

تحلیل تجربی تأثیر هوادهی به پله‌های عرضی شناورهای تندرو سرشی بر کاهش قله منحنی مقاومت آن‌ها

محمود سالاری^۱، محمدسعید سیف^۲، مهدی تیموری^۳

masalari@ihu.ac.ir

۱- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۲- استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۳- محقق سازمان تحقیقات و جهاد خودکفایی

چکیده

استفاده از پله‌های عرضی در کف بدنه شناورهای تندرو سرشی، یکی از روش‌های افزایش سرعت آن‌ها است. این شناورها دارای یک قله در منحنی "مقاومت - سرعت" خود و در مرحله ابتدایی فاز سرشی هستند. این قله در عمل بار زیادی را بر سیستم محرکه این شناورها وارد می‌نماید. در این مقاله ابتدا رفتار هیدرودینامیکی دو مدل بدنه، یکی بدون پله عرضی و دیگری با یک پله عرضی در حوضچه کشش بررسی تجربی شده‌اند. سپس درحالی‌که یک سیستم تزریق هوای طبیعی به پشت پله عرضی مدل دوم اضافه شده بود، آزمایش‌های مجدداً تکرار گردیدند. نتایج نشان می‌دهند که در قبل از مرحله سرشی، بدنه پله دار دارای مقاومت بیشتری به میزان ۳۰ تا ۴۰ درصد بوده و پس از مرحله سرش، مقاومت بدنه پله دار حدود ۵٪ کمتر است. استفاده از سیستم هوادهی خود تغذیه، باعث می‌گردد تا علاوه بر کاهش مقاومت کل بدنه در قبل از مرحله سرش، مقدار مقاومت شناور در قله منحنی مقاومت نیز تا حدود ۲۱ درصد کاهش یابد. نتایج نشان می‌دهند که هوادهی به پشت پله می‌تواند راه‌کاری مناسب و کم‌هزینه برای کاستن قله منحنی "مقاومت- سرعت" در شروع مرحله سرشی این شناورها باشد.

واژگان کلیدی: هیدرودینامیک، شناورهای سرشی تندرو، اندازه‌گیری، هوادهی به پشت پله، حوضچه کشش.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۳/۰۶/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۴/۰۵/۱۶

۱- مقدمه

شناورهای سطح رو دریایی عموماً از منظر نحوه استقرار بر سطح آب به سه دسته شناورهای جابجایی^۱، نیمه جابجایی و سرشی^۲ تقسیم می‌شوند. البته تمامی این شناورها هنگامی که ساکن هستند و یا با سرعت‌های کمی حرکت می‌کنند از منظر هیدرودینامیکی در خانواده شناورهای جابجایی قرار می‌گیرند، زیرا قانون حاکم بر تعادل استاتیکی این مرحله از حرکت آن‌ها، همان قوانین مربوط به هیدرواستاتیک می‌باشد. دسته‌بندی فوق مربوط به وضعیتی است که این شناورها در سرعت طراحی و یا بیشترین سرعت کارکردی خود بکارگیری می‌شوند.

شناورها سرشی برخلاف دو دسته دیگر، شناورهایی هستند که از نظر تئوری عمده وزن آن‌ها توسط نیروی برآیند هیدرودینامیکی و نه نیروی هیدرواستاتیکی تحمل می‌شود. بدنه این شناورها به هنگام حرکت در سرعت کارکردی خود، یعنی پس از ایجاد مرحله سرشی، بر روی سطح آب بالا آمده و روی آن حرکت سرشی می‌کنند. این رفتار منجر به کاهش سطح خیس شده بدنه و به تبع آن کاهش نیروی مقاومت حرکتی خواهد شد. این دسته از شناورها امروزه به شناورهای "سرشی" معروفند.

شاید کارهای تجربی چارلز پارسونز در ۱۸۹۶ را بتوان جزو اولین کارهای انجام شده برای دسترسی به سرعت‌های بالا در شناورهای سطح رو محسوب نمود. ایشان در آن زمان سرعت ۳۴/۵ نات را به ثبت رسانید. در همین راستا در اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم، فعالیت‌ها و روش‌های متفاوتی برای افزایش سرعت شناورها توسط محققین مختلف به ثبت رسیده‌اند. این روش‌ها مبانی انواع شناورهای با بدنه سرشی، شناورهای هیدروفویل، شناورهای با بالشتک هوایی و انواع شناورهای پرنده [۱] را شامل می‌شوند. ساویتسکی در سال ۱۹۶۴ مقاله‌ای پایه‌ای که در بر گیرنده مطالعات تجربی مختلف بر روی هیدرودینامیک سطوح منشوری سرشی بود را ارائه نمود [۲]. ایشان همچنین روندی را برای به‌کارگیری نتایج تجربی در طراحی شناورهای تندرو معرفی نمود.

پس از آن بسیاری از آزمایشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی مطالعات خود را بر روی هیدرودینامیک شناورهای تندرو

معطوف نمودند. اثرات ویسکوزیته و سطح آزاد، که منجر به تولید پاشش^۳ و امواج سطحی می‌شوند بخشی از مقاومت کل بدنه شناوری سطح رو را باعث می‌شوند که پیچیدگی این پدیده‌ها منجر به کاهش توانایی روش‌های عددی و تجربی برای پیش‌بینی دقیق مقاومت بدنه شناورها گردیده است [۳ و ۴].

یکی از روش‌های اولیه برای شناسایی رفتار هیدرودینامیک و مشخصه‌های توزیع فشار در زیر بدنه منشوری شناورهای تندرو سرشی، استفاده از نتایج آزمایشگاهی و یا تجربی انجام آزمون سقوط گوه می‌باشد. در این آزمون‌ها، گوه‌ای با زاویه معادل با زاویه برخاست کف شناور ساخته شده و با سرعت‌های مختلفی از هوا وارد سطح آزاد آب می‌شود و به صورت همزمان و لحظه‌ای مقادیر نیروی برآیند و همچنین منحنی‌های توزیع فشار در کف آن استخراج می‌شوند. این نتایج هم برای طراحی سازه‌ای و هم برای طراحی هیدرودینامیکی بدنه قابل استفاده می‌باشند. واگنر [۵] برخورد دو بعدی یک گوه به آب را مطالعه نمود. ایشان تأثیر پاشش آب بر بدنه گوه را نیز مطالعه نموده است. اخیراً زاو و فالتینسن [۶] مطالعات واگنر را تکمیل نموده‌اند.

ایکیدا و همکاران [۷] به صورت تجربی هیدرودینامیک یک سری از بدنه‌های با چاین^۴ تیز را مطالعه کردند. در آزمایش‌های آن‌ها نسبت طول به عرض شناور بین ۳ تا ۶ متغیر بوده در حالی که زاویه برخاست^۵ کف در تمامی آزمون‌ها ثابت نگه داشته شده بود. آزمون‌های سیستماتیک دیگری در موضوع تغییرات مقاومت بدنه، تغییرات آب‌خور و تغییرات زاویه تریم^۶ بدنه بر روی سری‌های مشخصی از مدل‌های شناورهای تندرو توسط محققین دیگری همچون کلمنت و بلانت [۸]، کونینگ و گریتسما [۹] و کونینگ و همکاران [۱۰] انجام گردیده است.

در شناورهای تندرو سرشی با بدنه منشوری، با افزایش سرعت شناور در فاز سرشی، مرتباً میزان آب‌خور شناور کم شده و سطح خیس شناور به سمت ترنزوم^۷ کشیده

³ Spray

⁴ Chine

⁵ Deadrise

⁶ Trim

⁷ Transom

¹ Displacement

² Planning

پشت پله عرضی چقدر خواهد بود؟ برای پاسخ به سؤال نخست می‌توان از نتایج تحقیق تجربی دکتر ز [۱۲] استفاده نمود که در آن، شرایط لازم برای ترنژوم یک بدنه شناور سرشی را ارائه نموده است. طبق یافته‌های ایشان پارامتر مهم در این موضوع، عدد فرود بر مبنای عمق آب‌خور در موقعیت پله عرضی و یا ترنژوم می‌باشد. طبق نتایج ایشان چنانچه در موقعیت پله عرضی، عمق آب‌خور برابر با D باشد و سرعت حرکت شناور برابر با U در نظر گرفته شود، آنگاه شرط لازم برای جدایش جریان از روی پله و یا ترنژوم این است که $V/\sqrt{g \cdot D}$ بزرگ‌تر از $2/5$ گردد.

برای پاسخ به سؤال دوم می‌توان از نتایج تحقیقی ساویتسکی [۱۳] و ساویتسکی و مورایتو [۱۴] استفاده نمود. ساویتسکی و مورایتو [۱۴] پروفیل و یک سطح آزاد جریان از روی بدنه را در حالت‌های مختلف از زوایای تریم، زوایای برخاست کف بدنه، ضرایب مختلف سرعت و ضرایب بار مختلف را به صورت تجربی بدست آوردند. با اطلاعات فوق می‌توان تا حدود زیادی به طراحی اولیه یک بدنه شناور تندرو با یک پله عرضی پرداخت. در همین راستا ساوان [۱۵]، روش ساویتسکی را برای طراحی شناورهای تندرو معمولی توسعه داده و بر مبنای نتایج تجربی حاصله، یک روند محاسباتی را برای پیش‌بینی رفتار هیدرودینامیکی شناورهای تندرو با یک پله عرضی را ارائه نمود.

استفاده از پله‌های عرضی برای بدنه شناورهای سرشی با دو نکته هیدرودینامیکی منفی نیز همراه می‌باشد: اول این‌که در مرحله قبل از سرش، میزان مقاومت بدنه شناورهای پله‌دار در سرعت‌های یکسان بیشتر از مقاومت شناورهای مشابه بدون پله می‌باشد. دوم این‌که معمولاً وجود پله‌های عرضی باعث ایجاد یک "قله" در منحنی مقاومت و در مرحله شروع سرش می‌شود که در عمل بار زیادی را بر سیستم محرکه این نوع شناورها وارد می‌نماید. در این مقاله ابتدا رفتار هیدرودینامیکی دو مدل بدنه شناور، یکی شناور معمولی بدون پله و دیگری با یک پله عرضی بررسی و اندازه‌گیری تجربی انجام شده است. سپس به منظور کاهش دامنه قله موج ایجادشده در منحنی "مقاومت - سرعت" در شروع مرحله سرشی، با

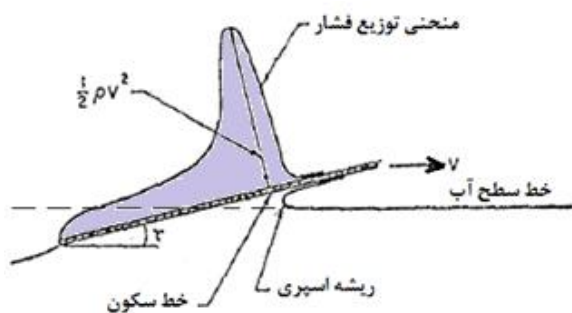
می‌شود. عقب‌نشینی سطح خیس کف بدنه همراه با جابجایی مرکز فشار هیدرودینامیکی است. در شروع مرحله سرشی، مرکز فشار معمولاً از مرکز ثقل شناور جلوتر بوده و این منجر به ایجاد یک زاویه تریم مثبت می‌شود. با افزایش سرعت و عقب‌نشینی مرکز فشار ناشی از کوچک شدن و عقب رفتن سطح خیس شناور، به ازای سرعت مشخصی از بدنه، موقعیت مرکز فشار به پایین‌دست مرکز ثقل منتقل شده و این منجر به ایجاد زاویه تریم منفی و افزایش مجدد سطح خیس شناور خواهد شد. در این حالت ناحیه جلویی بدنه شناور به داخل آب فرو می‌رود و باز هم مرکز فشار به فاصله زیادی از مرکز ثقل و جلوتر از آن جابجا خواهد شد. در این حالت نیز نیروهای هیدرودینامیکی تمایل به افزایش زاویه تریم شناور نموده و در این محدوده از سرعت، رفتاری نوسانی در زاویه تریم شناور رخ خواهد داد. این پدیده را ناپایداری پرپوزینگ^۱ می‌نامند [۱۱]. این ناپایداری باعث محدود شدن سرعت کاربری حداکثری برای شناورهای تندرو معمولی شده است. یکی از راه‌های برون‌رفت از این موضوع و دسترسی به سرعت‌های بالاتر برای شناورهای تندرو سرشی استفاده از بدنه‌های منشوری با پله‌های عرضی می‌باشد.

اولین هدف از ایجاد پله عرضی در کف شناورهای تندرو، کاهش مقاومت اصطکاکی به علت کم شدن سطح خیس بدنه بوده است. پله‌های عرضی بدین صورت هستند که با ایجاد یک اختلاف ارتفاع در کف بدنه و در فاصله معینی از جلوی بدنه، یک شبه ترنژوم میانی برای شناور ایجاد نموده و عملاً بدنه از منظر هیدرودینامیکی به دو قسمت جلویی و عقبی نسبت به موقعیت پله تقسیم می‌شود. پله‌های عرضی موجب می‌شوند تا جریان سیال در موقعیت پله عرضی از کف بدنه شناور جدا شده و سپس در فاصله معینی مجدداً به سطح بدنه پایین دست برخورد کند. به علت تغییر زاویه نسبی برخورد جریان به بدنه پشتی، میزان نیروی برآیند هیدرودینامیکی در بدنه پشتی افزایش خواهد یافت.

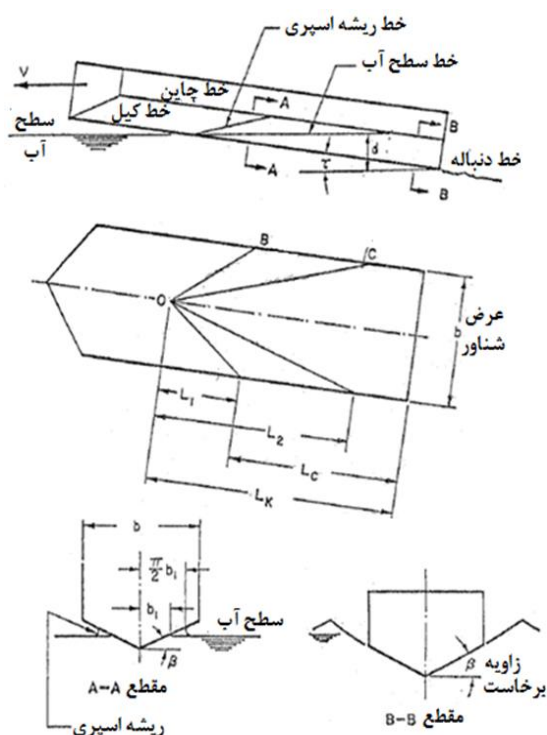
دو سؤال اساسی در خصوص این موضوع مطرح است: اول این‌که شرایط لازم برای جدایش جریان از روی پله‌های عرضی کدامند؟ دوم این‌که طول ناحیه هوایی (خشک)

^۱ Porpoising

باشد. مشابه شکل (۳)، بدنه شناورهای تندرو با افزایش سرعت خود از حالت جابجایی به حالت سرشی می‌رسند. در این شرایط منحنی "مقاومت - سرعت" آن‌ها نیز دارای حداقل دو ناحیه می‌باشد. این دو ناحیه به کمک یک قله از یکدیگر جدا شده‌اند. این قله در منحنی مقاومت در شروع مرحله سرشی واقع شده و معمولاً بار زیادی را به سیستم رانش این شناورها وارد می‌کند. تمرکز این تحقیق نیز بر همین موضوع استوار شده است.



شکل (۱) نمای جانبی از سطح سرشی تخت و منحنی توزیع فشار ایجاد شده.



شکل (۲) خطوط ریشه اسپری برای بدنه سرشی منشوری.

هوادهای طبیعی در موقعیت پله عرضی سعی بر کاهش و یا حذف کامل این قله نموده‌ایم.

۲- مبانی هیدرودینامیک شناورهای سرشی با بدنه منشوری

برای طراحی مشخصه‌های هندسی شناورهای سرشی، ابتدا لازم است تا مبانی هیدرودینامیکی سطوح سرشی ساده شناسایی شوند. روابط حاکم مرتبط با مقادیر سطح خیس شده، نیروی برآیند، نیروی مقاوم، موقعیت مرکز فشار و محدودیت‌های تعادلی در سطوح سرشی چابین‌دار و همچنین تأثیر متغیرهای هندسی از قبیل زاویه برخاست کف، زاویه تریم و سرعت بدنه از جمله ورودی‌های لازم برای به‌کارگیری این نوع روابط در طراحی بدنه‌های شناورهای تندرو سرشی می‌باشند. لازم به ذکر است که علائم بکار رفته و ضرایب سرشی اعمالی به روابط طراحی این نوع شناورها، تنها بر پایه استفاده از قانون تشابه عدد فرود استوار می‌باشند.

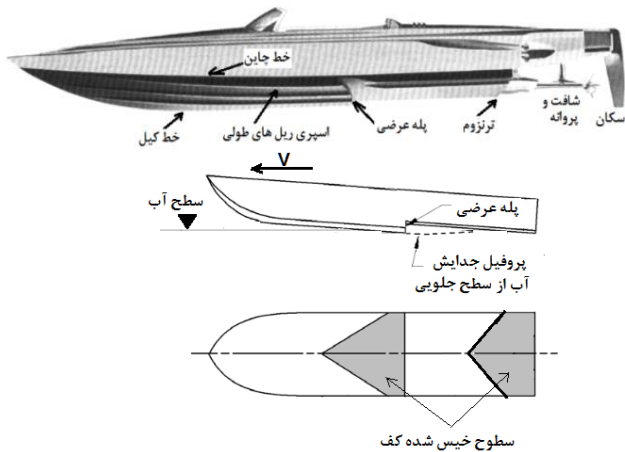
۲-۱- بدنه‌های سرشی معمولی

چنانچه یک صفحه تخت با عرض معلوم و وزن ثابت و مشخص با سرعت ثابت V بر روی سطح آزاد آب حرکت داده شود، این سطح دارای زاویه تریم نسبت به خط سطح آب خواهد شد. توزیع فشار هیدرودینامیکی وارده از آب به این سطح، مشابه شکل (۱) خواهد بود.

چنانچه بدنه شناور تندروی با عرض B که در قسمت زیرین خود دارای مقطع V و یا به صورت گوه‌ای با زاویه برخاست β باشد را در نظر بگیرید که با زاویه تریم τ و مقدار آب‌خور d بر روی سطح آب حرکت کند به کمک عکس‌های زیر آبی می‌توان به آسانی موقعیت خط ریشه اسپری را پیدا کرد. این وضعیت در شکل (۲) نشان داده شده است.

امروزه برای طراحی چنین نوع شناورهایی می‌توان استفاده از روابط ساویتسکی [۲] بین مشخصه‌های هندسی شناور، سرعت و بارگذاری شناور با مشخصه‌های سینماتیکی سطح خیس شده و نیروی مقاوم بدنه ارتباط برقرار نمود.

البته لازم به ذکر است که این روابط تنها زمانی قابل استفاده هستند که بدنه شناور در حالت تعادل حرکتی



شکل (۴) نمایی از اجزای بدنه یک شناور پله دار و وضعیت سطوح خیس زیر بدنه.

۳- معرفی تجهیزات آزمایشگاهی

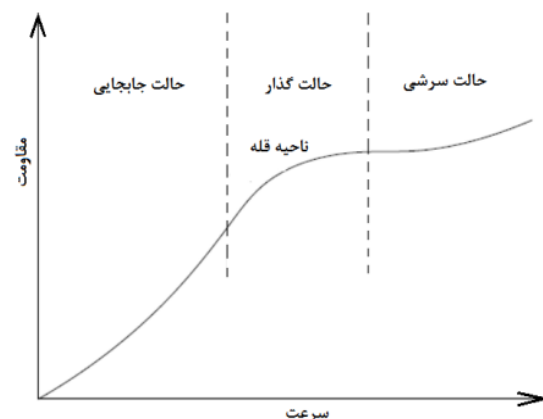
در اکثر حوضچه‌های کشش از یک ارابه برای به حرکت در آوردن مدل‌ها استفاده می‌شود. این ارابه‌ها که بر روی ریل‌های طولی نصب شده‌اند عموماً توسط موتورهای الکتریکی به حرکت در می‌آیند. بین مدل و ارابه معمولاً مکانیزم‌ها و سیستم‌های اندازه‌گیری نصب می‌شوند تا علاوه بر تامین درجات آزادی معین برای مدل، نیروهای وارده بر مدل از سوی آب نیز اندازه‌گیری لحظه‌ای شوند. کلیه آزمون‌های این تحقیق در حوضچه کشش آزمایشگاه دریایی دانشگاه صنعتی شریف انجام شده است. سرعت ارابه در این آزمایشگاه بین صفر تا ۶ متر بر ثانیه قابل تغییر بوده که البته با توجه به توان محدود موتور الکتریکی هر قدر نیروی مقاومت بدنه مدل بیشتر باشد دسترسی به سرعت‌های بالاتر محدودتر می‌شود. در آزمون‌های این تحقیق حداکثر سرعت قابل انجام با توجه به ابعاد هندسی و جرمی مدل حدود ۳ متر بر ثانیه بوده است. سیستم داده‌برداری این حوضچه به صورت آنلاین و دیجیتال بوده که همزمان اطلاعات حسگرها در سیستم ذخیره شده‌اند.

روند کالیبراسیون تجهیزات به صورت استاندارد بوده و بارها برای آزمایش‌های گوناگون صحت عملکرد آن اثبات شده است. مشخصات کلی کانال و سیستم کشش آن در جدول (۱) ارائه شده است. سایر جزئیات تجهیزات آزمایشگاهی در مرجع [۱۶] معرفی شده‌اند.

۲-۲- بدنه‌های سرشی با پله عرضی

اکثر شناورهای سرشی تندرو که امروزه در سرتاسر دنیا بکار گرفته می‌شوند دارای بدنه منشوری نوع V می‌باشند که در آن‌ها از اسپری ریل‌های طولی و انواع پله‌های عرضی استفاده شده است. تنوع کاربری آن‌ها در مسابقات سرعت، شناورهای تفریحی و شناورهای گشت ساحلی باعث رشد این دسته از شناورها شده است.

استفاده از بدنه‌های پله‌دار بطور وسیع در دستور کار طراحان و سازندگان قرار گرفته است، زیرا انتظار اساسی این است که در صورت طراحی صحیح موقعیت و ارتفاع پله عرضی، مقدار نیروی مقاوم آن‌ها در مقایسه با نوع معمولی شان، بسیار کمتر باشد. البته موضوعات پایداری و دینامیک شناورهای تندرو نیز به استفاده از پله عرضی در بدنه شناورها اهمیت بیشتری دارد. شکل (۴) شماتیکی از اجزای اصلی بدنه شناورهای تندرو پله‌دار و الگوی جریان و سطوح خیس زیر بدنه آن‌ها را نشان می‌دهد [۱۱]. پس از ارائه نتایج تجربی ساویتسکی و مورایتو [۱۴] در سال ۲۰۰۹ برای شناسایی پروفیل و یک و یا پروفیل سطح آزاد جریان در ناحیه پشت ترنزوم، یک الگوریتم محاسباتی برای تخمین مقاومت و زاویه تریم تعادلی بدنه شناورهای با یک پله عرضی توسط ساوان [۱۵] ارائه گردید. به کمک این الگوریتم و مشابه با روش ساویتسکی می‌توان مشخصه‌های کلی یک شناور تندرو تک بدنه پله‌دار را نیز محاسبه و پیش‌بینی نمود.



شکل (۳) منحنی متعارف "مقاومت-سرعت" برای شناورهای سرشی.

جدول (۱) مشخصات حوضچه کشش.

25	طول کانال [m]
2.5	عرض کانال [m]
1.2	عمق کانال [m]
4	توان الکتریکی سیستم رانش [kw]
0-6	محدوده سرعت [m/s]
0-2	محدوده شتاب [m/s ²]

بدنه برای آزمایش‌های مدل، می‌تواند شبیه‌سازی حداکثری را با شرایط شناور واقعی ایجاد کند. کلیه موارد مربوط به ساخت مدل، کشش و تحلیل نتایج آزمایش‌ها بر اساس دستورالعمل [17] ITTC-2002 انجام شده است. جدول (۳) سرعت‌های مورد آزمایش و سرعت معادل آن در شناور واقعی را نشان می‌دهد.

۴-۲- آزمایش‌های مدل شماره ۲ با تک پله عرضی

کلیه مشخصات عمومی این مدل همانند مدل شماره ۱ است با این تفاوت که در قسمت عقب بدنه یک پله عرضی ایجاد شده است. راستای این پله در جهت عرضی بصورت هلالی بوده است، بطوری که به صورت هندسی مرکز شعاع هر یک از کمان‌ها در گوشه انتهایی سمت مقابل بدنه قرار دارند (مطابق شکل (۵)). البته این کمان‌ها در صفحات منطبق بر کف بدنه که دارای زاویه ای معادل زاویه برخاست کف بدنه است تصویر شده‌اند. ارتفاع پله عرضی در کف بدنه حدود ۷ میلیمتر بوده است که تقریباً برابر با ۰.۵٪ عرض بدنه می‌باشد. در طراحی پله عرضی برای مدل شماره ۲ از نکات مطرح شده در مقاله کلمنت و کولبل [۱۸]، کلمنت و بلونت [۱۹] و کلمنت [۲۰] بهره گرفته شده است.

۴-۳- آزمایش‌های مدل شماره ۲ با تک پله عرضی و

هوادهی طبیعی

در این حالت کلیه آزمایش‌های مدل شماره ۲ مجدداً تکرار شدند. با این تفاوت که در قسمت دیواره قائم پله عرضی، تعداد ۱۱ عدد سوراخ با قطر ۴ میلیمتر ایجاد شده‌اند.

جدول (۳) سرعت‌های مورد آزمایش برای مدل‌ها و معادل آن در شناور واقعی (طول مدل ۰/۷ متر و طول شناور واقعی ۱۳/۱۸ متر).

سرعت مدل [m/s]	عدد فرود Fr	سرعت شناور معادل [knot]
0	0	0
1	0.928	8.43
2	1.856	16.87
2.5	2.321	21.09
3	2.785	25.31

۴-۴- مشخصات مدل‌ها و معرفی آزمایش‌ها

در این آزمایش‌ها، دو مدل با شرایط یکسانی از نظر مقیاس ابعادی، وزن، موقعیت مرکز ثقل و موقعیت اتصال به ارابه کشش بکارگرفته شده‌اند. هردوی این مدل‌ها با مقیاس هندسی یک به ۱۸/۸۴ نسبت به یک بدنه واقعی از یک شناور تندرو موجود ساخته شده است. این مدل‌ها دارای مشخصات عمومی مطابق جدول (۲) هستند [۱۶].

۴-۱- آزمایش‌های مدل شماره ۱ بدون پله عرضی

این مدل با مشخصات کلی جدول (۲)، هیچ پله عرضی ندارد و با سرعت‌های ۰/۵ تا ۳ متر بر ثانیه در حوضچه کشش کشیده شده است به طوری که با این محدوده از سرعت، عدد فرود طولی برابر با ۱/۱۴ می‌شود که بزرگ‌تر از عدد یک است. بر این مبنا می‌توان اطمینان داشت که در صورت اعمال وزن مناسب، پدیده سرش برای شناور اتفاق خواهد افتاد. نحوه تنظیم سرعت‌ها در این آزمون‌ها بدین‌گونه بوده است که تا سرعت ۲ متر بر ثانیه، گام افزایش سرعت در هر مرحله از آزمایش، ۰/۵ متر بر ثانیه بوده است و برای سرعت‌های بین ۲ تا ۳ متر بر ثانیه، گام افزایش سرعت برای هر مرحله از آزمایش به ۰/۱ متر بر ثانیه تقلیل یافته است. علت این تفاوت در گام‌های سرعتی، افزایش دقت نتایج و نقاط بدست آمده در سرعت‌های بالاتر بوده است. دلیل دیگر آن این بوده است که تا سرعت ۲ متر بر ثانیه تقریباً نمودار وضعیت یکسانی دارد، ولی از آنجا به بعد در هر سرعتی امکان آغاز پدیده سرشی و عبور از قله مقاومتی وجود دارد. بنابراین برای ثبت دقیق‌تر احتمالی این پدیده سعی شده است تا در محدوده‌های بالاتر از دقت بیشتری استفاده شود. آزاد بودن درجه آزادی در راستای زاویه تریب و حرکت عمودی

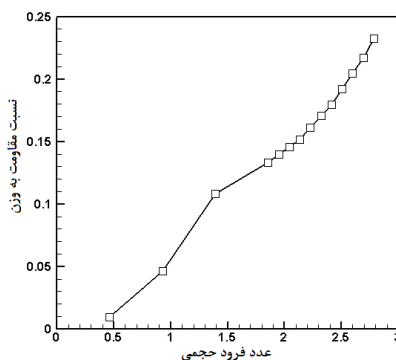
جدول (۲) مشخصات عمومی مدل‌های مورد تحقیق.

شماره مدل	حجم جابجایی [mm ³]	زاویه برخاست کف [Deg]	آب‌خور استاتیکی [mm]	عرض بدنه [mm]	طول بدنه [mm]	موقعیت پله از ترنوم [mm]
1	1645000	23.4	39	144	700	ندارد
2	1645000	23.4	39	144	700	170
3	مشابه مدل ۲ با امکان هوادهی از پشت پله عرضی					

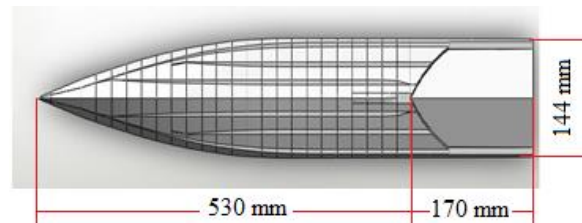
۵- ارائه و تحلیل نتایج

۵-۱- آزمایش‌های مدل شماره ۱

در شکل (۶) تغییرات نسبت نیروی مقاومت شناور به وزن، R/Δ بر حسب عدد فرود حجمی، $Fr = V/\sqrt{g \cdot \nabla^{1/3}}$ به ازای سرعت‌های مختلف آزمایش ترسیم شده است. عدد فرود حجمی به عنوان کمیت بدون بعد سرعت بوده و هم‌چنین نیروی مقاومت بدنه با نیروی وزن مدل بدون بعد شده است. تنظیم مرکز ثقل و محل نصب کشنده از اهمیت زیادی برخوردار بوده که طبق شناور اصلی تنظیم و زاویه تریم و مقدار برخاست مدل آزاد در نظر گرفته شدند. در طی تمام مراحل از استاندارد ITTC [۱۷] پیروی شده است. همان‌طور که در نمودار شکل (۷) دیده می‌شود با افزایش سرعت مقدار نیروی مورد نیاز برای حرکت نیز افزایش پیدا می‌کند. از این نمودار می‌توان چنین نتیجه گرفت که مدل مورد نظر هنوز موفق به عبور از قله در نمودار "مقاومت - سرعت" نشده است. لازم به یادآوری است که شناورهای سرشی با افزایش سرعت خود در ابتدا باید موفق به عبور از یک قله در نمودار "مقاومت - سرعت" خود شوند تا از آن به بعد با ورود به مرحله سرشی، مقاومت کمتری را تجربه کنند و بتوانند با سرعت بیشتری حرکت کنند [۲۱]. گاهی اوقات ملاک رسیدن به وضعیت سرشی نیز عبور از همین قله در نظر گرفته می‌شود.

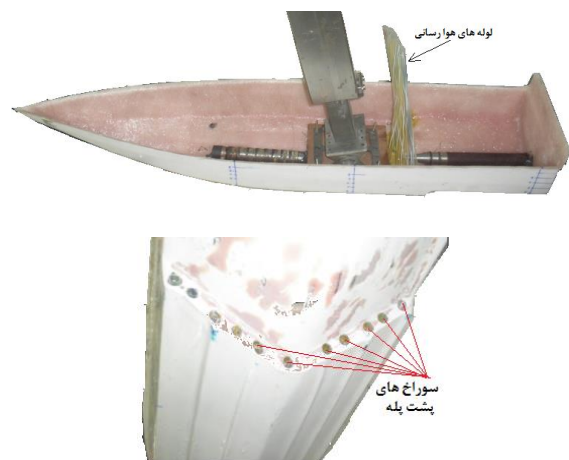


شکل (۷) تغییرات نسبت نیروی مقاومت به وزن و عدد فرود حجمی در آزمایش‌های مدل شماره ۱.



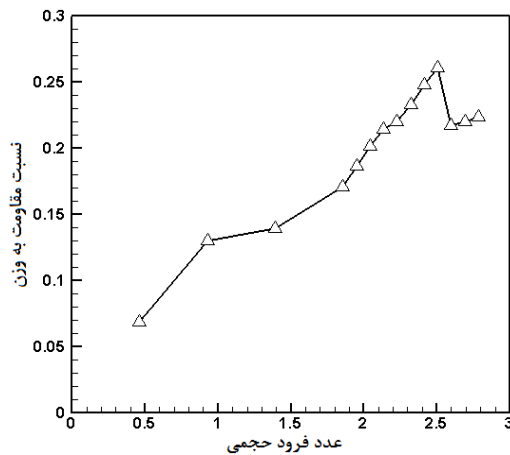
شکل (۵) نمای کف شناور با پله عرضی (مدل شماره ۲ و ۳).

همانطور که در شکل (۶) دیده می‌شود نحوه قرارگیری این سوراخ‌ها به صورت یکی در وسط و ۵ عدد در هر طرف می‌باشد. قطر و تعداد سوراخ‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که با توجه به شرایط آزمایش بتوان بیشترین هوادهی طبیعی را برای این قسمت ایجاد کرد. البته با رعایت ملاحظات مربوط به مسائل ساخت در نمونه واقعی، از افزایش آن‌ها خودداری شده است. هم‌چنین در همان شکل تصویری از نمای جانبی این مدل که در آن هم موقعیت پله و هم محل و نحوه سوراخ‌های مورد نظر، نشان داده شده‌اند. برای پرهیز از آب‌گرفتگی مدل شناور، این سوراخ‌ها بوسیله لوله‌هایی تا ارتفاعی مناسب که کمی از سطح آزاد سیال بالاتر است، ادامه یافته‌اند.

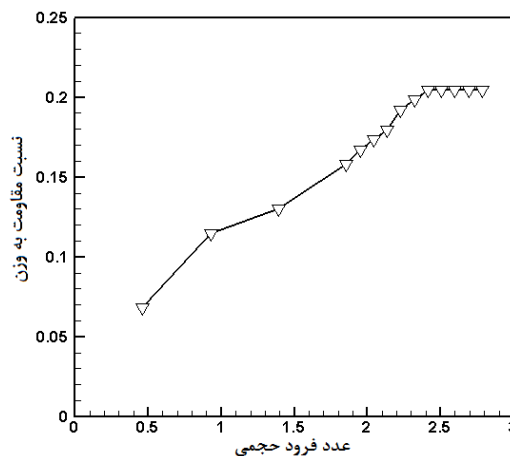


شکل (۶) موقعیت‌های هوادهی در مدل شماره ۲.

از تحلیل نتایج آزمایش‌های انجام شده روی این مدل طبق نمودار شکل (۹) می‌توان چنین نتیجه گرفت که این مدل با شیبی تقریباً مشابه سایر مدل‌ها تا عدد فرود حجمی ۲/۴ افزایش پیدا می‌کند. البته نحوه رشد آن کمی با نتایج مدل‌های ۱ و ۲ متفاوت است که این تغییرات در کاهش مقاومت (در ناحیه قبل از سرش) به دلیل ورود هوا به پشت پله بوده به گونه‌ای که فشار در پشت پله عرضی دارای مقدار بزرگتری نسبت به حالتی است که امکان هوادهی وجود نداشت. این افزایش فشار در پشت پله باعث کاهش مقاومت کلی بدنه شده است. با افزایش سرعت حرکت سهم این پدیده نیز بر کاهش مقاومت بیشتر می‌شود. از عدد فرود ۲/۴ به بعد، علیرغم افزایش سرعت مقدار نیروی مورد نیاز و یا همان نسبت نیروی مقاومت به وزن ثابت مانده است.



شکل (۸) تغییرات نسبت نیروی مقاومت به وزن و عدد فرود حجمی در آزمایش‌های مدل شماره ۲ (بدون هوادهی).



شکل (۹) تغییرات نسبت نیروی مقاومت به وزن و عدد فرود حجمی در آزمایش‌های مدل شماره ۲ (هوادهی طبیعی).

از این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که علیرغم رسیدن سرعت به ۲۵ نات در شناور واقعی که معمولاً این محدوده سرعت برای این نوع بدنه‌ها آغاز مرحله سرشی است، لیکن مشاهده می‌شود که هنوز مرحله سرش حادث نشده است. معنای عملی این اتفاق، بروز فرسودگی زیاد و سریع در ماشین آلات و عدم چابکی شناور خواهد بود.

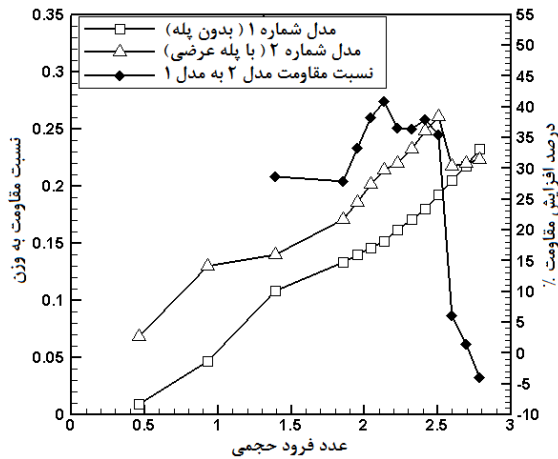
۵-۲- آزمایش‌های مدل ۲ در شرایط بدون هوادهی

در ادامه، مدل شماره ۲ (بدنه با پله هلالی) نیز همانند مدل اولی و در دامنه سرعتی همسان با آن آزمون تجربی گردید. نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۸) ترسیم شده است. همان‌گونه که در این نمودار دیده می‌شود با افزایش سرعت مقدار مقاومت ابتدا افزایش پیدا نموده است. این روند تا عدد فرود تقریباً ۲/۵ ادامه یافته، اما در این مرحله نمودار مقاومت - سرعت بطور ناگهانی افت کرده است. در این وضعیت می‌توان نتیجه گرفت که شناور از قله مقاومتی خود در نمودار "مقاومت- سرعت" خود عبور کرده و در وضعیت پلنینگ ایده‌آل (وضعیت سرشی) خود قرار گرفته است. البته پس از سرعتی معادل با عدد فرود حجمی ۲/۶ مجدداً منحنی مقاومت با شیب مثبت و اما بسیار کمتر از قبل، شروع به افزایش می‌کند. این مطلب دقیقاً مشابه چیزی است که در تمامی شناورهای پله‌دار واقعی در دریا اتفاق می‌افتد. این نمودار بیان‌گر ایجاد یک قله در نمودار و هم‌چنین کاهش بسیار شدید نسبت توان به سرعت در سرعت‌های بالاتر است که به لحاظ عملی و کاربردی بسیار مفید خواهد بود.

۵-۳- آزمایش‌های مدل شماره ۲ در شرایط هوادهی

پشت پله

در ادامه تحقیق، مدل شماره ۲ البته با امکان هوادهی طبیعی به پشت پله عرضی، در دامنه سرعتی همسان با آزمایش‌های قبل مورد آزمایش قرار گرفت. از آن‌جا که این مدل به سیستم هوادهی خود تغذیه (لوله‌هایی که از یک طرف به سوراخ‌های پله و از طرف دیگر به هوای آزاد عرشه راه دارند) مجهز شده بودند، انتظار می‌رفت که بتوانند تغییرات مفیدی را در کاهش مقاومت شناور ایجاد کند. نتایج آزمایش این حالت در شکل (۹) آورده شده است. آزمایش‌های این مدل نیز با شرایط یکسان وزن، محیط و محل کشش مشابه با آزمون‌های قبل انجام پذیرفته است.



شکل (۱۰) مقایسه تغییرات نسبت نیروی مقاومت به وزن و عدد فرود حجمی مدل‌های بدون پله و با پله عرضی و درصد افزایش مقاومت مدل ۲ به مدل ۱.

(۳) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این منحنی نشان می‌دهد که هر دوی مدل‌ها به مرحله سرشی وارد شده‌اند. البته بدنه پله دار هوادهی شده در سرعت کمتری به مرحله سرشی وارد شده است که این خود یکی از مزیت‌های اصلی برای این روش می‌باشد. دومین نکته حذف قله مقاومت در مدل با پله هوادهی شده است. سومین مزیت کاهش مقاومت در بدنه پله دار هوادهی شده نسبت به بدنه پله‌دار معمولی است. در این محدود بیشترین کاهش مقاومت حدود ۲۱٪ بوده است که بسیار قابل توجه می‌باشد. نکته دیگر اینست که شیب رشد این نمودار بسیار کمتر از سایر نمودارها است که نوید بخش کاهش بیشتر مقاومت در سرعت‌های بالاتر خواهد بود. نهایتاً در شکل (۱۲) منحنی‌های مقاومت و درصد افزایش و یا کاهش آن‌ها نسبت به یکدیگر به صورت یک‌جا ارائه شده است. این نتایج مقایسه کمی مناسبی را برای منحنی مقاومت بدنه‌های معمولی، بدنه‌های پله‌دار و تأثیر هوادهی مناسب به پله عرضی را نشان می‌دهند که برای طراحان این نوع شناورها بسیار حائز اهمیت و قابل استفاده خواهد بود.

۶- جمع‌بندی

با استفاده از پله‌های عرضی در بدنه شناورهای تندرو می‌توان با جدا کردن آب از سطح سرشی، اندازه سطوح اصطکاکی غیرضروری را کاهش داد و تعادل طولی شناور در سرعت‌های زیاد را نیز بهبود بخشید.

این یک حالت استثنایی در وضعیت حرکت شناور می‌باشد بطوری که باعث شده تا در منحنی "مقاومت-سرعت"، قله منحنی حذف شود. البته انتظار بر این است که در سرعت‌های بالاتر که امکان آزمون آن برای این تحقیق میسر نبود، مجدداً شیب منحنی مقاومت مثبت شده و با شیب کمتری نسبت به حالت قبل از سرش، افزایشی شود. لازم به ذکر است که طبق اطلاعات مؤلفین، نتیجه این بخش از مقاله در هیچ تحقیق دیگری تاکنون گزارش نشده است، که این می‌تواند نوآوری این تحقیق محسوب گردد.

۵-۴- مقایسه نتایج

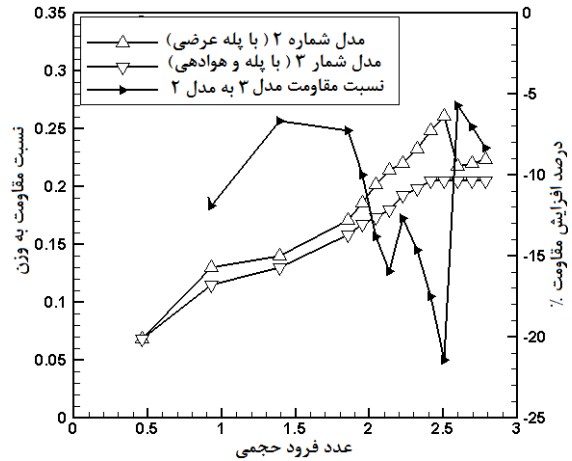
در شکل (۱۰) نتایج آزمایش بر روی مدل ۱ و آزمایش بر روی مدل ۲ در حالت بدون هوادهی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که تا عدد فرود حجمی ۲/۷ مقادیر مقاومت برای مدل پله‌دار بیش از مدل بدون پله می‌باشد. هر چند که در شناور بدون پله، مقاومت اصطکاکی بیش از مدل پله‌دار است. اما این مطلب برای مقاومت فشاری به عکس می‌باشد. بیشتر بودن مقاومت فشاری در مرحله قبل از سرش، بدلیل ایجاد گردهای جریان در پشت پله عرضی است که باعث ایجاد نوعی مکش در این ناحیه می‌شود. البته با افزایش سرعت و بعد از مرحله سرشی، مقاومت ایجاد شده توسط بدنه پله‌دار بسیار کمتر می‌شود که این یک مزیت بزرگ است. هم‌چنین درصد افزایش مقاومت برای بدنه پله‌دار نسبت به بدنه بدون پله در محور سمت راست نشان داده شده است. این منحنی نشان می‌دهد که بیشترین درصد افزایش در مقاومت حدود ۴۰ درصد بوده که در عدد فرود ۲/۱ رخ داده است. پس از مرحله سرش، مقاومت بدنه پله دار حدود ۵٪ کمتر از بدنه بدون پله شده است که این همان شروع عملکردی مثبت برای بدنه‌های پله‌دار می‌باشد. اگرچه کاهش ۵ درصدی مقاومت نیز خود بسیار حائز اهمیت است، ولی با افزایش سرعت این مقدار باز هم افزایش پیدا خواهد کرد که البته برای تعیین مقدار دقیق آن نیاز به انجام آزمایش‌های دیگری و با سرعت‌های بالاتری خواهد بود.

در شکل (۱۱) نتایج آزمایش بر روی مدل‌های شناورهای با پله معمولی (مدل ۲) و با پله با امکان هوادهی (مدل

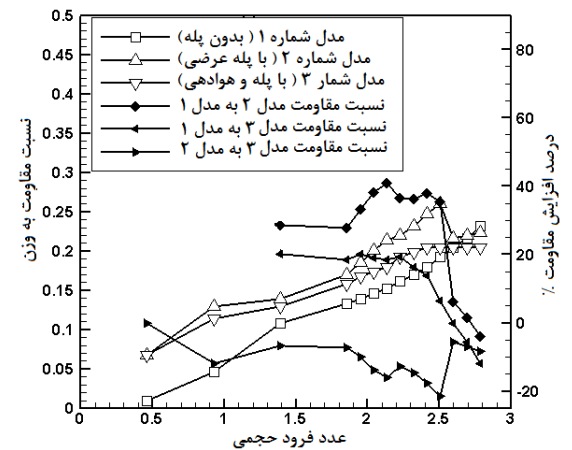
همچنین استفاده از سیستم هوادهی طبیعی خود تغذیه، باعث کاهش قله در نمودار سرعت - توان در شناورهای تندرو می‌شود. اهمیت این مطلب از نقطه نگاه ماشین آلات بسیار مهم می‌باشد. بطوری‌که کاهش زمان عبور از قله مقاومت و رسیدن به وضعیت سرشی می‌تواند عمر سیستم رانش را افزایش داده و از هزینه‌های تعمیر و نگهداری آنان بکاهد. با افزودن یک سیستم هوادهی طبیعی خود تغذیه‌ای می‌توان علاوه بر کاهش مقاومت کل بدنه در قبل از مرحله سرش، مقدار مقاومت شناور در قله منحنی آن‌ها را تا حدود ۲۱ درصد کاهش داد. اعتبار نتایج این تحقیق به این دلیل قابل توجه است که روش تحقیق بکار رفته روش مدل آزمون ITTC [۱۷] بوده است.

۷- مراجع

- [1] Wright, C., "Operation and Cost of High-Speed Craft", Marine Technology, Vol. 27, No. 2, pp. 104-113, 1990.
- [2] Savitsky, D., "Hydrodynamic Design of Planning Hulls", Marine Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 71-95, 1964.
- [3] Savitsky, D. and Brown, P. W., "Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planning Hulls in Smooth and Rough Water", Marine Technology, Vol. 13, No. 4, pp. 381-400, 1976.
- [4] Savitsky, D., "Overview of Planning Hull Developments", High Performance Marine Vehicle Conference and Exhibit, American Society of Naval Engineers, pp. 1-14, 1992.
- [5] Wagner, H., "Uber Stoss-Und Gleitvorgange an Der Oberflache Von Flussigkeiten", Journal of Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 12, No. 4, pp. 193-235, 1932.
- [6] Zhao, R. and Faltinsen, O. M., "Water Entry of Two Dimensional Bodies", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 246, pp. 593-612, 1993.
- [7] Ikeda, Y., Yokomizo, K., Hamasaki, J., Umeda, T. and Katayama, N., "Simulation of Running Attitude and Resistance of a High-Speed Craft Using a Database of Hydrodynamic Forces Obtained by Fully Captive Model Experiments", 2nd International Conference on Fast Sea Transportation, Vol. 1, pp. 583-94, 1993.
- [8] Clement, E. P. and Blount, D. L., "Resistance Tests of a Systematic Series of Planning Hull Forms", Transaction of The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 71, pp. 201-77, 1963.
- [9] Keuning, J. A. and Gerritsma, J., "Resistance Tests of a Series Planning Hull Forms with 25 Degrees Deadrise Angle", International Ship-Building Progress, Vol. 29, No. 337, pp. 222-249, 1982.



شکل (۱۱) تغییرات نسبت نیروی مقاومت به وزن و عدد فرود حجمی در آزمایش‌های مدل‌های پله دار شماره ۲ و ۳ به همراه درصد کاهش مقاومت مدل ۳ به مدل ۲.



شکل (۱۲) منحنی‌های مقاومت و درصد افزایش و یا کاهش آن‌ها نسبت به یکدیگر برای هر سه مدل آزمایش.

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که در مرحله قبل از شروع سرش، وجود پله‌های عرضی نوعی مقاومت اضافی به حساب می‌آیند. بنابراین هرگز نباید از آن‌ها در شناورهایی که تنها برای محدوده سرعت‌های قبل از سرشی طراحی می‌شوند استفاده نمود. پس از رسیدن به مرحله سرشی می‌توان از پله‌های عرضی برای کاهش مقاومت بدنه استفاده نمود. یکی از مشکلاتی که هنگام استفاده از پله‌های عرضی در شناورهای تندرو بروز می‌کند، افزایش مقاومت در سرعت‌های قبل از مرحله سرشی و همچنین افزایش قله مقاومت در منحنی "مقاومت - سرعت" در آن‌ها است. نتایج این تحقیق به صورت کمی نشان می‌دهند که استفاده از سیستم هوادهی طبیعی خود تغذیه می‌تواند برخی از این مشکلات را کاهش دهد.

- [10] Keuning, J. A., Gerritsma, J. and Terwisga, P. F., "Resistance Tests of a Series Planning Hull Forms with 30 Degrees Deadrise Angle and a Calculation Method Based on this and Similar Systematic Series", International Ship-Building Progress, Vol. 40, No. 424, pp. 333-382, 1993.
- [11] Faltinsen, O. M., "Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles", Cambridge University Press, pp. 342-360, 2010.
- [12] Doctors, L. J., "Hydrodynamics of Flow Behind a Transom Stern", 20th Conference on Mechanical Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 1-11, 2003.
- [13] Savitsky, D., "Wake Shapes Behind Planing Hull Forms", International High-Performance Vehicle Conference, The Chinese Society of Naval Architecture and Marine Engineering, pp. 1-15, 1988.
- [14] Savitsky, D. and Morabito, M., "Surface Wave Contours Associated with the Forebody wake of Stepped Planing Hulls", Transaction of The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 47, No. 1, p. 1-16, Jan. 2010.
- [15] Savan, D., "Performance Prediction of Hulls with Transverse Steps", Ms.C. Thesis, Royal Institute of Technology, Center for Naval Architecture, 2010.
- [16] Teymoori, M., "Experimental Analysis of the Effects of the Spray Rail and Transverse Steps on Resistance Reduction of High-Speed Boats", Ms.C. thesis, Malek Ashtar University, 2007.
- [17] ITTC-Recommended. "Procedures and Guidelines, Testing and Extrapolation Methods for High Speed Marine Vehicles", The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Report No. 7.5 - 02-05 - 05, pp. 1-4, 2002.
- [18] Clement, E. P. and Koelbel, J. G., "Optimized Design for Stepped Planning Mono-Hulls and Catamarans", High Performance Marine Vehicle Conference and Exhibit, American Society of Naval Engineers, pp. 35-44, 1992.
- [19] Clement, E. P. and Blount, D. L., "A Configuration for a Stepped Planing Boat Having Minimum Drag", Web Site of the International Hydrofoil Society: www.foils.org, 2006.
- [20] Clement, E. P., "Evolution of the Dynaplane Design", Professional Boat Builder, No 97, p 164, Oct. 2005.
- [21] Seif, M. S., "Parametric Analysis on Planing Hull", The International Conference on High-Performance Marine Vehicles, pp.369-378. Sept. 2002