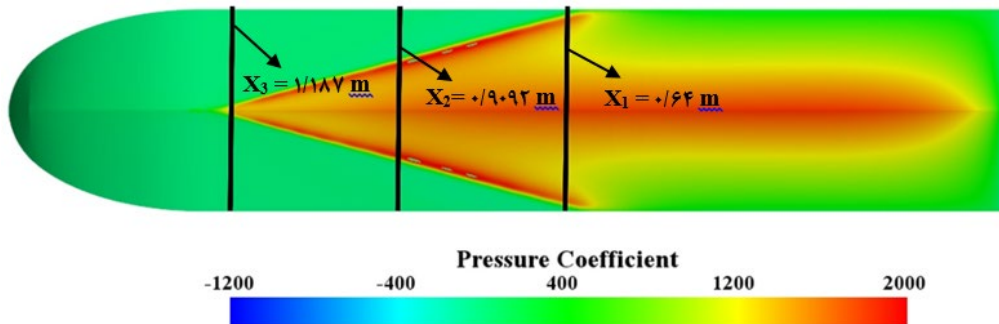
زاویه خیز کف ۲۵ درجه
عدد فرود ۱/۹۹

زاویه خیز کف ۲۰ درجه
عدد فرود ۱/۹۹

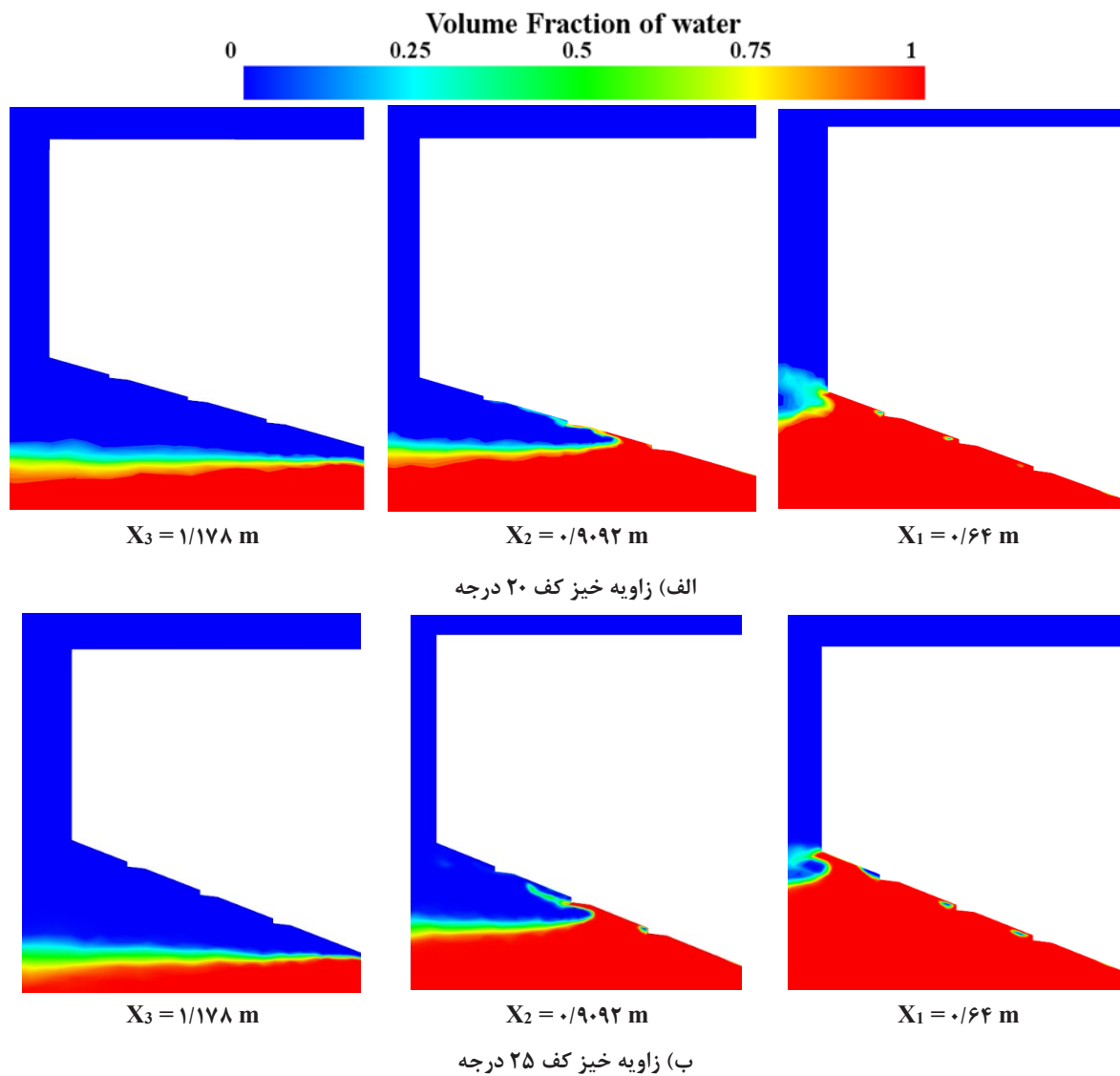
شکل ۱۵- سطح خیس کف شناور با زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه برای دو حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی و پروازی

کف ۲۰ و ۲۵ درجه نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که زائده اسپری‌ریل در زاویه خیز کف ۲۵ درجه عملکرد بهتری داشته و همچنین هوادهی بیشتری در پشت مقطع اسپری‌ریل ایجاد شده‌است. در واقع با افزایش زاویه خیز کف میزان اسپری آب افزایش یافته است که این موضوع باعث انگیزه بیشتری در استفاده از اسپری‌ریل می‌شود؛ در مجموع می‌توان گفت بکارگیری اسپری‌ریل و افزایش تعداد نوارهای اسپری‌ریل در زوایای خیز کف بزرگتر تاثیر بیشتری بر کاهش میزان سطح خیس ناشی از اسپری دارد.

به منظور بررسی تاثیر اسپری‌ریل در دو زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه، سطح خیس شناور در سه مقطع عرضی که به ترتیب در فواصل ۰/۶۴، ۰/۹۲ و ۱/۱۸۷ متر از پاشنه شناور قرار دارند؛ در حالت پروازی مورد بررسی قرار گرفته‌است. مقاطع عرضی مذکور طوری تعیین شده‌اند که از ابتدا تا انتهای خط سکون را در حالت پروازی که بیشترین مقدار اسپری وجود دارد، پوشش دهند. صفحات عرضی در نظر گرفته شده در کف شناور در شکل ۱۶ نشان داده شده‌است. در شکل ۱۷ تاثیر زائده اسپری‌ریل بر میزان اسپری آب در صفحات عرضی مختلف برای دو زاویه خیز



شکل ۱۶- صفحات عرضی در نظر گرفته شده در کف شناور



شکل ۱۷- تاثیر اسپری ریل بر تغییر زاویه خیز کف در مقاطع عرضی مختلف برای حالت حرکتی پروازی

این موضوع افزایش زاویه تریم شناور را به همراه داشته است؛ لذا استفاده از اسپری ریل در شناورهایی با زاویه خیز کف بیشتر اثرگذاری بیشتری بر میزان تریم و کاهش سطح خیس ناشی از اسپری آب دارد.

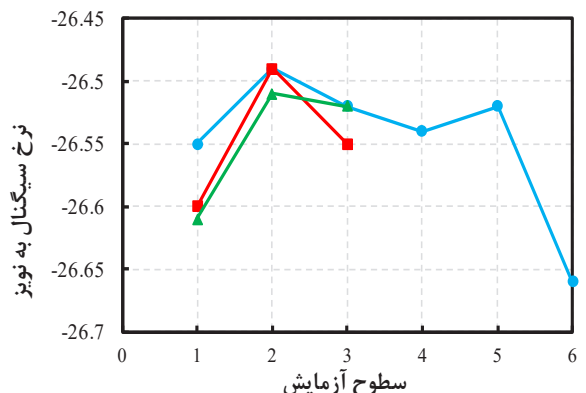
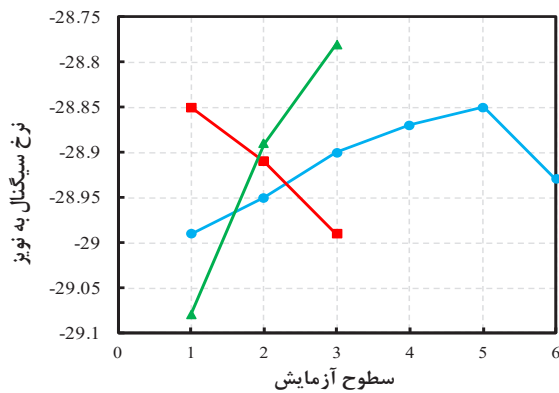
نتایج تحلیل تاگوچی مربوط به بالآمدگی شناور در شکل ۱۴ (ه و ت) نشان داده شده است. مشاهده می شود که اهمیت مولفه های هندسی اسپری ریل بر بالآمدگی شناور مطابق با نتایج شناور با زاویه خیز کف ۲۰ درجه می باشد. همچنین مقایسه نتایج مربوط به بالآمدگی شناور در زوایای خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه بیان کند که افزایش زاویه خیز کف موجب کاهش نیروی لیفت وارد بر شناور و در نتیجه کاهش میزان بالآمدگی شناور گردیده است.

۴-۴- زاویه خیز کف ۲۵ درجه با اسپری ریل موازی با کیل

در شکل ۱۴ (ج و د) نتایج تحلیل تاگوچی مربوط به زاویه تریم شناور ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که در حالت حرکتی نیمه جابه جایی و پروازی به ترتیب زاویه زیرین، تعداد و عرض اسپری ریل موثرترین مولفه های هندسی در میزان تریم شناور می باشند. با بررسی کانتور ضریب فشار وارد بر کف شناور برای دو زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه برای حالت نیمه جابه جایی و پروازی، مشاهده می شود که با افزایش زاویه خیز کف، به دلیل کاهش نیروی لیفت، خط سکون به سینه شناور نزدیک تر شده و سطح بیشتری از شناور در داخل آب قرار گرفته است؛ همچنین طول خط سکون با افزایش زاویه خیز کف افزایش یافته است که این امر موجب افزایش سطح در معرض اسپری آب گردیده است. بر این اساس، گشتاور حاصل از خط فشار ایجاد شده توسط اسپری ریل در سینه شناور افزایش یافته است که

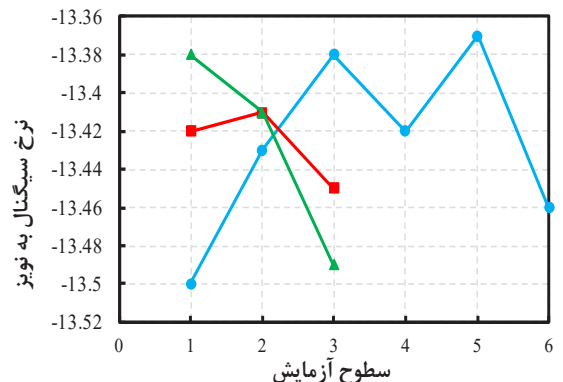
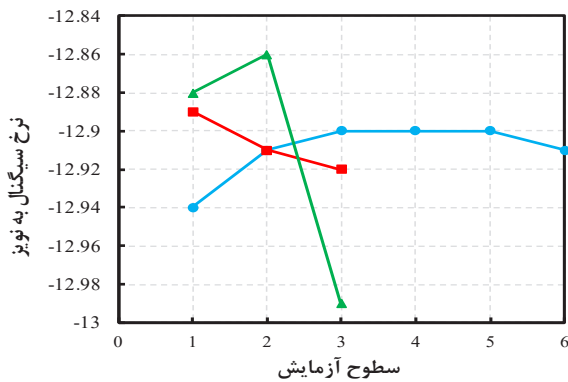
اسپری ریل (زاویه زیرین، تعداد و عرض اسپری ریل) بر میزان مقاومت کل، زاویه تریم و بالآمدگی برای شناور در شکل ۱۸ ارائه گردیده است.

نتایج حاصل از طرح آزمایش تاگوچی مربوط به زاویه خیز کف ۲۵ درجه با اسپری ریل‌های موازی کیل و نحوه اثرگذاری مولفه‌های هندسی در نظر گرفته شده برای



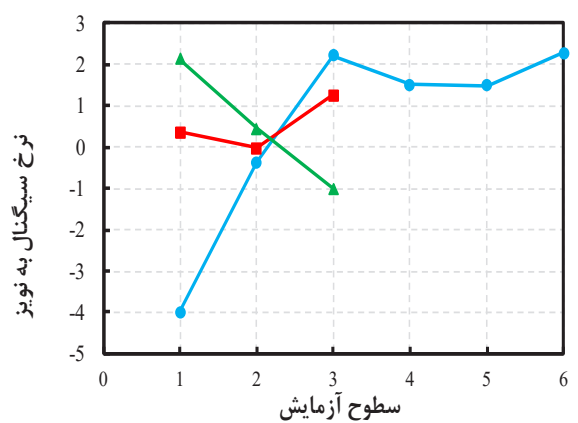
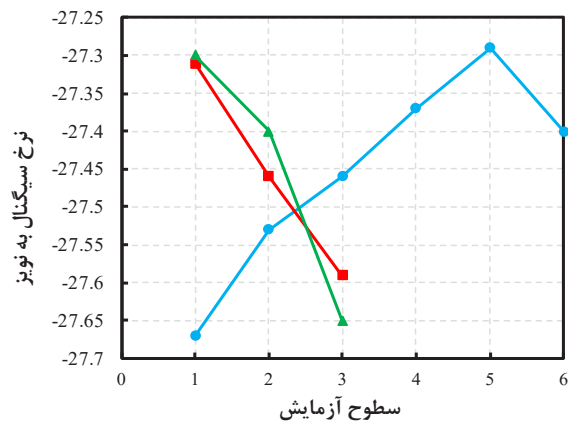
(ب) مقاومت کل ($Fr_B = 3/33$)

(الف) مقاومت کل ($Fr_B = 1/99$)



(د) زاویه تریم ($Fr_B = 3/33$)

(ج) زاویه تریم ($Fr_B = 1/99$)



(ت) بالآمدگی ($Fr_B = 3/33$)

(ه) بالآمدگی ($Fr_B = 1/99$)

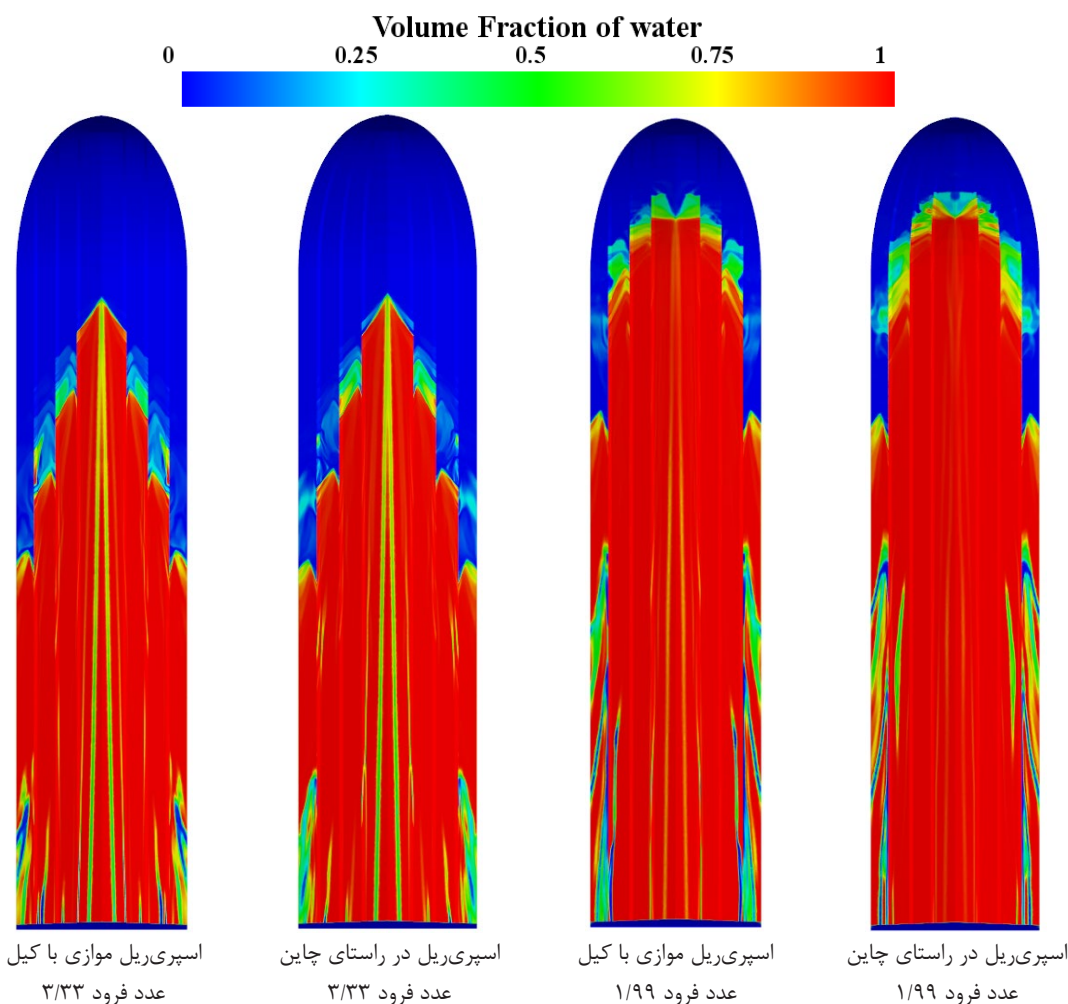
شکل ۱۸- تحلیل نتایج حاصل از طرح آزمایش تاگوچی برای شناور با زاویه خیز کف ۲۵ درجه و اسپری ریل‌های موازی با کیل

شناور مطابق شناور مجهز به اسپری ریل‌های در راستای چپین است. در شکل ۱۹ تاثیر دو راستای قرارگیری اسپری ریل‌ها در زاویه خیز کف ۲۵ درجه بر سطح خیس

نتایج مربوط به تحلیل‌های تاگوچی برای مقاومت شناور در حالت مورد بررسی در شکل ۱۸ (الف و ب) ارائه شده است. میزان حساسیت پارامترهای هندسی بر میزان مقاومت

جابه‌جایی و پروازی و در نهایت کاهش مقاومت شناور گردیده است. در نتیجه در حالت کلی اسپری‌ریل‌های موازی کیل عملکرد بهتری نسبت به اسپری‌ریل‌های راستای چاین داشته‌اند.

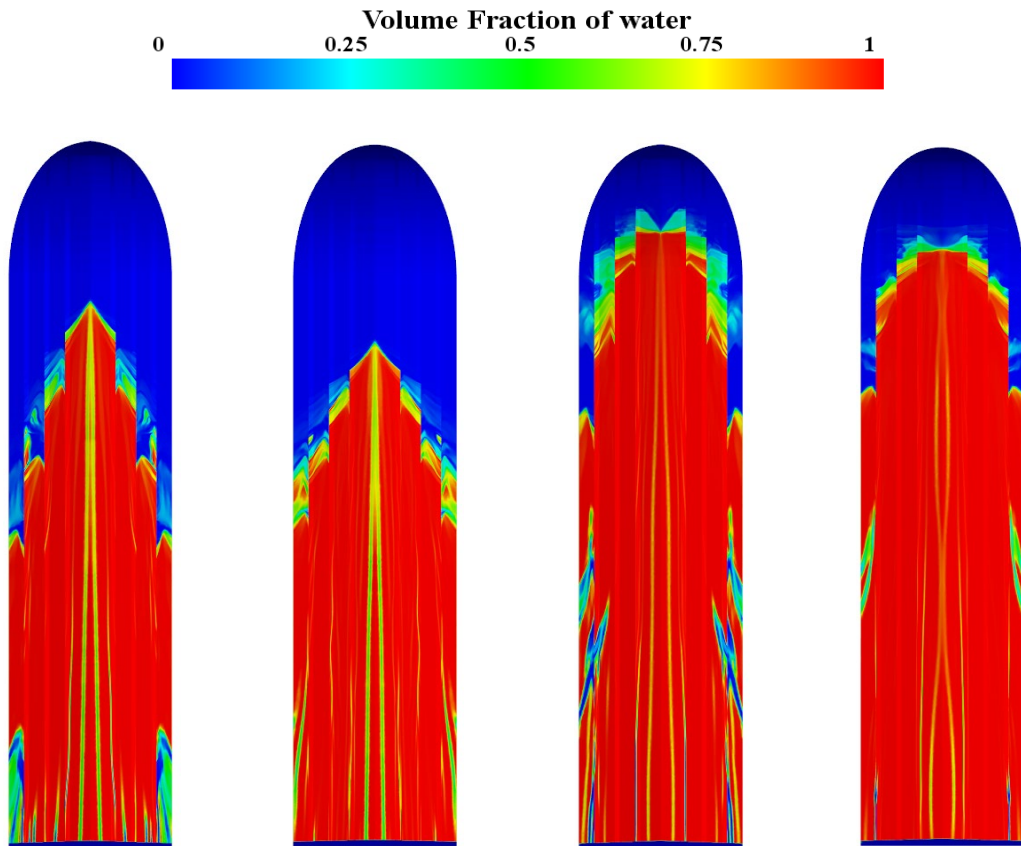
شناور برای آزمایشی با مشخصات زاویه زیرین ۴ درجه، نسبت عرض ۲ درصد و تعداد ۶ اسپری‌ریل نشان شده‌است. مشاهده می‌گردد که بکارگیری اسپری‌ریل‌های موازی با کیل موجب کاهش سطح خیس در هر دو حالت نیمه



شکل ۱۹- سطح خیس کف شناور در دو حالت قرارگیری اسپری‌ریل در زاویه خیز ۲۵ درجه

افزایش میزان اسپری آب در شناور شده‌است. بر این اساس استفاده از اسپری‌ریل در زاویه خیز کف ۲۵ درجه نسبت به زاویه خیز ۲۰ درجه، اثر بیشتری بر کاهش سطح خیس شناور از طریق کاهش سطح در معرض اسپری آب دارد.

در شکل ۲۰ سطح خیس کف شناور مجهز به اسپری‌ریل‌های موازی با کیل در دو زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه در آزمایشی با مشخصات زاویه زیرین ۸ درجه، نسبت عرض ۳ درصد و تعداد ۶ اسپری‌ریل، نشان داده شده‌است؛ مشاهده می‌شود که افزایش زاویه خیز کف موجب کاهش نیروی لیفت و افزایش سطح خیس در شناور گردیده است. همچنین افزایش زاویه خیز کف موجب



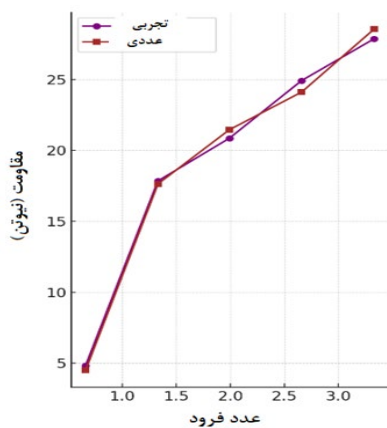
شکل ۲۰- سطح خیس کف شناور مجهز به اسپری ریل در آزمایش بیان شده

زاویه خیز کف ۲۵ درجه / عدد فرود عرضی ۳/۳۳ / زاویه خیز کف ۲۰ درجه

زاویه خیز کف ۲۵ درجه / عدد فرود عرضی ۱/۹۹ / زاویه خیز کف ۲۰ درجه

۵- اعتبارسنجی حل عددی

برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی، نتایج روش عددی با نتایج تجربی برای بدنه لخت (بدون اسپری ریل)، که در آزمایشگاه دریایی شهدای خلیج فارس توسط ابراهیمی [16] به دست آمده است، مقایسه شده‌اند. در شکل ۲۱، نتایج عددی و تجربی مربوط به مقاومت در محدوده عدد فرود ۰/۶۶ تا ۳/۳۳ مقایسه شده‌اند.



شکل ۲۱- مقایسه نتایج حل عددی و تجربی

نتایج مربوط به تحلیل تریم شناور (شکل ۱۸ ج و د) نشان می‌دهد که در حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی زاویه زیرین اسپری ریل تاثیر بیشتری نسبت به تعداد اسپری ریل‌ها بر مقدار تریم شناور داشته است؛ در حالی که در حالت پروازی این نسبت عکس می‌باشد که عامل آن افزایش نیروی لیفت در حالت پروازی به واسطه افزایش تعداد اسپری ریل‌ها می‌باشد. کاهش زاویه زیرین اسپری ریل موجب افزایش تریم شناور گردیده است که عامل آن افزایش نیروی لیفت می‌باشد به علاوه افزایش عرض و تعداد اسپری ریل‌ها به علت افزایش نیروی لیفت موجب افزایش زاویه تریم شناور گردیده است. در حالت مورد بررسی، زاویه زیرین اسپری ریل موثرترین مولفه هندسی بر میزان بالآمدگی شناور است که کاهش آن موجب افزایش بالآمدگی شناور شده‌است. همچنین افزایش عرض و تعداد اسپری ریل‌ها با افزایش میزان نیروی لیفت وارد بر بدنه، موجب افزایش بالآمدگی در شناور شده‌است.

- In: Bertram V, editor. HullPIC'17. 2nd Hull Performance & Insight Conference; 2017 Mar27- 29; Ulrichshusen.
- [3] L. Larsson and E. Baba, "Ship resistance and flow computations, Adv. Mar. Hydrodyn. vol. 5, pp. 1–75, 1996.
- [4] L. Larsson, R. Eliasson, and M. Orych, Principles of Yacht Design, no. Second Edition. 2000.
- [5] Jimboat, Tunnel Boat Performance News, "Don't Spray! - Spray Rail Design for Performance Boats", aero marine research, 2012.
- [6] E. P. Clement, "Reduction of planing boat resistance by deflection of the whisker spray," 1964.
- [7] 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.
- [8] S. 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.
- [9] G. Fridsma, "A Systematic Study of the Rough-Water Performance of Planing Boats (Irregular Waves - Part II), " Stevens Inst of Tech Hoboken NJ Davidson Lab, 1971.
- [10] "ITTC. Recommended procedures and guidelines. 75-03-02-03 2014b."
- [11] "ITTC. Practical guidelines for ship CFD applications. (75-03-02-03) Revision-01. 2011."
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] E. Begovic, "Numerical Modelling of a Planing Craft with a V-Shaped Spray Interceptor Arrangement in Calm Water, " in HSMV 2020: Proceedings of the 12th Symposium on High Speed Marine Vehicles, 2020, vol. 5, p. 33.
- [15] F. De Luca, S. Mancini, S. Miranda, and C. Pensa, "An extended verification and validation study of CFD simulations for

نتایج نشان می‌دهد که حداکثر خطای بین مقادیر عددی و تجربی حدود ۶/۵ درصد است. بر این اساس، شبیه‌سازی حاضر می‌تواند رفتار شناور را محاسبه و پیش‌بینی کند.

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

نیروی مقاومت همواره یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در طراحی این شناورها بوده است. مهم‌ترین عامل در ایجاد نیروی مقاومت، سطح خیس‌شده در معرض سیال آب است که به دو بخش سطح فشار و سطح خیس‌شده ناشی از پاشش آب تقسیم می‌شود. یکی از رایج‌ترین و مؤثرترین روش‌ها برای کاهش سطح خیس‌شده ناشی از پاشش آب، استفاده از زائده طولی اسپری ریل است. در مطالعه حاضر، نقش مشخصات هندسی اسپری ریل بر پارامترهای هیدرودینامیکی مقاومت، تریم و بالابآمدگی با استفاده از روش عددی بررسی گردیده است. مشخصات هندسی مورد بررسی شامل زاویه کف، عرض و تعداد اسپری ریل‌ها است که در دو موقعیت کلی موازی با کیل و در راستای چپین روی کف شناور قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، برای بررسی مشخصات هندسی اسپری ریل، از روش طراحی آزمایش‌ها (Taguchi) استفاده شده است و تأثیر مشخصات هندسی ذکر شده بر تعداد اجزای هیدرودینامیکی بر اساس روش سیگنال به نویز اندازه‌گیری شده است. با توجه به آزمایش‌های انجام گرفته مشخص گردید که شناور در حالت نصب اسپری ریل نسبت به حالت بدون اسپری ریل، تأثیر بهتری بر روی پارامترهای هیدرودینامیکی و رفتار شناور دارد؛ همچنین اسپری ریل‌های موازی با کیل، تأثیر قابل توجه‌تری در کاهش سطح خیس‌شده شناور نسبت به اسپری ریل‌های قرار گرفته در راستای چپین دارند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که اسپری ریل‌های موازی با کیل، نقش تأثیرگذارتری در کاهش مقاومت شناور نسبت به اسپری ریل‌های در راستای چپین دارند.

منابع

- [1] 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.
- [2] Park BJ, Shin MS, Ki MS, Lee GJ, Lee SB Experience in Applying ISO19030 to Field Data.

Shipbuilding 46: 183-188.
doi:10.35219/AnnUgalShipBuilding/2023
.46.23.

- [19] Ebrahimi A, Najafi A, Nadery A, Moghaddas A. 2024. Numerical study of the amount and effect of geometric characteristics of spray rail section on the hydrodynamic parameters of a high-speed planing vessel. *J. Ocean Eng. Mar. Energy*. doi:10.1007/s40722-024-00338-w.
- [20] Hajizadeh A, Gorji-Bandpy M. 2025. Numerical study of the effect of geometric characteristics of spray rail section on the hydrodynamic parameters of a high-speed planing craft. *Ships and Offshore Structures*.
<https://doi.org/10.1080/17445302.2025.2516677>.
- planing hulls,” *J. Sh. Res.*, vol. 60, no. 02, pp. 101–118, 2016.
- [16] Ebrahimi A, Shafaghat R, Hajiabadi A, Yousefifard M. 2022. 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. doi:10.1007/s11804-022-00295-6.
- [17] Ghadimi P, Sajedi S. M, Sheikholeslami M, Ghadimi A. 2023. Numerical Study of the Effect of Angle and Location of the First and Second Steps on the Performance of Planing Hull and Their Optimization Using the Taguchi Statistical Method. *Math. Probl. Eng.*, vol. 2023, pp. 1–18. doi:10.1155/2023/6881630.
- [18] Mitrofan A, Mandru A, Pacuraru F. 2023. Study on the position of the bow spray rail of a patrol vessel. *Annals of Dunarea de Jos, University of Galati. Fascicle XI*