

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1400.7.2.9.2

درصد همانندی: ۲۶٪

## تحلیل تجربی بررسی اثرات تغییر بارگذاری و موقعیت مرکز ثقل بر رفتار دینامیکی شناور تندرود تک بدنه در آب آرام

رحیم میرکی باصری<sup>۱</sup>، محمد حسین کریمی<sup>۲\*</sup>، ایرج رجبی<sup>۳</sup>

rahim.miraki.baseri@gmail.com

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

mhkarimi@mut-es.ac.ir

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

irajabi@mut.ac.ir

<sup>۳</sup> مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۸

### چکیده

تخمین رفتار دینامیکی شناورهای تندرود با بدنه سرشی، همواره یکی از دغدغه‌های طراحان شناورهای تندرود محسوب می‌شود. بررسی اثرات مربوط به تغییرات بارگذاری و موقعیت مرکز ثقل، با توجه به ابعاد نسبتاً کوچک و مدهای حرکتی این نوع شناورها، در مراحل طراحی، اهمیت زیادی دارد و بی‌توجهی کافی به این موضوع، ممکن است رفتار نهایی شناور را تحت تأثیر قرار دهد. در این پژوهش برای بررسی اثرات مربوط به تغییرات بارگذاری و موقعیت طولی مرکز ثقل بر رفتار دینامیکی یک شناور تندرود تک بدنه سرشی، مدل شناور بر اساس استاندارد ITTC ساخته شده و پس از آماده سازی و بالانس، آزمایش‌های مدل شناور در حوضچه کشش سرعت بالا، در آب آرام و دو حالت بارگذاری و چهار موقعیت مرکز ثقل طولی، در سرعت‌های مختلف انجام شده است. در هر مرحله از آزمایش (تعداد ۴۰ آزمایش)، مقاومت هیدرودینامیکی، زاویه تریم دینامیکی و جابه‌جایی دینامیکی مرکز ثقل مدل، اندازه‌گیری شده است و تعادل طولی و عرضی دینامیکی مدل نیز بر اساس مشاهده رفتار مدل به صورت کیفی ارزیابی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزایش وزن، افزایش مقاومت را به همراه خواهد داشت. همچنین افزایش فاصله موقعیت طولی مرکز ثقل از پاشنه مدل، کاهش مقاومت و تریم در مد حرکتی جابه‌جایی و افزایش مقاومت در مد سرشی را به همراه خواهد داشت. کاهش فاصله مرکز ثقل از پاشنه مدل، در کنار کاهش مقاومت و افزایش تریم در مد سرشی، در شرایط حدی عدم تعادل طولی مدل را نتیجه می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** شناور تندرود؛ مقاومت؛ تریم؛ رفتار دینامیکی؛ شکل بدنه سرشی

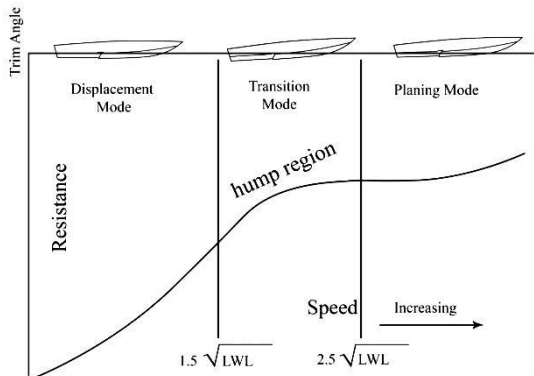
## ۱. مقدمه

شناورهای تندرو بدنه سرشی به شناورهایی گفته می شود که بدنه آنها بر اثر سرش و سر خوردن روی سطح آب، نیروی لیفت مناسبی تولید می کند. این نیرو به گونه ای است که بخشی از بدنه شناور بر اثر آن از سطح آب جدا شده و سطح خیس و طول آبخور شناور به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. در تعریف دیگر به شناورهایی گفته می شود که عدد فرود آنها بیشتر از ۱ باشد. در این محدوده است که نیروی هیدرودینامیک در برخورد با بدنه موجب ایجاد نیروی برابر<sup>۱</sup> روی شناور می شود.

شکل ۱ تغییرات نیروی مقاومت در هر سه رژیم حرکتی برای بدنه های سرشی را بر حسب تابعی از عدد فرود طولی نشان می دهد. وقتی فرود طولی شناور کمتر از  $0.5$  است شناور در حالت جابه جایی قرار دارد. وقتی فرود طولی بین  $0.5$  تا  $0.85$  قرار می گیرد، شناور در حالت گذرا قرار می گیرد و همانند حالت قبل با افزایش سرعت نیروی درگ نیز افزایش می یابد. در لحظه جابه جایی از این رژیم به حالت سرشی یک تغییر شیب در نمودار مقاومت اتفاق می افتد که در اصطلاح به آن گذر از ناحیه هامپ<sup>۲</sup> می گویند و پس از آن شناور به حالت سرشی دست پیدا می کند.

شکل خاص فرم بدنه های سرشی موجب می شود با افزایش سرعت شناور نیروی برا هیدرودینامیکی نسبت به نیروی شناوری<sup>۳</sup> به طرز قابل توجهی افزایش یابد. افزایش این نیروی برا و گشتاور ناشی از آن در کل به افزایش تدریجی زاویه تریم شناور و کاهش آبخور منجر می شود که سهم نیروی شناوری را بیش از پیش کاهش خواهد داد. اگر خود را تنها به درجه های آزادی حرکت خطی عمودی<sup>۴</sup> و حرکت زاویه ای طولی مقید کنیم، نیرو و گشتاورهای هیدرودینامیکی تابعی از سرعت، تریم دینامیکی و آبخور شناور خواهند بود. تریم دینامیکی و آبخور شناور نیز خود از تعادل نیروهای وارد بر آن (از قبیل نیروی شناوری، هیدرودینامیکی، وزن، نیروی رانش و ...) تعیین می شوند. لذا رابطه ای دوسویه بین نیروهای وارد از طرف سیال و وضعیت حرکتی شناور وجود دارد. این رابطه دوسویه اثری غیرخطی و پیچیده است و در حین

شتابگیری به رفتاری متفاوت برای شناورهای بدنه سرشی نسبت به انواع شناور از نوع بدنه جابه جایی منجر می شود. مراحل مختلف فاز شتابگیری و وضعیت حرکتی تندرو بدنه سرشی<sup>۵</sup> به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.



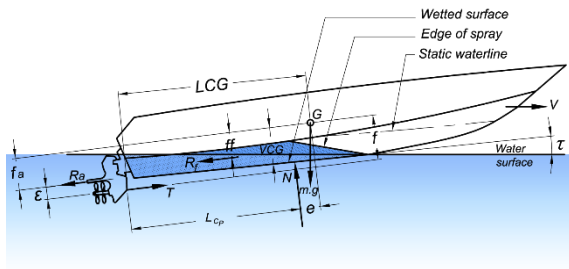
شکل ۱. تغییرات نیروی مقاومت و وضعیت حرکتی شناور با فرم بدنه سرشی در اعداد فرود مختلف

پژوهش های متعددی در زمینه شناورهای با شکل بدنه سرشی انجام شده است. به دلیل گستردگی پژوهش ها در سال های اخیر، روند تحقیقات سرعت بیشتری گرفته و هدفمندتر دنبال می شود. با توجه به استفاده گسترده از شناورهای تندرو با بدنه سرشی در صنایع مختلف نظامی، تفریحی و مسابقه ای، همواره تقاضا برای عرضه این نوع شناورها رو به افزایش است. استفاده مناسب و کاربردی از شناورهای سرشی مستلزم طراحی دقیق و شناخت رفتار دینامیکی بدنه در شرایط مختلف است. در سال های آغازین شروع پژوهش ها در زمینه شناورهای بدنه سرشی، محققان به دنبال راه های شناخت و بررسی حرکت این نوع از بدنه ها بوده اند که یکی از روش های مهم و کاربردی در این زمینه، شناخت پدیده های رخ داده در شرایط مختلف است. یکی از اولین پژوهش ها در زمینه شناورهای سرشی به منظور بررسی پدیده کوبش کف توسط فان کارمن [۱] انجام شد. اگرچه هدف او بررسی عملکرد شناورهای بدنه سرشی نبود، ولی آغازگر راهی شد که امروزه اساس کار بسیاری از پژوهشگران است. وی با در نظر گرفتن برخورد مقطع گوه ای شکل به سطح آب، نیروهای وارد بر سطح گوه ای شکل و جرم افزوده را محاسبه نمود. نکته قابل توجه در پژوهش فان کارمن استفاده از یک مقطع دوبعدی به جای مقطع سه بعدی و

چشم‌پوشی از بسیاری از پدیده‌ها از جمله پاشش آب و تغییرات شکل سطح آزاد بود که پیچیدگی معادلات را به اندازه قابل توجهی کاهش می‌داد. بعد از این پژوهش، کاری مشابه توسط واگنر [۲] انجام شد. او با در نظر گرفتن بالا آمدگی برای آب، عرض خیس مؤثر و نیروها را با دقت بیشتر محاسبه نمود؛ سپس رابطه‌ای برای جریان پتانسیل و توزیع فشار به دست آورد. جدای از نکات مثبت مدل ارائه شده توسط واگنر، به دلیل در نظر نگرفتن هیچ تحلیلی برای بعد از خیس شدن چاین‌ها اشکالاتی به کار وی وارد می‌شود که توسط پژوهشگران بعد از او این مشکل رفع شد. پس از مطالعات بالا، گرین [۳] و [۴] با ایده‌ای متفاوت از دو کار قبل، سبک متفاوتی از بررسی پدیده‌های سرشی را مطرح کردند. روابط ارائه شده توسط گرین شامل نیروی هیدرودینامیکی حاصل از حرکت یک ورق در آب آرام، مدل پاشش به وجود آمده و ضخامت آن و محاسبه مرکز نیروی هیدرودینامیکی بودند. نکته قابل توجه در مدل وی کارایی این مدل در طول‌های خیس متفاوت بود بدان معنا که برای هر طول خیس شده نتایج حاصل مقادیر متفاوتی را نشان می‌داد. پس از این پژوهش‌ها نیاز به دست آوردن نیروهای هیدرودینامیکی و همچنین مرکز فشار در کف شناور سرشی حس شد که برای رفع این خلأ مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در آزمایشگاه داویدسون آمریکا انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در دو گزارش توسط کروکوفسکی [۵-۶] ارائه شد. کوروین کروکوفسکی [۵] در سال ۱۹۴۹ نتیجه کل آزمایش‌های صورت پذیرفته را با یک رابطه تجربی برای به دست آوردن مرکز فشار ارائه نمود، سپس در سال ۱۹۵۰، کروکوفسکی [۶] یک رابطه تجربی دیگر برای محاسبه نیروی برا استخراج نمود. تمامی این روابط تابعی از طول خیس شناور بودند. در سال ۱۹۶۴ ساویتسکی [۷] با بهره‌گیری از آزمایش‌های صورت پذیرفته در آزمایشگاه داویدسون، تئوری‌های گرین [۳-۴]، مدل ارائه شده توسط واگنر [۲] و با تغییر روابط کروکوفسکی [۶] و مجموعه‌ای از معادلات تجربی را برای محاسبه نیروهای برا، پسا، سطح خیس، مرکز فشار و محدوده پایداری برای جلوگیری از ناپایداری طولی (پورپویزینگ)<sup>۷</sup>، بر حسب سرعت، تریم، زاویه ددرايز و

بارگذاری بر اساس معادلات آزمایشگاهی ارائه داد. ساویتسکی ویژگی‌های شناورهای سرشی منشوری و فیزیک حادث اطراف آن را با ارائه اشکالی مناسب به‌خوبی ترسیم نمود و در راستای فهم بهتر مسئله گام‌های اساسی برداشت. پژوهش‌های مطرح شده آغازگر مسیر کار روی شناورهای بدنه سرشی هستند. برای بررسی پدیده‌های رخ داده و بررسی جزئیات بدنه‌های سرشی، آزمایش مدل دقیق‌ترین روش مورد استفاده است. نسبت نیروی پسا به نیروی برا در شناورهای پرسرعت یک پارامتر اصلی برای ارزیابی راندمان هیدرودینامیکی بدنه‌های سرشی است [۸]. بگوویچ و برتورلو ۴ مدل شناور سرشی تک بدنه را در آزمایشگاه بررسی کردند. آن‌ها نتایج مربوط به طول خیس شده ناحیه فشار، ناحیه اسپری، زوایای پیش‌بینی شده خط ایستا، سطح خیس شده و ناحیه پاشش، ضریب مقاومت باقی مانده و مقدار جابه‌جایی دینامیکی مرکز ثقل<sup>۸</sup> را به دست آوردند [۹]. فو و همکاران [۱۰] مقایسه نتایج آزمایش مدل و شبیه‌سازی عددی را برای یک نوع بدنه سرشی که در آب آرام و موج کار می‌کند را انجام دادند. تجزیه و تحلیل نتایج عددی نشان می‌دهد که مقدار مقاومت در آب آرام بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده و تریم دینامیکی کمتر از مقدار پیش‌بینی شده است. پنینو و همکاران [۱۱] آزمایش‌های یک مدل شناور سرشی را در حوضچه کشش و با استفاده از نرم‌افزار STAR-CCM+ انجام دادند و نتایج حاصل از هر دو روش را برای مقاومت، مقدار جابه‌جایی دینامیکی مرکز ثقل و مقدار تریم دینامیکی با هم مقایسه کردند که اختلاف نتایج روش عددی و تست مدل برای مقاومت حدود ۱۰ درصد، تریم دینامیکی حدود ۲۰ درصد و مقدار جابه‌جایی دینامیکی مرکز ثقل حدود ۳۰ درصد بوده است. سوکاس و همکاران [۱۲] نیز آزمایش‌های آب آرام را در حوضچه کشش و شبیه‌سازی‌های CFD را با نرم‌افزار STAR-CCM+ انجام دادند و مقایسه کیفی بین نتایج را ارائه کردند. نتایج حاصل نشان از نزدیکی نتایج تجربی و عددی برای مقادیر مقاومت مقدار جابه‌جایی دینامیکی مرکز ثقل بود ولی مقدار تریم در سرعت‌های بالا برخلاف پیش‌بینی‌ها بوده است. بروگلیا و همکاران [۱۳] یک شبیه‌سازی CFD و آزمایش مدل به‌منظور

پارامترها و نیروهای وارد بر شناور بدنه سرشی در حرکت روبه جلو ارائه شده است.



شکل ۲: معرفی پارامترهای شناور بدنه سرشی در حالت دینامیکی و حرکت روبه جلو

تست مدل شناورهای تندرو در حوضچه کشش از منظرهای فراوانی شبیه شناورهای جابه‌جایی متعارف است. تفاوت‌های عمده ناشی از عوامل زیر است:

- نیروی برا و تریم دینامیکی اهمیت بیشتری دارد؛
- تأثیرات جریان هوا بر بخش بالای آب مهم بوده و می‌تواند تریم دینامیکی را متأثر کند؛
- اثرات مقیاس روی سطوح بالابرنده و ملحقات می‌تواند در دسرساز شود.

برای تعیین ابعاد مدل و قیدها و محدودیت‌های آزمایش مدل لازم است که موارد زیر مدنظر قرار گیرد:

اثرات مقیاس در آزمایش‌های هیدرو دینامیکی تا حد زیادی همچنان ناشناخته است؛ بنابراین از این منظر مناسب است که طول مدل در حدی بزرگ در نظر گرفته شود که اثرات مقیاس تا حد امکان کاهش یابد. نسبت مساحت مقطع مدل به مساحت حوضچه بسیار اهمیت دارد. کم بودن عرض حوضچه به عرض مدل باعث بروز اثر دیواره‌ها و کم بودن نسبت عمق مدل به عمق حوضچه باعث اثرات کف و اثرات آب کم عمق می‌شود. اگر مساحت مطلوب رعایت نشود، عبور آب از جلو به عقب مدل با اختلاف فشار و تغییرات سرعت سیال همراه خواهد بود که با حرکت در آب آزاد و عمیق متفاوت است. پس نتایج را با خطا مواجه خواهد کرد. بیش از حد کوچک بودن مدل نیز باعث وجود جریان آرام بر روی بدنه و نیاز به مغشوش کردن

اعتبارسنجی را برای مقاومت، تریم دینامیکی و مقدار جابه‌جایی دینامیکی مرکز ثقل انجام دادند و با استفاده از حل URANS نتایج را به دست آوردند. با بررسی نتایج و مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی مشخص شد که اختلاف دو روش برای مقاومت حدود ۹ درصد، تریم دینامیکی ۵ درصد و مقدار جابه‌جایی دینامیکی مرکز ثقل ۸ درصد بود. جاج و همکاران [۱۴] نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی یک شناور بدنه سرشی در آب آرام را با هم مقایسه کردند. نتایج کلی شامل ارزیابی هر دو روش در سرعت‌های بالا برای به دست آوردن مقاومت، مقدار جابه‌جایی دینامیکی مرکز ثقل و تریم دینامیکی هستند.

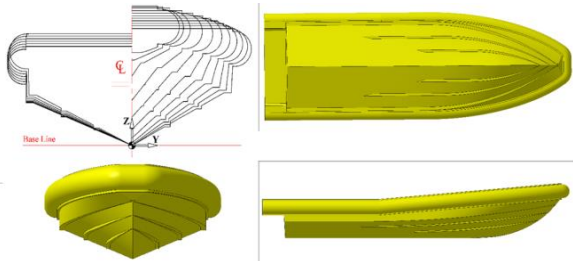
آنچه در تحقیق حاضر دنبال می‌شود، ارائه راهکاری مناسب برای بررسی مشخصه‌های هیدرو دینامیکی و حرکات شناور تندرو بدنه سرشی مبتنی بر طراحی، ساخت و تجهیز یک مدل آزمایشگاهی به منظور آزمایش هیدرو دینامیکی در حوضچه کشش سرعت بالا است. با انجام آزمایش‌های مورد نیاز با چنین مدلی می‌توان تقریب مناسبی از رفتار شناور، تریم مناسب و توان مورد نیاز رانش در حالت‌های مختلف بارگذاری (وزن و محل مرکز ثقل) در رژیم‌های مختلف حرکتی به دست آورد.

## ۲. تعریف فیزیکی مدل

به طور کلی، شناورهای جابه‌جایی در اعداد فرود طولی کمتر از ۰/۵ به فعالیت می‌پردازند ولی شناورهای بدنه سرشی عدد فرود طولی بزرگ‌تر از یک دارند، در واقع با گسترش نیروی لیفت دینامیکی بر روی کف بدنه، شناور سرشی بر روی سطح آب قرار گرفته و مقاومت اصطکاکی و موج سازی آن به شدت کاهش می‌یابد. عمده وزن بدنه به وسیله لیفت هیدرو دینامیکی تحمل می‌شود و مساحت بخش مغروق بدنه در مقایسه با بدنه‌های جابه‌جایی بسیار کوچک است. بدنه‌های سرشی اغلب یک کف V شکل و حداقل یک دندان یا چاین<sup>۹</sup> دارد. چنین ساختاری به شناور کمک می‌کند تا لیفت هیدرو دینامیکی مورد نظر را تولید نموده و در شرایط سرشی قرار بگیرد.

در این پژوهش شناور از نوع تک بدنه سرشی، از نوع V شکل با زاویه ددرایز  $\beta$  و عرض B است. در شکل ۲ شماتیکی از

استفاده از دستگاه تراش سی. ان. سی. ساخته شد و ابعاد آن با رواداری<sup>۱۰</sup> بر اساس رویه‌های مؤسسه ITTC کنترل شده است. در شکل ۳ نمایی از مدل سه‌بعدی و خطوط بدنه شناور و در جدول‌های ۱ و ۲ ابعاد و مشخصات نهایی مدل و انواع بارگذاری ارائه شده است.



شکل ۳. خطوط بدنه و نمایی از بدنه شناور تندرو مورد ارزیابی

جدول ۱. مشخصات مدل شناور

ردیف	مشخصه	مقدار
۱	وزن سنگین	۹۶ کیلوگرم
۲	وزن سبک	۸۴ کیلوگرم
۳	فاصله طولی مرکز ثقل از عمود پاشنه (موقعیت ۱)	۰/۷ متر
۴	فاصله طولی مرکز ثقل از عمود پاشنه (موقعیت ۲)	۰/۸ متر
۵	فاصله عمودی مرکز جرم از خط مبنا (کف شناور)	۰/۲۲ متر
۶	طول کلی	۲/۷ متر
۷	طول بین دو عمود	۲/۲۳ متر
۸	آبخور در حالت بار کامل	۰/۱۶ متر

### ۳. مشخصات حوضچه کشش

این آزمایش‌ها در حوضچه کشش ملی دریایی خلیج فارس انجام و مشخصات اصلی این حوضچه در جدول شماره ۲ و تصویری از ارابه حمل‌کننده آن در شکل ۴ ارائه شده است. سیستم اندازه‌گیری مورداستفاده در حوضچه آزمایش شده از نوع ارابه ریلی سررنشین دار بوده و قابلیت اندازه‌گیری پارامترهای مختلف هیدرودینامیکی را دارد.

عمق جریان اطراف بدنه می‌شود؛ زیرا جریان روی سطح شناورهای واقعی مغشوش است.

در بیشتر آزمایش‌ها مدل به نحوی به دستگاه متصل است که آزادی حرکت هیو و پیچ وجود داشته و درجه آزادی رول مفید است. در برخی آزمایش‌های خاص نیز ممکن است مدل کاملاً مقید باشد. هنگام تنظیم کردن محور مدل نسبت به محور وسط حوضچه باید بسیار دقت کرد. این زاویه لازم است قبل و بعد از انجام تست کنترل شود. شرایط بارگذاری مدل (آبخور سینه و پاشنه) نیز لازم است قبل و بعد از هر آزمایش بررسی شود.

در مدل شناور سرشی بسیار مناسب است که مدل روسازه‌ای داشته باشد که در حد امکان شبیه شناور اصلی باشد؛ زیرا در عمل تأثیرات جریان هوا روی تریم و وضعیت حرکتی مدل شناورهای تندرو مهم است. هرچند که در حال حاضر درک خاصی از نحوه این تأثیرات وجود ندارد، ولی با تأمین روسازه مناسب می‌توان شرایطی نزدیک‌تر به واقعیت ایجاد نمود. مدل لازم است به نحو مناسبی خط‌کشی شده تا بتوان در حین آزمایش سطح خیس آن را تخمین زد. نیروی کشش اعمالی بر شناور تندرو باید طوری باشد که حداکثر شباهت به نیروی پیشرانس را داشته باشد. این موضوع سبب می‌شود که تأثیرات تریم مصنوعی بر اثر نیروی کشش حذف شود. راه‌حل مناسب برای حصول آن اعمال نیروی کشش در راستای شافت پروانه است. در صورتی که این کار غیرممکن باشد، با جابه‌جایی مرکز ثقل باید تریم اضافی تولیدشده را خنثی کرد. در صورتی که درون مدل تجهیزاتی وجود دارد که باید با ارابه اتصال داشته باشند، باید اطمینان حاصل نمود که کابل‌های اتصال نیرویی روی مدل اعمال نمی‌کنند؛ بنابراین حالت ایده-آل این است که کابل‌های اتصال قائم باشند.

با توجه به قیدها و محدودیت‌های بیان‌شده و بر اساس مشخصات فنی حوضچه کشش خلیج فارس، اندازه مدل بر اساس مشخصات فنی ارائه‌شده در جدول ۱ در نظر گرفته شد. برای بررسی اثرات مربوط به تغییرات بارگذاری و موقعیت طولی مرکز ثقل بر رفتار دینامیکی یک شناور تندروی تک بدنه با فرم بدنه سرشی و طول ۲/۷ متر، مدل شناور مدل با

جدول ۳. وضعیت بارگذاری و هیدرواستاتیک مدل

حالات بارگذاری	وزن مدل (کیلوگرم)	موقعیت طولی مرکز ثقل از پاشنه (متر)	آبخور پاشنه از خط مبنا (میلی متر)	آبخور سینه از خط مبنا (میلی متر)	تیریم استاتیکی (درجه)
حالت ۱	۹۶	۰/۸	۱۶۸/۸	۱۱۸/۲	۱/۳۰
		۰/۷	۱۹۳/۹	۷۷/۵	۲/۹۷
حالت ۲	۸۴	۰/۸	۱۵۹/۲	۱۰۹/۲	۱/۲۹۷
		۰/۷	۱۸۰/۴	۷۳/۸	۲/۷۶



شکل ۴. نمایی از ارابه کشش حوضچه آزمایشگاه ملی دریایی خلیج فارس

جدول ۲. مشخصات حوضچه کشش

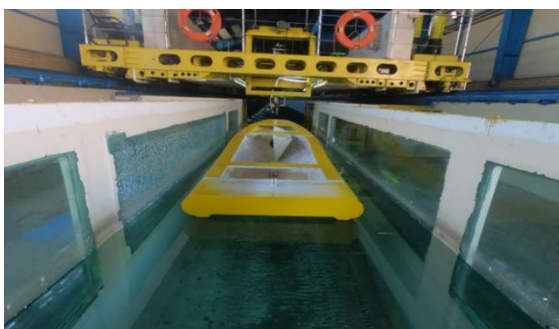
ردیف	پارامتر	مقدار
۱	طول حوضچه	۴۰۰ متر
۲	عرض حوضچه	۶ متر
۳	عمق حوضچه	۴ متر
۴	سرعت ارابه کشش	۱۸ متر بر ثانیه
۴	چگالی آب حوضچه	۱۰۰۲ کیلوگرم بر مترمکعب
۶	دمای آب	۲۱ درجه سانتی گراد



شکل ۶. ساخت، رنگ آمیزی و خط کشی مدل



شکل ۷. تنظیم مرکز ثقل و ممان اینرسی مدل



شکل ۸. تنظیم آبخور، زاویه غلتش عرضی و طولی مدل



شکل ۵. موقعیت شناور در حوضچه

در شکل ۵ نمایی از شناور و موقعیت پتانسیومترها نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، روی شناور ۲ پتانسیومتر و یک لود سل برای محاسبه مقاومت نصب شده است.

#### ۴. تنظیم مرکز ثقل، آبخور و تیریم مدل

مدل جهت تنظیم وزن و موقعیت مرکز ثقل طبق با اطلاعات جدول ۳، در حوضچه هیدرواستاتیک به آب اندازی شده و با استقرار وزنه های لازم، تنظیمات آبخور ثقل انجام پذیرفت. در شکل های ۶ تا ۸ روند آماده سازی مدل برای انجام آزمایش های هیدرو دینامیکی نشان داده شده است.

	Fr= ۰/۲۲		Fr= ۲/۲	
	Value	% CT	Value	% CT
$C_T$	۰/۰۱۲		۰/۰۰۵	
$B_{CT}$	۰/۰۰۰۴۱۷	۲/۰۱	۰/۰۰۰۲۱۳	۲/۰۹
$P_{CT}(S)$	۰/۰۰۰۶۲۱	۲/۹۹	۰/۰۰۰۰۹۶۱	۰/۹۴
$P_{CT}(M)$	۰/۰۰۰۲۷۸	۱/۲۳	۰/۰۰۰۰۴۳۰	۰/۴۲
$U_{CT}(S)$	۰/۰۰۰۷۴۸	۳/۶	٪ ۰/۰۲	۲/۳
$U_{CT}(M)$	۰/۰۰۰۵۰۱	۲/۴۱	٪ ۰/۰۲	۲/۱۴

جدول ۵: درصد عدم قطعیت و خطای ضریب مقاومت کل

## ۶. تحلیل رفتار دینامیکی مدل شناور در مدهای مختلف حرکتی

در این قسمت آزمایش‌های مدل مطابق با شرایط بارگذاری جدول ۳ و در حالتی که شناور مدل در جهات عمودی و تریم دینامیکی دارای آزادی حرکت باشد، در ۱۰ سرعت، از سرعت ۱/۱۲ متر بر ثانیه معادل عدد فرود ۰/۲ تا سرعت ۱۱/۵ متر بر ثانیه معادل عدد فرود طولی ۲/۲ انجام شده است و پارامترهای دینامیکی مقاومت مدل، تریم و جابه‌جایی دینامیکی مرکز ثقل اندازه‌گیری شده‌اند.

شکل ۹ نشان‌دهنده آزمایش مدل در عدد فرود ۰/۲۲ است. همان‌طور که در شکل مشخص است اغتشاش حول مدل اندک و سطح موج‌سازی نیز بسیار پایین است. به دلیل سرعت کم نیز مطابق با شکل مقدار بالا آمدگی و تریم دینامیکی شناور بسیار ناچیز بوده است. در این سرعت‌ها شناور فاقد نیروی برا بوده و کاملاً در حالت نیمه جابه‌جایی قرار دارد.

شکل ۱۰ نشان‌دهنده آزمایش مدل در سرعت ۳/۴۵ متر بر ثانیه معادل عدد فرود ۰/۶۷ است. خطوط بدنه این شناور قابلیت مناسبی در جدا کردن جریان اسپری آب از حول بدنه از خود نشان داده است. تریم دینامیکی شناور همان‌طور که در شناورهای بدنه سرشی انتظار می‌رود، با افزایش سرعت در حال افزایش است. بالا آمدگی سینه شناور نیز قابل توجه بوده و آب‌خور شناور تنها در حد ۳۰ درصد شرایط سکون است.

## ۵. تجزیه و تحلیل عدم قطعیت

هر آزمایش بر اساس محدودیت‌های موجود در ساخت، نصب و انجام آزمایش عدم قطعیت‌هایی دارد. این عدم قطعیت‌ها باید به‌دقت بررسی و محاسبه شده تا بتوان در خصوص اطلاعات استخراج‌شده از آزمایش اظهارنظر نمود. در آزمایش‌های انجام‌شده عدم قطعیت کل آزمایش بر اساس روش ارائه‌شده در ITTC 2002 محاسبه شده است. بر اساس روش یادشده منابع عدم قطعیت در تست‌های مقاومت-سرعت شناور در حوضچه کشش شامل موارد زیر است:

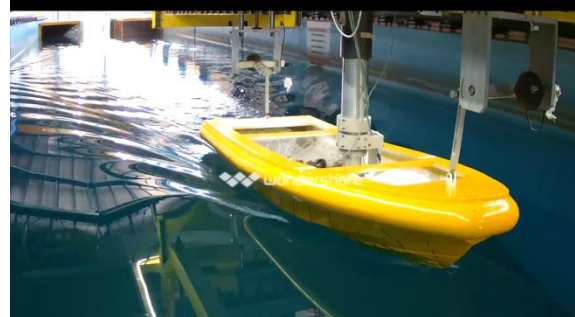
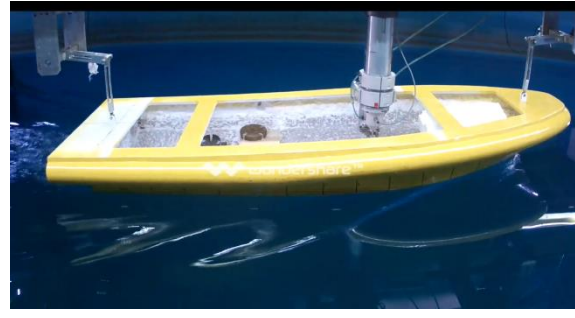
- طول مدل ( $B_L$ )؛
- سطح خیس شده ( $B_S$ )؛
- دما ( $B_T$ )؛
- چگالی ( $B_p$ )؛
- ویسکوزیته ( $B_\gamma$ )؛
- سرعت مدل ( $B_V$ )؛
- مقاومت ( $B_R$ )؛
- ضریب مقاومت کل ( $B_{CT}$ ).

بر اساس پارامترهای ارائه‌شده، درصد عدم قطعیت در دو عدد فرود ۰/۲ و ۲/۲ محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است.

بر اساس محاسبات انجام‌شده در جدول ۴، مقادیر عدم قطعیت برای ضریب کل مقاومت در جدول ۵ ارائه شده است.

	Fr= ۰/۲۲		Fr= ۲/۲	
	Value	% of Value	Value	% of Value
L (m)	۲/۷		۲/۷	
$B_L$ (m)	۰/۰۰۲	۰/۱۰	۰/۰۰۲	۰/۱۰
S(m <sup>2</sup> )	۱/۴۵		۰/۸۲	
$B_S$ (m <sup>2</sup> )	۰/۰۰۹۲	۱/۹۷	۰/۰۰۹۲۰	۱/۹۷
V (m/s)	۱/۱۵		۱/۱۵	
$B_V$ (m/s)	۰/۰۰۳۵۷	۰/۱۶	۰/۰۰۳۵۷	۰/۱۶
$R_T$ (N)	۱۵		۲۲۰	
$B_R$ (N)	۰/۱۲	۰/۲۵	۰/۱۲	۰/۱۶
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	۱۰۰۲		۱۰۰۲	
$B_\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	۰/۱۲	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۰۱
T (°C)	۲۱		۲۱	
$B_T$ (°C)	۰/۵	۲/۹۴	۰/۵	۲/۹۴
$\gamma$ (m/s <sup>2</sup> )	۰/۰۰۰۰۰۱۰۸		۰/۰۰۰۰۰۱۰۸	
$B_\gamma$ (m/s <sup>2</sup> )	۰/۰۰۰۰۰۰۱۳۹	۱/۲۸	۰/۰۰۰۰۰۰۱۳۹	۱/۲۸
$C_T$	۰/۰۱۲		۰/۰۰۵	
$B_{CT}$	۰/۰۰۰۴۱۷	۲/۰۱	۰/۰۰۰۴۱۷	۲/۱۰

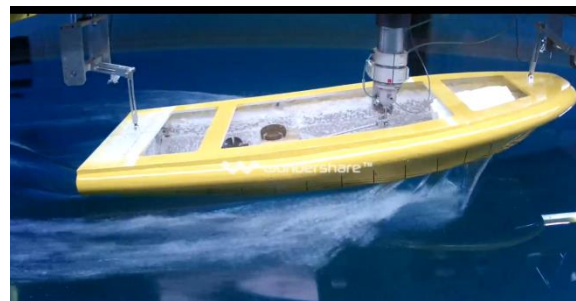
جدول ۴: درصد عدم قطعیت و خطای پارامترهای مختلف



شکل ۱۱. الگوی جریان اطراف مدل شناور در سرعت  $6.9 \text{ m/s}$  معادل  $F_n=1.34$

شکل ۹. الگوی جریان اطراف مدل شناور در سرعت  $1.15 \text{ m/s}$  معادل  $F_n=0.22$

شکل ۱۲ نشان‌دهنده آزمایش مدل در عدد فرود  $2/2$  نظیر سرعت  $11/5$  متر بر ثانیه است که شرایط سرشی کاملاً تأمین شده، تریم دینامیکی شناور کاهش یافته و مقدار بال‌آمدگی آن در حداکثر مقدار خود است. بدنه نیز نسبتاً به‌طور کامل از آب جدا شده است.



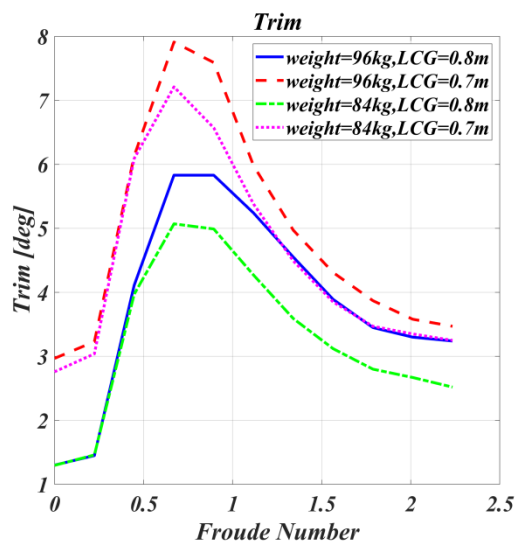
شکل ۱۰. الگوی جریان اطراف مدل شناور در سرعت  $3.45 \text{ m/s}$  معادل  $F_n=0.67$

در شکل ۱۱، الگوی جریان اطراف مدل شناور در سرعت  $6/9$  متر بر ثانیه معادل عدد فرود  $1/34$  نشان داده شده است.

شکل ۱۲. الگوی جریان اطراف مدل شناور در سرعت  $11.5 \text{ m/s}$  معادل  $F_n=2.2$



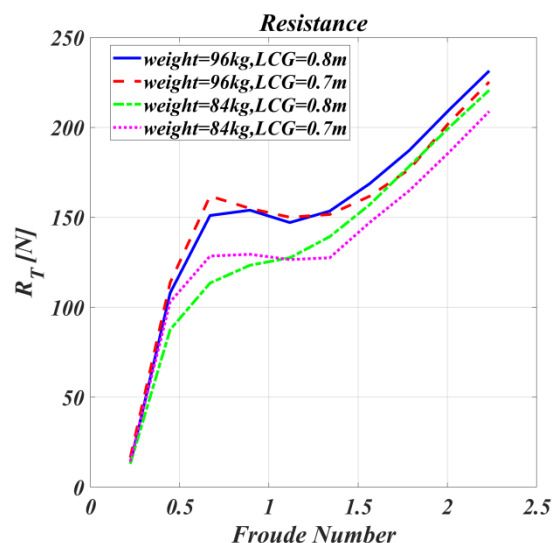
افزایش مقدار وزن شناور موجب افزایش مقدار مقاومت شناور می‌شود. به طوری که افزایش مقاومت در شروع پلن کردن شناور به طور مشهودی در شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود. بنابراین وزن شناور در وقوع این پدیده بسیار مؤثر است زیرا اگر وزن شناور زیادتر از حد معمول باشد، ممکن است که برای شناور مود سرشی رخ ندهد. موقعیت مرکز ثقل شناور نیز در مقاومت و تریم دینامیکی آن مؤثر است. با توجه به شکل ۱۳، هر چه موقعیت مرکز ثقل به پاشنه شناور نزدیک‌تر باشد (متناظر با LCG کمتر) مقاومت شناور در شروع سرش بیشتر خواهد بود، اما برای افزایش سرعت، LCG کمتر متناظر با مقاومت کمتر خواهد بود؛ زیرا هر چه مرکز ثقل به پاشنه نزدیک‌تر شود، جدا شدن سینه شناور از آب آسان‌تر خواهد بود. تریم دینامیکی شناور در شکل ۱۴ در سرعت‌های مختلف نشان داده شده است.



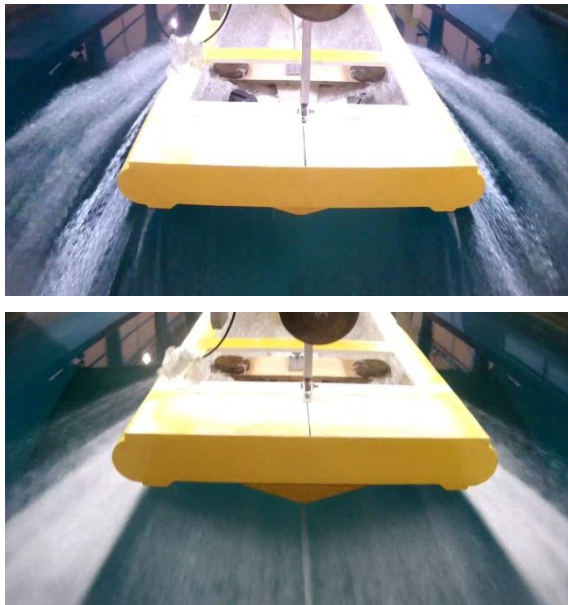
شکل ۱۴. نمودار تریم دینامیکی مدل شناور برحسب عدد فرود در بارگذاری‌های مختلف

همان‌طور که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ملاحظه می‌شود با جابه‌جایی موقعیت طولی مرکز ثقل به سمت پاشنه شناور ممان کل به وجود آمده باعث تریم شناور به سمت پاشنه خواهد شد، در نتیجه به دنبال آن افزایش فشار هیدرو دینامیکی و همچنین کاهش سطح خیس شده را خواهیم داشت. بدنه با آب‌خور کمتری حرکت می‌کند و در نتیجه بدنه سواری بسیار مطلوب‌تری را ارائه می‌کند؛ زیرا مقاومت اصطکاکی کاهش

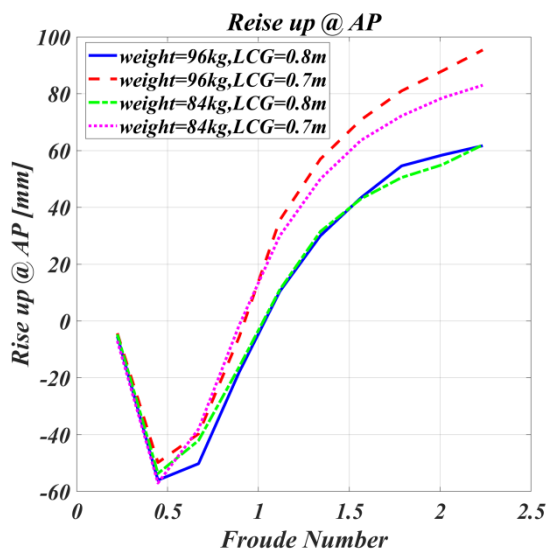
مطابق شکل ۱۳، در آغاز حرکت شناور در مود جابه‌جایی قرار دارد. سپس مود سرشی شناور که همراه با کاهش آب‌خور و افزایش تریم دینامیکی است شروع می‌شود. شناور قبل از حالت سرشی کامل به طور معمول با یک قله در مقاومت<sup>۱۱</sup> روبه‌رو می‌شود. عبور از این قله برای ادامه افزایش سرعت شناور حیاتی است. پس از طی این مرحله تریم دینامیکی پایین‌تر می‌آید که توأم با کاهش مقاومت و افزایش سرعت است. در این حالت اصطلاحاً شناور سوار بر سطح آب شده یا پلن کرده است. در ادامه حرکت، مقاومت شناور دوباره روندی صعودی خواهد داشت تا با توجه به نیروی رانش موجود سرعت شناور به یک مقدار پایا برسد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، مقاومت شناور در عدد فرود ۲/۲ در بیشترین حالت به حدود ۲۵ درصد وزن شناور رسیده است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب خطوط بدنه و المان‌های هیدرو دینامیکی شناور است. در محدوده اعداد فرود ۰/۹ تا ۱/۱ انتقال به رژیم حرکتی سرشی رخ داده است. همان‌طور که در منحنی مقاومت نیز مشخص است در این محدوده تغییرات مقاومت نسبت به سرعت با نرخ کمتری رخ داده است که به دلیل افزایش قابل توجه بالا آمدگی شناور در این محدوده است.



شکل ۱۳. مقدار نیروی مقاومت در عدد فرودهای مختلف در حالت‌های مختلف بارگذاری



شکل ۱۵. نحوه بالا آمدگی پاشنه مدل شناور با افزایش سرعت



شکل ۱۶. نمودار بالا آمدگی پاشنه مدل شناور بر حسب عدد فرود

یافته است. بنابراین در شناورهای بدنه سرشی مطلوب آن است که موقعیت طولی مرکز ثقل به سمت پاشنه شناور نزدیک شود تا نیروی مقاومت شناور در سرعت‌های بالا کاهش یابد و سواری مطلوب داشته باشیم اما بایستی به این نکته توجه داشت که موقعیت طولی مرکز ثقل شناور نمی‌تواند بیش از حد به پاشنه شناور نزدیک شود زیرا شناور هنگام سرش ممکن است دچار ناپایداری دینامیکی پروپوزینگ<sup>۱۲</sup> شود. بنابراین بسیار ضروری است که شناور طوری طراحی شود که تا تعادلش را در زاویه تریم منطقی و مطلوب داشته باشد.

بدنه‌های معمول جابه‌جایی در عمل توانایی ایجاد نیروی برا را ندارند. تجارب موجود نشان‌دهنده این است که با افزایش سرعت حول بدنه‌های جابه‌جایی تا عدد فرود ۰/۴ به تدریج موج‌سازی شناور افزایش می‌یابد. از سوی دیگر هر چه سرعت بیشتر می‌شود، تریم دینامیکی با پاشنه در اکثریت موارد آن قدر زیاد می‌شود که پاشنه به شدت در آب فرو می‌رود. بدنه نیز قادر به تولید نیروی برا نبوده و حتی افزایش آبخور ناشی از اسکوات آب عمیق در سرعت‌های بالا نیز رخ می‌دهد تا اینکه بدنه کاملاً در آب فرو رفته و موج تولیدشده کل بدنه را در سرعت‌های بالا در بر می‌گیرد. این رفتار در محدوده سرعت-های جابه‌جایی برای بدنه‌های فرم سرشی نیز مشاهده می‌شود که در نمودار شکل ۱۵ تا ۱۷ مشخص است. تریم دینامیکی شناور به شدت زیاد شده و بدنه در آب فرو رفته است. اما از عدد فرود ۱/۰ به بعد تریم دینامیکی ثابت شده و با افزایش سرعت حتی با شیب قابل توجهی کم می‌شود. از طرف دیگر هم‌زمان با کاهش تریم دینامیکی شناور بالا آمدگی قابل توجهی پیدا کرده است. این امر در نتیجه عملکرد مناسب سطوح بالا برنده سرشی در فرم بدنه شناور مورد بررسی است.



خطوط بدنه، تعیین موقعیت مناسب مرکز ثقل به منظور کاهش پسا، پایداری دینامیکی مطلوب شناور و تخمین مقدار توان مورد نیاز رانش به منظور انتخاب سیستم رانش انجام شد. بر اساس داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده، جمع بندی به شرح زیر است:

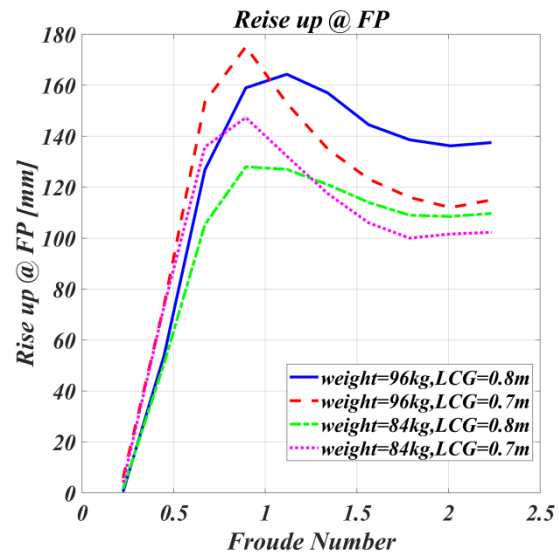
۱- افزایش مقدار وزن شناور موجب افزایش مقدار مقاومت شناور می‌شود. به طوری که افزایش مقاومت در شروع پلن کردن شناور به طور مشهودی نتایج مقاومت - سرعت ملاحظه شد. بنابراین وزن شناور در وقوع سرشی بسیار مؤثر است، زیرا اگر وزن شناور زیادتر از حد معمول باشد، ممکن است که پدیده سرش برای شناور رخ ندهد. همچنین افزایش وزن موجب بیشتر شدن زاویه تریم دینامیکی شناور در همه سرعت‌های سرشی می‌شود؛

۲- موقعیت مرکز ثقل شناور نیز در مقاومت و تریم دینامیکی آن مؤثر است. با توجه به نتایج به دست آمده، هر چه موقعیت مرکز ثقل به پاشنه شناور نزدیک تر باشد (متناظر با LCG کمتر) مقاومت شناور در شروع مود سرشی بیشتر خواهد بود، اما برای افزایش سرعت، LCG کمتر متناظر با مقاومت کمتر خواهد بود؛ زیرا هر چه مرکز ثقل به پاشنه نزدیک تر شود، جدا شدن سینه شناور از آب آسان تر خواهد بود؛

۳- همان طور که اشاره شد در شناورهای بدنه سرشی مطلوب آن است که موقعیت طولی مرکز ثقل به سمت پاشنه شناور نزدیک شود تا پسا شناور در سرعت‌های بالا کاهش یابد، اما بایستی به این نکته توجه داشت که LCG شناور نمی‌تواند بیش از حد به پاشنه شناور نزدیک شود؛ زیرا شناور هنگام سرش ممکن است، دچار ناپایداری دینامیکی پورپوزینگ شود که این موضوع بایستی حتماً در طراحی و جانمایی این نوع شناورها مدنظر قرار گیرد.

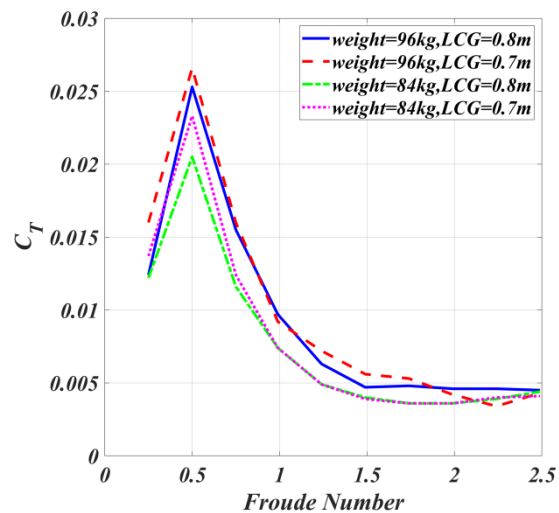
### سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بدینوسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از کارشناسان محترم آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس برای فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی این پژوهش ابراز می‌دارند.



شکل ۱۷. نمودار بالا آمدگی سینه مدل شناور برحسب عدد فرود

برای بررسی رفتار و عملکرد شناور، منحنی بدون بعد به ضریب مقاومت کل در شکل ۱۸ ترسیم می‌شود. با استخراج داده‌های موجود همان طور که در شکل مشخص است مقادیر ضریب مقاومت کل برای دو حالت وزنی و دو موقعیت طولی مرکز ثقل بر اساس اعداد بدون بعد فرود آورده شده است. با توجه به شکل مشهود است که هامپ مقاومت در عدد فرود ۰/۵ اتفاق افتاده است.



شکل ۱۸. ضریب مقاومت کل مدل شناور برحسب فرود

### ۷. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر انجام آزمایش‌های تجربی یک مدل شناور با بدنه سرشی به منظور بررسی عملکرد هیدرودینامیکی

- [12] Pennino S, Klymenko H, Scamardella A, Mancini S, Begovic E. Three-dimensional pressure distribution on planing hulls. In: *Maritime Technology and Engineering III: Proceedings of the 3rd International Conference on Maritime Technology and Engineering*; 4-6 July 2016; Lisbon, Portugal. CRC Press; 2016 Dec 1. p. 353.
- [13] Sukas OF, Kinaci OK, Cakici F, Gokce MK. Hydrodynamic assessment of planing hulls using overset grids. *Applied Ocean Research*. 2017 Apr 1;65:35-46.
- [14] Broglia R, Durante D. Accurate prediction of complex free surface flow around a high speed craft using a single-phase level set method. *Computational Mechanics*. 2018 Sep;62(3):421-37.
- [15] Judge C, Mousaviraad M, Stern F, Lee E, Fullerton A, Geiser J, Schleicher C, Merrill C, Weil C, Morin J, Jiang M. Experiments and CFD of a high-speed deep-V planing hull—Part I: Calm water. *Applied ocean research*. 2020 Mar 1;96:102060.

## مراجع

- [1] Von Karman T. The impact on seaplane floats during landing. US;1929. Report No: NACA TN321.
- [2] Wagner H. Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1932;12(4):193-215.
- [3] Green AE. The gliding of a flat plate on a stream of finite depth part I. In: *Proceeding of the Cambridge Philosophical Society*; 1935. vol. 31. p. 584-603.
- [4] Green A E. The gliding of a flat plate on a stream of finite depth part II. In: *Proceeding of the Cambridge Philosophical Society*; 1936. vol. 32. p. 58-67.
- [5] Korvin-Kroukovsky BV, Savitsky D, Lehman WF. Wetted area and center of pressure of planing surfaces. Stevens Institute of Technology, Davidson Laboratory Report. 1949 Aug;360. Report No. TR369.
- [6] Korvin-Kroukovsky BV. Lift of planing surfaces. Davidson Laboratory: 1950. Report No: TR381.
- [7] Savitsky D. Hydrodynamic design of planing hulls. *Marine Technology and SNAME News*. 1964 Oct 1;1(04):71-95.
- [8] Doctors LJ. Hydrodynamics of high-speed small craft. 1985 Jan.
- [10] Begovic E, Bertorello C. Resistance assessment of warped hullform. *Ocean Engineering*. 2012 Dec 15;56:28-42.
- [11] Fu TC, Brucker KA, Mousaviraad SM, Ikeda CM, Lee EJ, O'shea TT, et al. An assessment of computational fluid dynamics predictions of the hydrodynamics of high-speed planing craft in calm water and waves. In: *30th Symposium on Naval Hydrodynamics*; 2014 Nov. Tasmania, Australia: Hobart. p. 2-7.

## پی نوشت

1. lift
2. Hump Region
3. Buoyancy
4. Heave
5. Planing Hull
6. Drag
7. Porpoising
8. Sinkage
9. Chine
10. Tolerance
11. Hump
12. Porpoising