

بررسی تجربی و تدوین روابط تحلیلی محاسبه سطوح مثلی خیس در شناورهای تندرو پله‌دار با زاویه پله صفر

محمد جواد عامری^۱، حسین احمدی دانش آشتیانی^{۲*}، امین نجفی^۳، حمید کاظمی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
^۳ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

برجسته‌ها

- تعیین مکان و ارتفاع پله در طراحی شناورهای تندرو در سرعت‌ها و پارامترهای مختلف بدنه.
- تدوین روابط تحلیلی محاسبه سطح خیس بر اساس پارامترهای هندسی بدنه شناور، پله و سرعت شناور.
- معرفی روش ساخت جدید در مدل تست.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۲

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

*نویسنده مسئول:

h_a_danesh@azad.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

شناور تندرو

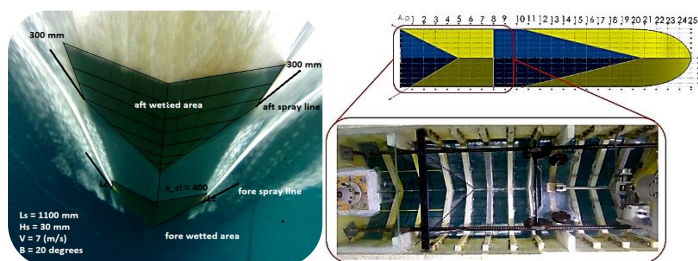
پله‌ی عرضی

سطوح مثلی

روابط تحلیلی

تست مدل

چکیده گرافیکی



چکیده

با بررسی تحقیقات انجام‌شده در زمینه شناورهای تندروی پله‌دار، تقریباً هیچ تحقیقی که به بررسی سطوح مثلی خیس که در اثر پرفش آب از روی پله در این‌گونه شناورها ایجاد شده و می‌تواند تاثیر مستقیمی در طراحی پله داشته باشد انجام نشده است. محاسبه مساحت این مثلث‌های خیس شده می‌تواند به طراح در راستای رفع ناپایداری طولی دینامیکی (پورپویزینگ) که یکی از مسائل بسیار مهم در طراحی شناورهای تندرو پله‌دار است کمک کند. در این راستا آزمایشات تجربی بر روی مدل فریدزما، در سه زاویه ددرایز (زاویه برخاست کف) مختلف و همچنین در سرعت‌ها و پارامترهای مختلف هندسی پله (ارتفاع‌ها و مکان‌های مختلف پله) انجام گرفته است. هدف از انجام این پژوهش دستیابی به فرمول‌های تحلیلی و محاسباتی جهت محاسبه‌ی این سطوح خیس بر اساس پارامترهای هندسی بدنه، پارامترهای هندسی پله و سایر پارامترهای هیدرودینامیکی که در خلال تست‌ها اندازه‌گیری می‌شوند، از جمله طول خیس شده‌ی کیل و چاین، تریم دینامیکی، میزان پرفش آب از روی پله می‌باشد. این روابط می‌تواند نقش بسیار مهمی در طراحی پله در شناورهای پله‌دار داشته باشد.

۱- مقدمه

ساویتسکی و مورابیتو در سال ۲۰۱۰ در یک تحقیق تجربی جامع در آزمایشگاه داویدسون به بررسی ویک پشت پاشنه شناور تندرو پرداختند. در این بررسی محققان از مدل‌های منشوری با زوایای ددرايز (زاویه برخاست کف) ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه استفاده کرده و تست‌های مدل را در سرعت‌های مختلف انجام دادند. هدف آن‌ها از انجام این تست‌ها فرموله کردن ویک پشت شناور بافاصله‌های مختلف از پاشنه است. آن‌ها روابط متقنی با اندازه‌گیری‌های تجربی که با دوربین انجام دادند ارائه کردند [۷]. اخیراً سئو و همکاران [۸] به بررسی تجربی درگ کل و دریامانی شناور تندرو با در نظر گرفتن المان اسپری ریل پرداختند. بررسی هیدرودینامیکی شناور تریماران پلنینگ در اعداد فرود مختلف به صورت تجربی و عددی توسط جیانگ انجام شده است [۹]. مارکو و همکاران [۱۰] به بررسی پترن جریان در اطراف شناور همچنین به بررسی تأثیر پله بر رفتار هیدرودینامیکی شناور پرداخته اند. سوسینوتا و همکاران [۱۱] به بررسی تأثیر تزریق حباب بر عملکرد هیدرودینامیکی و همچنین کاهش درگ شناور تندرو تک بدنه پله‌دار پرداخته‌اند. در ادامه سایر تحقیقات انجام شده در زمینه شناورهای تندرو پله‌دار در راستای بررسی تأثیرات پارامترهای هندسی پله از جمله ارتفاع و مکان پله در جدول ۱ برای درک و دید بهتر لیست شده‌اند.

جدول (۱): تحقیقات و کارهای انجام شده بر روی تأثیر هندسه پله بر هیدرودینامیک شناورهای تندرو پله‌دار

مؤلف	نوع بررسی	شرایط آب	پارامترهای مورد بررسی		
			ددرايز	پروفیل پله	ارتفاع مکان پله
[۱۲]	تجربی	آب آرام	x		
[۱۳]	تجربی	آب آرام		x	
[۱۴]	تحلیلی و عددی	آب آرام	x		x
[۱۵]	تحلیلی	آب موج		x	
[۱۶]	تجربی	آب آرام	x	x	
[۱۷]	تجربی	آب موج	x	x	
[۱۸]	تجربی	آب آرام	x	x	x
[۱۹]	تجربی	آب آرام	x	x	x
[۲۰]	عددی	آب آرام		x	

با بررسی تحقیقات انجام شده، تحقیقات بسیار ناچیزی در ارتباط با سطوح خیس در شناورهای پله‌دار انجام شده است.

در شناورهای تندرو قسمت عمده‌ی وزن توسط نیروی لیفت هیدرودینامیکی تحمل می‌شود [۱]. با افزایش سرعت در شناورهای تندرو، نسبت درگ به لیفت شناور افزایش می‌یابد. یکی از راه‌ها و راهبردهای موفق در بهبود نسبت درگ به لیفت استفاده از پله‌های عرضی است. استفاده از پله‌ی عرضی در کف شناور تندرو باعث جدایی آب از کف شناور شده و باعث کاهش سطح خیس می‌گردد. این کاهش سطح خیس عاملی در راستای کاهش میزان درگ به لیفت شناور در سرعت‌های بالا می‌باشد. از سایر مزایای استفاده از پله افزایش پایداری طولی و رفع ناپایداری می‌باشد. دلیل این پدیده این است که وجود پله‌های عرضی باعث توزیع فشاری یکنواخت‌تری در کف شناور می‌گردد [۲]. عملکرد هیدرودینامیکی شناورهای تندرو پله‌دار بستگی به سطح خیس کف شناور دارد. از آنجاکه میزان سطح خیس کف شناور نیز احتمالاً ارتباط با ارتفاع و مکان پله خواهد داشت، بنابراین می‌توان گفت برای بررسی سطوح خیس می‌بایست به سراغ بررسی این دو پارامتر به عنوان پارامترهای تأثیرگذار رفت. با طراحی مناسب این دو پارامتر و به عبارت دقیق‌تر با طراحی مناسب پله در بدنه شناورهای تندرو می‌توان به عملکرد مناسب‌تری هم در میزان درگ وارد بر شناور و هم در راستای پایداری آن دست‌یافت. تحقیقات زیادی در بررسی رفتار و هیدرودینامیک شناورهای تندرو انجام شده است. بلانت و کلمنت به بررسی عددی درگ و خطوط جریان در اطراف بدنه شناور تندرو پرداختند [۳]. ساویتسکی با بررسی تجربی و انجام مدل تست بر روی مدل‌های منشوری فرمول‌های نیمه تجربی برای تخمین مقاومت شناورهای تندرو استخراج کرد [۴]. سرا و بریزولارا [۵] با استفاده از روش محاسبات عددی به بررسی درگ شناور تندرو پله‌دار پرداختند. نتایج عددی آن‌ها تطابق خوبی با نتایج تجربی ساویتسکی و نتایج تجربی شافورد داشت [۶]. ساویتسکی در ادامه‌ی تحقیقات خود بر روی شناور تندرو به بررسی اسپری آب ناشی از حرکت شناور تندرو در آب آرام پرداخته و میزان درگ ناشی از این مؤلفه را با سایر مؤلفه‌های درگ مقایسه نموده است.

محدوده سرعت	V_m	knot	۴-۲۰
فاصله مرکز ثقل از عمود پاشنه مدل	LCG_m	mm	$0.36LOA_m$
جدول (۳): مشخصات کلی شناور اصلی در نظر گرفته شده			
پارامترها	نماد	یکا	مقدار
طول کلی شناور	LOA_s	mm	۲۰۰۰۰
عرض بیشینه شناور	B_s	mm	۴۰۰۰
نسبت طول به عرض شناور واقعی	$\frac{L}{B}$	-	۵
نسبت تشابه	λ	-	۸
تغییرات زاویه ددررایز	β	°	۳۰، ۲۰، ۱۵
جابجایی کلی شناور	Δ	kg	۲۵۰۰۰
محدوده سرعت شناور	V_s	knot	۴۰-۱۰۰
فاصله مرکز ثقل از عمود پاشنه	LCG_s	mm	$0.36LOA_s$

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد برای طراحی پله در بدنه شناور تندرو دو پارامتر فاصله پله از پاشنه و ارتفاع پله به‌عنوان پارامترهای کاربردی انتخاب شده و تصمیم بر آن شد که در زوایای برخاست متفاوت موقعیت پله و ارتفاع آن تغییر کند. لذا همان‌طور که پیش‌تر گفته شد برای طراحی پله در بدنه شناور تندرو دو پارامتر فاصله پله از پاشنه و ارتفاع پله به‌عنوان پارامترهای کاربردی انتخاب شده و تصمیم بر آن شد که در زوایای برخاست متفاوت موقعیت پله و ارتفاع آن تغییر کند. لذا برای انجام این تحقیق نیاز به تولید تعداد زیادی مدل خواهد بود. به‌عنوان مثال با فرض سه زاویه برخاست کف و سه موقعیت طولی پله با تغییرات سه‌گانه ارتفاع در تمامی حالات حدوداً بدون احتساب برهم‌کنش‌ها و مدل‌های کوپل برای هر مدل ۹ حالت منحصر‌به‌فرد بایستی آزموده شود که برای سه زاویه برخاست ۲۷ حالت منحصر‌به‌فرد وجود دارد و به همین تعداد نیز مدل مجزا موردنیاز است. این شرایط علاوه بر هزینه‌ی بسیار بالا، مستلزم زمان زیادی برای ساخت و آماده‌سازی این مدل‌ها خواهد بود همچنین با افزایش تعداد مدل‌ها ممکن است خطا در ساخت و اجرای آزمون مدل افزایش یابد، به‌علاوه به دلیل افزایش تعداد مدل‌ها خطای انسانی ممکن است افزایش یابد که این امر می‌تواند آزمون مدل‌ها را نیز تحت تأثیر قرار دهد.

و تأثیر پارامترهای هندسی پله از جمله ارتفاع و مکان آن بر سطوح خیس کف شناور تا حد زیادی ناشناخته است. در این راستا هدف اصلی این تحقیق بررسی تجربی تأثیر پارامترهای هندسی پله، ددرایز و سرعت شناور بر سطوح خیس (سطوح مثلثی) پس از پله و همچنین تدوین روابط و فرمول‌هایی برای محاسبه این سطوح است. فرمول‌های ذکر شده می‌توانند نقش بسیار مهمی در طراحی بهینه پله داشته باشند.

۲- معرفی مدل مورد استفاده در تحقیق

مدل استفاده شده در تحقیق حاضر مدل منشوری فریدزما می‌باشد، این مدل از بالای چاین دارای دیواره صاف می‌باشد. زاویه برخاست مدل در طول و عرض ثابت می‌باشد. مدل فریدزما به دلیل دیواره صاف قسمت بالای چاین این امکان را می‌دهد که تغییرات پله‌ها در مدل‌ها به‌صورت یک مکانیزم پیوسته ساخته شود. جدول ۲ ویژگی‌های کلی مدل‌ها را بیان می‌کند.

جدول ۳ بیان‌کننده شناوری خواهد بود که مشخصات مدل آن در جدول ۲ بیان شده است. پس از بیان مشخصات مدل و شناور در جداول ۲ و ۳ حال به سراغ ساخت مدلی می‌رویم که بتواند پاسخگوی تحقیق در تغییر ارتفاع و مکان پله باشد، چنانچه نتوان تغییرات ارتفاع و مکان پله را در یک مدل اعمال کرد نیاز به ساخت تعداد زیادی مدل می‌باشد که این امر امکان‌پذیر نیست. در این راستا در ادامه توضیحاتی کلی از مدل چند مقطعی ارائه می‌شود.

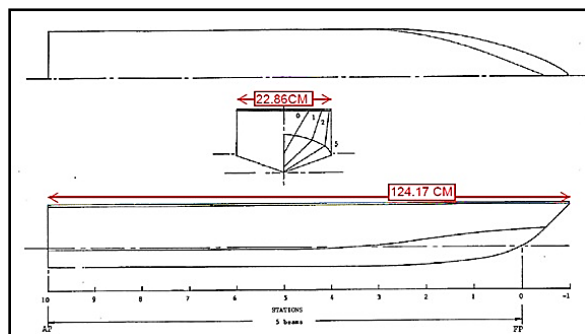
جدول (۲): مشخصات کلی مدل فریدزما در نظر گرفته شده

پارامترها	نماد	یکا	مقدار
طول کلی	LOA_m	mm	۲۵۰۰
عرض بیشینه	B_m	mm	۵۰۰
نسبت طول به عرض	$\frac{L}{B}$	-	۵
نوع بدنه	-	-	منشوری و بدنه دیواری
تغییرات زاویه ددررایز	β	°	۳۰، ۲۰، ۱۵
جابجایی کلی	Δ	kg	۴۸/۸۳

در این بخش، هدف روند فرمولاسیون محاسبه‌ی سطوح خیس مثلثی پس از پله است. در این راستا استراتژی به این نحو است که می‌بایست میزان پرش آب از روی پله در درایزها، ارتفاع و مکان‌های مختلف پله و در سرعت‌های مختلف را استخراج کرد. برای استخراج این پارامترها تست‌های تجربی بر روی مدل فریدزما انجام گرفته است که در ادامه روند و نتایج تست‌های تجربی انجام‌گرفته توضیح داده می‌شود. در بخش اول استراتژی تدوین‌شده توسط ساویتسکی که در آن ویک پشت پاشنه شناور اندازه‌گیری شده است، معرفی و توضیح داده می‌شود. در ادامه از این تحقیق در راستای اندازه‌گیری میزان پرش آب از روی پله به صورت تجربی استفاده خواهد شد.

۱-۳- استراتژی و آزمایش‌های ساویستکی بر روی مدل شناورهای تندرو در راستای استخراج پروفیل ویک

ساویستکی آزمایش‌های گوناگونی بر روی سه نمونه مدل شناور تندرو در زوایای درایز ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه انجام داد که یک مدل آن در شکل ۳ آورده شده است. ساویستکی برای اندازه‌گیری ارتفاع سطح ویک پشت مدل شناورها تست‌های متعددی در قسمت تحتانی شناور یعنی بعد از کیل و در یک چهارم عرض شناور با زاویه تریم ۲ و ۳ و ۴ و ۵ و همچنین ضرایب سرعت $C_V = 8.64$ و ضرایب بارگذاری ۰/۴ و ۰/۶ و ۰/۸ در زاویه‌های درایز ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ درجه انجام داد. نحوه اندازه‌گیری ویک پشت شناور در شکل ۴ و ۵ آورده شده است.



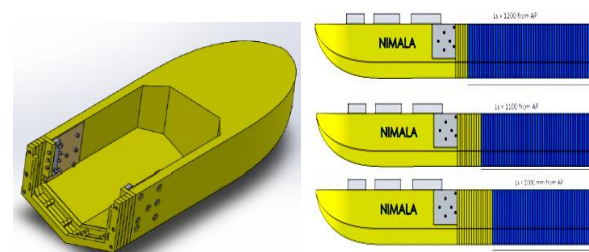
شکل (۳): مدل ساویستکی با زاویه درایز ۲۰ درجه [۱۱].

لذا در صورت امکان ساخت مدلی انعطاف‌پذیر نسبت به دو پارامتر طول پله و ارتفاع پله بسیار مفید خواهد بود. شکل ۱ نمایی از مدل چند مقطعی و نحوه اتصال قسمت‌ها به یکدیگر را نشان داده است.



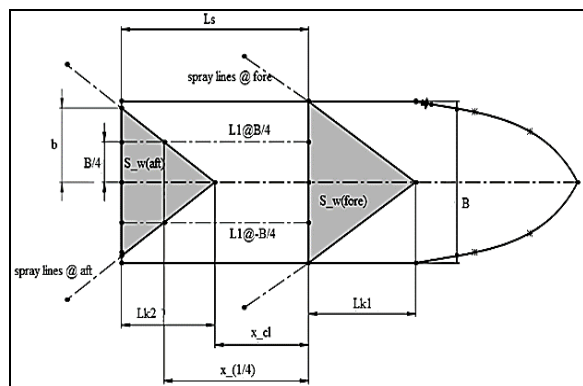
شکل (۱): نحوه اتصال قسمت سینه به مقاطع قسمت پاشنه.

پس از بررسی‌های انجام‌شده و طراحی‌های اولیه برای ساخت مدل چند مقطعی تصمیم گرفته شد که قسمت پاشنه متشکل از چند بلوک باشد که هر یک از این بلوک‌ها خود متشکل از چند مقطع است و تغییرات ارتفاع بین بلوک‌ها اتفاق بیفتد؛ یعنی یک بلوک به صورت کامل و یکپارچه تا پایان تست‌ها باقی بماند و سایر بلوک‌ها نسبت به یکدیگر جابجا شوند. در شکل ۲ موقعیت بلوک‌ها نسبت به یکدیگر نشان داده شده است.



شکل (۲): نمونه‌ای از جانمایی شماتیک جابجایی طولی مقاطع نسبت به یکدیگر.

۳- تدوین رابطه تحلیلی استخراج مساحت مثلثی‌های خیس پس از پله



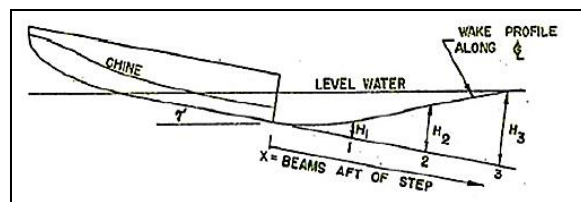
شکل (۶): پارامترهای هیدرودینامیکی در روش ساویتسکی.
جدول (۴): پارامترهای استخراج شده در مدل تست ساویتسکی جهت استخراج پروفیل و یک پشت پاشنه

پارامترهای اندازه گیری شده	نماد معرف پارامتر
L_K	طول خیس شده کیل
L_C	طول خیس شده چاین
τ	تریم دینامیکی
C_v	ضریب سرعت
H	ارتفاع ویک پشت پاشنه در مکان های مختلف پس از پاشنه
X_{cl}	میزان پرش آب پس از پاشنه در خط مرکزی (خط مرکزی)
$X_{1/4}$	میزان پرش آب پس از پاشنه در ۱/۴ عرض شناور
β	زاویه ددرایز
L	طول
B	عرض
SW_{aft}	مساحت سطح خیس عقب
SW_{fore}	مساحت سطح خیس جلو

پس از نمایش پارامترهای مورداستفاده در روش ساویتسکی حال روابط استخراج شده این روش برای استخراج پروفیل ویک پشت پاشنه در ادامه آورده شده است، روابط در دو راستا به دست آمده اند.

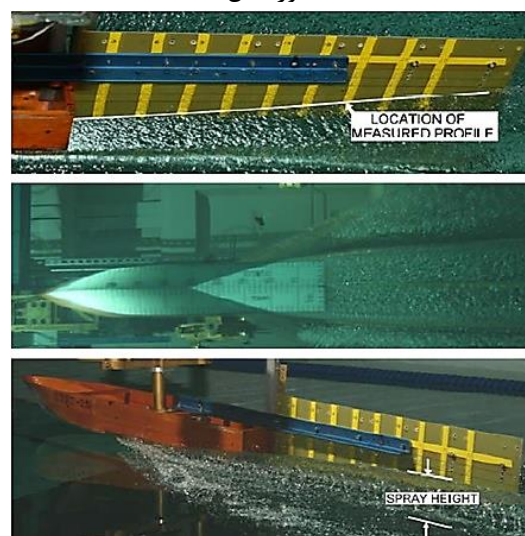
- ✓ راستای خط مرکزی
- ✓ راستای خط ۱/۴ عرض شناور

۱-۱-۳- استخراج روابط در راستای خط مرکزی



شکل (۴): محل محور مختصات جهت اندازه گیری ویک در

شناور مدل.



شکل (۵): نحوه اندازه گیری ویک پشت شناور مدل

ساویتسکی.

نحوه استخراج پروفیل ویک پشت پاشنه به این نحو بوده است که یک طرح خط کش مانند در پشت بدنه تعبیه شده و در کف حوضچه تست نیز دوربینی کار گذاشته شده است. پس از تصویربرداری از جانب و کف شناور، پارامترهای موردنظر جهت استخراج پروفیل ویک با تکنیک پردازش تصویر به دست آمده اند. پارامترهای اندازه گیری شده در حین انجام تست در جدول شماره ۴ آورده شده است. پس از پردازش تصویر و همچنین اندازه گیری داده های به دست آمده از قبیل طول خیس شده چاین و کیل، ارتفاع و مکان ویک پشت پاشنه و سایر پارامترهای هیدرودینامیکی، ساویتسکی روابطی را بین این پارامترها برقرار کرد که در ادامه این روابط بیان می گردد. قبل از بیان روابط، نموداری در شکل ۶ آورده شده است که پارامترهای بیان شده در روابط را ترسیم می کند.

پس از فرمولاسیون و یک پشت پاشنه شناور در زوایای ددرایز و سرعت‌های مختلف در تحقیق ساویتسکی، در ادامه با الگوگیری از این تحقیق به سراغ محاسبه سطوح خیس مثلثی ایجادشده در قسمت انتهایی شناور تندروی پله‌دار خواهیم رفت. برای محاسبه سطح خیس بدین‌صورت عمل می‌شود که در ابتدا مدل‌های فریدزما در زوایای ددرایز ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درجه ساخته‌شده و در سرعت‌های مختلف در آزمایشگاه دریایی شهدای خلیج‌فارس تست شدند. در خلال تست پارامترهای طول خیس شده چاین و کیل، تریم دینامیکی و میزان پرش آب از روی پله با استفاده از تصویر و فیلم‌های به‌دست‌آمده و با تکنیک پردازش تصویر اندازه‌گیری می‌شوند. همان‌طور که در بخش دوم پژوهش بیان شد در ساخت مدل‌ها از روشی استفاده شده است که به‌توان ارتفاع و مکان پله را در طول شناور تغییر داد. در ادامه به بررسی تجربی تأثیر پله بر پرش آب و تشکیل سطوح مثلثی خیس در قسمت انتهایی شناور پرداخته می‌شود.

۲-۳- انجام مدل تست و اندازه‌گیری پرش آب و سطح خیس پس از پله

قبل از انجام تست می‌بایست مدل و ماکتی با یک مقیاس مشخص از روی نمونه اصلی شناور با در نظر گرفتن تشابه هندسی ساخته شود. سپس با تشابه عدد فرود سرعت تست مدل از روی سرعت شناور اصلی تعیین می‌گردد؛ و در ادامه با مشابه قرار دادن اعداد بی‌بعدی همچون رینولدز، فرود، وبر و ... تشابه دینامیکی حاصل می‌شود. با برقراری سه تشابه هندسی، سینماتیکی و دینامیکی می‌توان نتایج تست مدل را به شناور اصلی تعمیم داد. در ادامه ابتدا به انتخاب، تعیین ابعاد، ساخت و آماده‌سازی مدل جهت انجام مدل تست پرداخته می‌شود. پس از طراحی مدل‌ها و قبل از انجام تست‌های تجربی، هیدرواستاتیک شناور با توجه به ابعاد و شرایط بارگذاری مدل بررسی می‌شود. تحلیل هیدرواستاتیک شناور در نرم‌افزار مکسرف انجام شده است. متغیرهای ورودی به نرم‌افزار، تناژ، موقعیت مرکز ثقل و متغیرهای خروجی محل آب‌خور در سینه و پاشنه شناور و همچنین زاویه‌ی تریم هیدرواستاتیکی می‌باشد. جدول ۵

جهت استخراج پروفیل و یک پشت بدنه شناور تندرو در راستای خط مرکزی (X_{cl}) ساویتسکی از تصاویر دوربین‌های کف و خط‌کش متصل شده به بدنه شناور که پس از پاشنه تعبیه شده بود استفاده کرد و روابطی برای ارتفاع و یک برحسب مکان و فاصله پس از پاشنه، زاویه ددرایز، طول خیس شده کیل، طول خیس شده چاین و ضریب سرعت به‌دست آورد. روابط ۱ تا ۳ بیان‌کننده این فرمول‌ها هستند [۱۱].

$$\beta = 10$$

$$H = 0.17[1.5 + 0.03L_K\tau^{1.5}] \sin \left[\frac{\pi}{C_v} \left(\frac{X}{3} \right)^{1.5} \right] \quad (۱)$$

$$\beta = 20$$

$$H = 0.17[2.0 + 0.03L_K\tau^{1.5}] \sin \left[\frac{\pi}{C_v} \left(\frac{X}{3} \right)^{1.5} \right] \quad (۲)$$

$$\beta = 30$$

$$H = 0.17[2.0 + 0.03L_K\tau^{1.5}] \sin \left[\frac{\pi}{C_v} \left(\frac{X}{3} \right)^{1.5} \right] \quad (۳)$$

پارامترهای بکار رفته در روابط فوق در جدول ۴ آورده شده‌اند.

۲-۱-۳- استخراج روابط در راستای ۱/۴ عرض شناور

جهت استخراج پروفیل و یک پشت بدنه شناور تندرو در ۱/۴ عرض شناور ($X_{1/4}$) ساویتسکی همانند بخش قبل از تصاویر دوربین‌های کف و خط‌کش متصل شده به بدنه شناور که پس از پاشنه تعبیه‌شده بود استفاده کرد و روابطی برای ارتفاع و یک پس از پاشنه برحسب مکان و فاصله پس از پاشنه، زاویه ددرایز، طول خیس شده کیل و چاین، ضریب سرعت به دست آورد. روابط ۴ تا ۶ بیان‌کننده این فرمول‌ها هستند [۱۱].

$$\beta = 10^\circ$$

$$H = 0.17[0.75 + 0.03L_K\tau^{1.5}] \sin \left[\frac{\pi}{C_v} \left(\frac{X}{3} \right)^{1.5} \right] \quad (۴)$$

$$\beta = 20^\circ$$

$$H = 0.17[0.75 + 0.03L_K\tau^{1.5}] \sin \left[\frac{\pi}{C_v} \left(\frac{X}{3} \right)^{1.5} \right] \quad (۵)$$

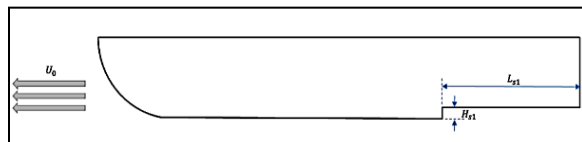
$$\beta = 30^\circ$$

$$H = 0.17[0.75 + 0.03L_K\tau^{1.5}] \sin \left[\frac{\pi}{C_v} \left(\frac{X}{3} \right)^{1.5} \right] \quad (۶)$$

سرعت مدل	(m/s)	۷	۸	۱۰
ضریب سرعت معادل	-	۳/۱۶	۳/۶۱	۴/۵۱

۱-۲-۳- طراحی تست (تعیین محدوده تغییر ارتفاع و مکان پله)

در انجام تست‌های تجربی بر روی شناور پله‌دار، نکته‌ی مهم میزان و بازه‌ی تغییرات ارتفاع و مکان پله می‌باشد. در این راستا به بررسی بازه‌ی تغییرات ارتفاع و مکان پله به عبارت دقیق‌تر طراحی تست‌ها پرداخته می‌شود. فاصله پله از پاشنه ترنسام و همچنین ارتفاع پله در عملکرد آن تأثیرگذار است به این صورت که در قسمت پشت پله نیروی لیفت تشکیل می‌شود و هرچه این قسمت بزرگتر شود نیروی لیفت اضافی تولیدشده به سبب ایجاد پله، افزایش می‌یابد. این نکته حائز اهمیت است که فاصله پله تا پاشنه ترنسام و همچنین ارتفاع آن محدود به مقادیر بیشینه و کمینه می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود پله تقریباً در بخش انتهایی شناور قرار دارد و مدل آزمایشگاهی را به دو قسمت تقسیم می‌کند.



شکل (۷): شناور تک پله و معرفی متغیرهای ورودی.

طول قسمت انتهایی شناور است که به‌عنوان یکی از پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده است. H_{S1} که نشان‌دهنده ارتفاع پله است به‌عنوان پارامتر دوم ورودی و سرعت شناور U_0 نسبت به سیالی (آب) که در آن قرار دارد نیز به‌عنوان پارامتر سوم در نظر گرفته شده است. بازه‌ی تغییرات پارامترهای ورودی در فضای طراحی در جدول ۷ آمده است.

جدول (۷): بازه‌ی تغییرات پارامترهای ورودی در یک زاویه ددرایز (برخاست) ثابت

پارامترها	یکای	بازه‌ی تغییرات
سرعت	(m/s)	$3 \leq U_0 \leq 10$
ارتفاع پله	(mm)	$2\%B(10) \leq H_s \leq 6\%B(30)$

بیانگر مشخصات هیدرواستاتیک جهت انجام مدل تست می‌باشد.

لازم به توضیح است که در جدول ۵، LCG برابر با ۰/۳۶ طول مدل و همچنین در ۹۰۰ میلیمتری از عمود پاشنه (AP) قرار دارد. پس از تعیین هیدرواستاتیک مدل و طی روند آماده‌سازی مدل از قبیل خط‌کشی مدل، بستن مدل به ارابه، تعیین راستای کشش، تنظیم وزن و آبخور و کالیبراسیون سنسورها، مدل آماده تست شدن می‌باشد. سرعت تست مدل از روی سرعت شناور اصلی و با توجه به تشابه عدد فرود تعیین شده است. در جدول ۶ سرعت انجام تست مدل شناور آورده شده است. تست‌های مدل در سه سرعت انجام می‌شود. در هر سرعت پارامترهای موردنیاز جهت فرموله کردن پرش آب و سطح خیس از جمله طول خیس شده کیل و چاین، ارتفاع و مکان‌های مختلف پله و همچنین ددرایزهای مختلف تعیین و ثبت می‌گردند و سپس با الگوگیری از استراتژی ساویتسکی به فرمولاسیون پرش آب و سطوح خیس مثلثی پرداخته می‌شود. پس از تعیین سرعت شناور با زاویه برخاست کف (ددرایز) مختلف تست‌ها انجام شده و نتایج تست‌ها در شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ آورده شده است.

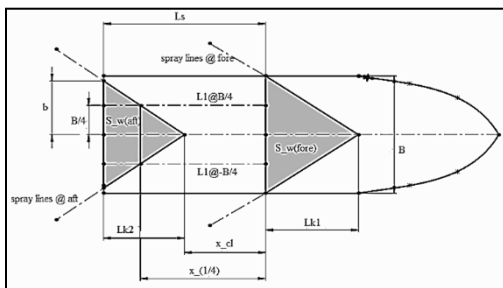
جدول (۵): مشخصات هیدرواستاتیک مدل‌های بدون پله

مورد	تجزیه (°)	درفت (mm)	طول نمونه (m)	جابجایی نمونه (ton)	طول مدل (mm)	جابجایی مدل (kg)	نسبت تشابه	تغییرات زاویه ددرایز (°)
۱	۱/۱۸	۱۰/۸	۲۰	۲۵	۲۵۰	۴۸/۸۳	۸	۱۵
۲	۱/۲۶	۱۱۳/۷	۲۰	۲۵	۲۵۰	۴۸/۸۳	۸	۲۰
۳	۱/۶	۱۴۲/۱	۲۰	۲۵	۲۵۰	۴۸/۸۳	<	۲۰

جدول (۶): سرعت تست مدل شناور

سرعت شناور	(m/s)	۲۸/۳	۲۲/۶	۱۹/۸
------------	-------	------	------	------

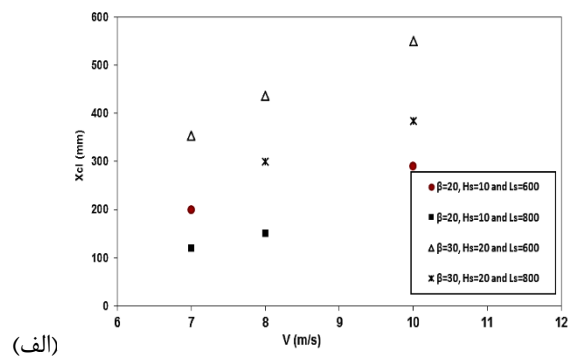
۲	۲۰	۶۰۰	۱۰	۱۰
۳	۲۰	۶۰۰	۲۰	۱۰
۴	۲۰	۶۰۰	۳۰	۷
۵	۲۰	۶۰۰	۳۰	۸
۶	۲۰	۶۰۰	۳۰	۱۰
۷	۲۰	۸۰۰	۱۰	۷
۸	۲۰	۸۰۰	۱۰	۸
۹	۲۰	۱۱۰۰	۳۰	۷
۱۰	۳۰	۸۰۰	۲۰	۸
۱۱	۳۰	۸۰۰	۲۰	۱۰



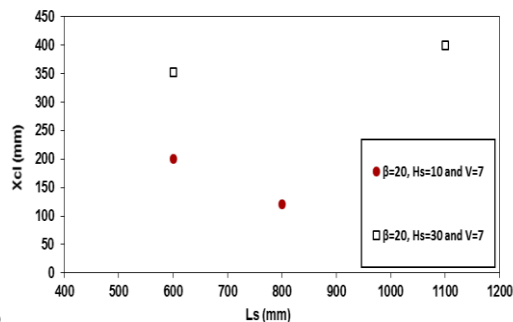
شکل (۸): نمایش پارامترهای موردنیاز جهت استخراج

روابط محاسباتی پرش آب و سطح خیس پس از پله.

پس از انجام تست در سرعت‌ها، زوایای ددرایز و ارتفاع و مکان‌های پله، همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

$$10\%L_{OA}(300) \leq L_{S1} \leq 48\%L_{OA}(1100) \quad (\text{mm}) \quad \text{طول پله}$$

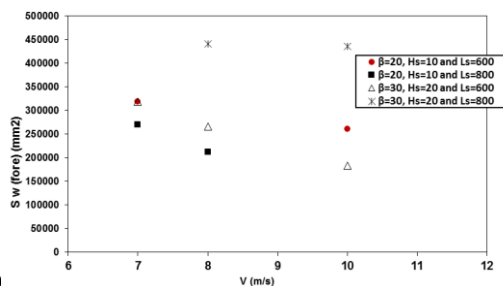
با تعیین بازه‌ی تغییرات، باید به سراغ طراحی تست‌ها رفت. هدف از طراحی تست این است که استخراج گردد تست‌ها در چه سرعت، چه مکان و ارتفاع پله‌ای انجام گیرد. با انتخاب سه ارتفاع، سه مکان پله و از آنجا که سه سرعت و سه زاویه ددرایز در نظر گرفته شده است ۸۱ حالت انجام تست وجود خواهد داشت. با توجه به عدم امکان انجام تمامی تست‌ها تعدادی از حالات که در جدول ۸ آورده شده است انتخاب شده و در این حالات انتخابی تست‌های مدل در آزمایشگاه دریایی شهدای خلیج فارس انجام می‌گیرد.

۲-۲-۲- انجام تست

در ابتدا پارامترها و سطوح مثلثی که در خلال تست تجربی می‌بایست اندازه‌گیری شوند جهت درک بهتر در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، Lk_1 و Lk_2 به ترتیب طول خیس شده‌ی کیل بدنه جلویی و عقبی می‌باشند. همچنین x_{cl} فاصله افقی پرش آب تا مکان پله در مکان خط مرکزی می‌باشد و $X_{L/4}$ فاصله پرش آب تا مکان پله در $1/4$ عرض می‌باشد. پارامترهای Sw_{aft} و Sw_{fore} به ترتیب مساحت خیس جلویی و مساحت خیس پاشنه (عقب) شناور است. این دو مساحت خیس به ترتیب قبل از پله و در انتهای شناور (پاشنه) واقع شده‌اند. در خلال انجام تست هدف اندازه‌گیری پرش آب و سطوح خیس در ددرایزها و سرعت‌های مختلف می‌باشد. نحوه اندازه‌گیری میزان پرش آب و سطح خیس در تست‌های تجربی بدین نحو است که پس از آماده‌سازی مدل و انجام تست، به‌وسیله دوربین‌هایی که در اطراف و زیر مدل تعبیه شده از جهات مختلف از مدل در حال تست فیلم‌برداری شده و سپس با تکنیک پردازش تصویر داده‌های موردنظر استخراج می‌گردد.

جدول (۸): برنامه تست‌های مدل تک پله

مورد	زاویه ددرایز (°)	موقعیت طولی پله از پاشنه (mm)	ارتفاع پله (mm)	سرعت شناور (m/s)
۱	۲۰	۶۰۰	۱۰	۷

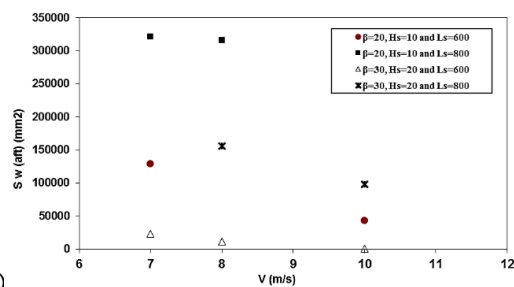


(ج)

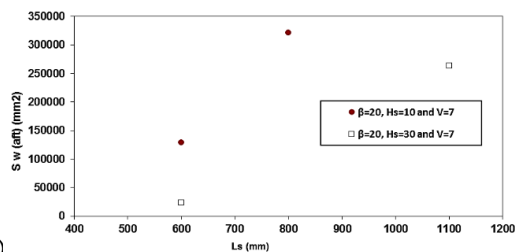
شکل (۱۰): الف) مساحت سطح خیس سینه در سرعت‌های

مختلف، ب) مکان‌های پله، ج) ارتفاع‌های پله.

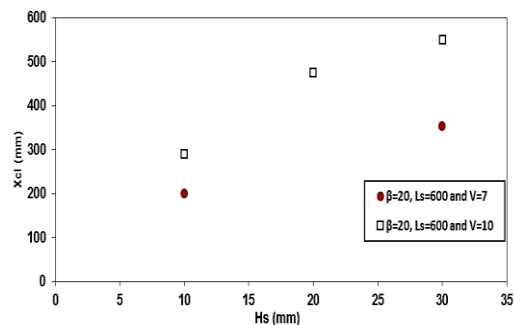
مساحت خیس شده‌ی ناحیه پاشنه SW_{aft} همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با افزایش سرعت کاهش می‌یابد، اما با افزایش ارتفاع پله میزان این مساحت کاهش و با افزایش فاصله پله تا پاشنه ترانسام افزایش خواهد یافت. شکل ۱۲ سطح خیس شده‌ی کلی شناور (SW_{total}) را نشان داده است. سطح خیس شده‌ی کلی شناور با افزایش فاصله پله تا پاشنه افزایش یافته، با افزایش سرعت و ارتفاع پله کاهش می‌یابد. نحوه اندازه‌گیری سطوح خیس از روی تصاویر ضبط‌شده به این صورت است که تصاویر استخراج‌شده برای اندازه‌گیری میزان پرش آب و سطوح خیس وارد نرم‌افزار سالیپورک شده و پردازش انجام می‌گیرد.



(الف)



(ب)



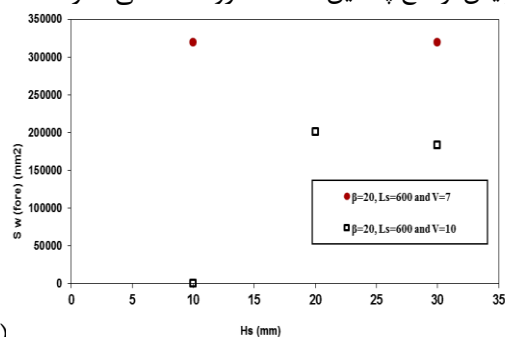
(ج)

شکل (۹): الف) میزان پرش آب در سرعت‌های مختلف، ب)

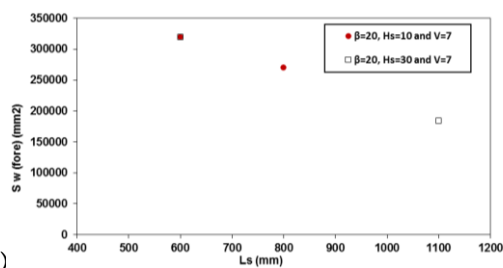
مکان‌های مختلف پله، ج) ارتفاع‌های مختلف پله.

در تمام موارد تست شده با افزایش ارتفاع پله و سرعت مدل میزان پرش آب از روی پله افزایش یافته است؛ اما در مورد تأثیر تغییر مکان پله بر میزان پرش آب روند منظمی وجود ندارد و همان‌طور که در شکل ۹ ب) نشان داده شده است تأثیر مکان پله بر پرش آب به صورت متفاوت بوده و گاهی کاهش و گاهی افزایشی است و نمی‌توان نتیجه دقیقی از این تغییرات گرفت.

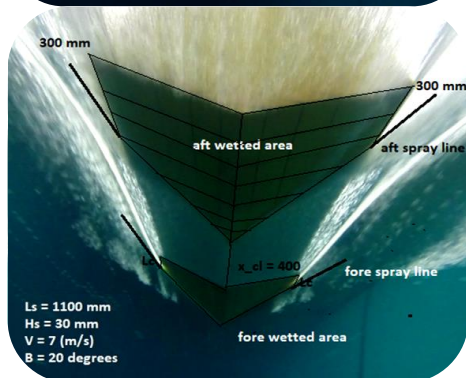
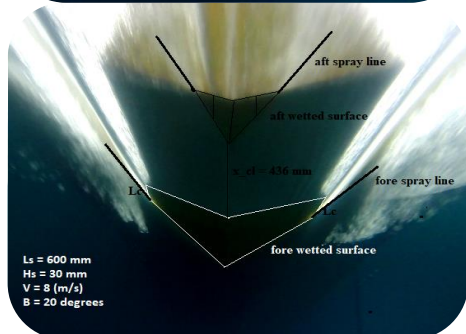
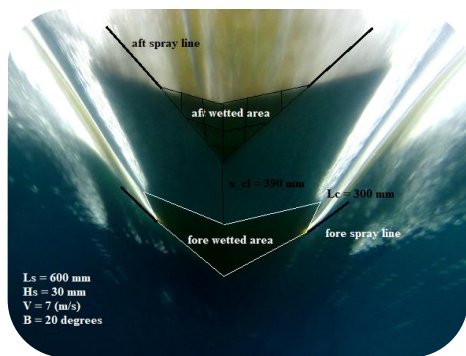
در شکل ۱۰ به بررسی تأثیر سرعت، ارتفاع و مکان پله بر مساحت خیس جلو (SW_{fore}) شناور پرداخته شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است با افزایش سرعت این مساحت کاهش یافته است، اما با کاهش یا افزایش ارتفاع پله این مساحت روند منظمی ندارد.



(الف)



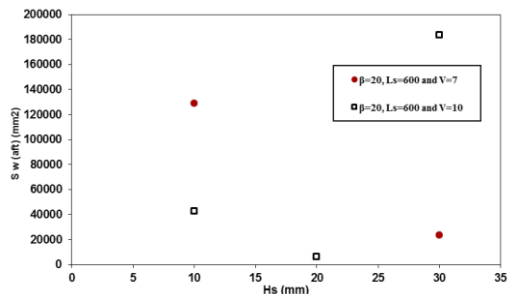
(ب)



شکل (۱۳): تصاویر سطوح خیس در شناور تندروی تک پله در حین انجام تست مدل در سرعت‌های ۷ و ۸ متر بر ثانیه.

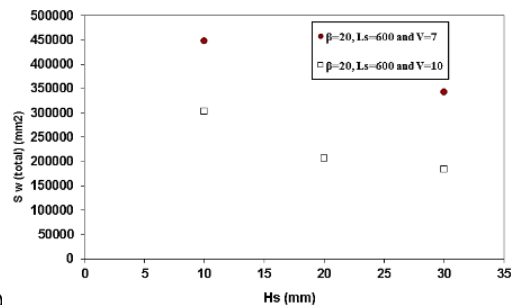
۳-۲-۳- تدوین روابط و فرمول‌های محاسبه‌ی سطوح خیس

شکل ۱۴ سطح خیس سینه و پاشنه مدل تک پله را ترسیم می‌کند. همان‌گونه که نشان داده شده است جریان اسپری در قبل و پس از پله چاین شناور را قطع کرده است. پس از اندازه‌گیری تجربی پارامترهای پرش آب و سطوح خیس در ادامه به تدوین فرمول‌ها و روابط تحلیلی استخراج این سطوح بر مبنای استراتژی ساویتسکی پرداخته می‌شود. طبق نتایج خروجی ساویتسکی و مورابیتو در این حالت، یعنی حالتی که اسپری آب قبل از پله چاین شناور را قطع

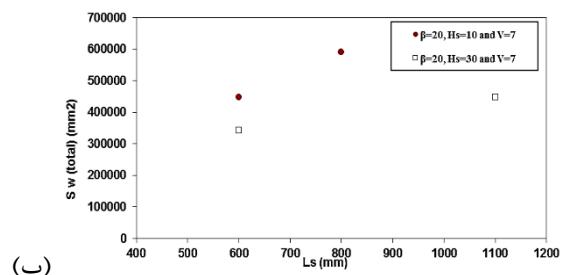


(ج)

شکل (۱۱): الف) مساحت سطح خیس پاشنه در سرعت‌های مختلف، ب) مکان‌های پله، ج) ارتفاع‌های پله.

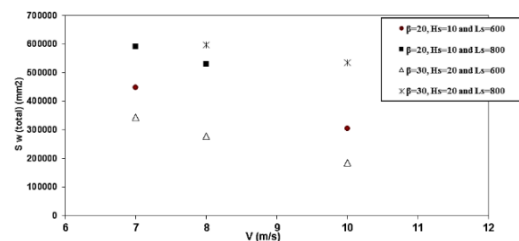


(الف)



(ب)

شکل (۱۲): الف) سطح خیس کل در سرعت‌های مختلف، ب) مکان‌های مختلف پله، ج) ارتفاع‌های مختلف پله.



(ج)

ادامه شکل ۱۲.

شکل ۱۳ این پردازش اطلاعات خروجی از تصاویر در نرم-افزار سالدورک را نمایش می‌دهد. در ادامه به منظور درک بهتر نتایج تجربی استخراج‌شده، نتایج به صورت جمع‌بندی در جدول ۹ آورده شده است.

$$SW_{fore} = 0.5Bl_K \quad (8)$$

- اگر خط اسپری چاین بدنه را قبل از پله قطع کرد، از رابطه ۹ برای محاسبه‌ی سطح خیس سینه استفاده می‌شود.

$$SW_{fore} = \frac{B}{2}(l_c + l_K) \quad (9)$$

در روابط (۸) و (۹)، l_K و l_c به ترتیب طول خیس شده کیل و چاین شناور است. برای محاسبه سطح خیس پاشنه SW_{aft} چهار سناریو وجود دارد که در ادامه در جدول ۱۰ ذکر می‌گردد. سناریوهای چهارگانه جهت محاسبه سطح خیس (سطح خیس مثلثی) پاشنه بر مبنای پرش آب در فاصله $1/4$ عرض از خط مرکزی ($x_{1/4}$) تعریف می‌گردند.

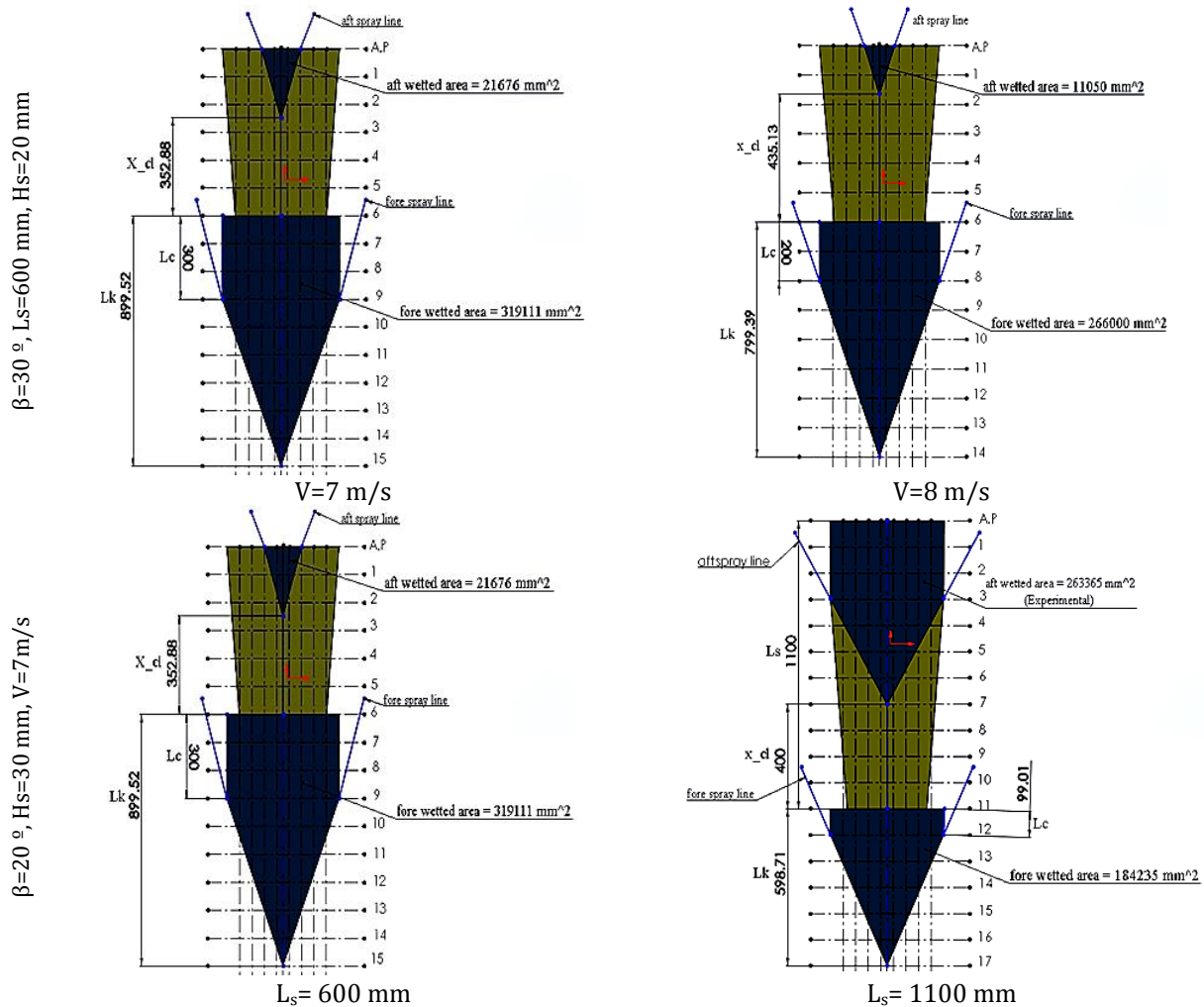
کرده و طول خیس شده چاین موجود باشد پله مذکور طراحی مناسبی داشته است. همچنین نمایی از سطح خیس شده پاشنه در سرعت ۸ متر بر ثانیه و در مکان و ارتفاع پله ۸۰۰ و ۲۰ میلی‌متر و زاویه ددرایز ۳۰ درجه در شکل ۱۵ ترسیم شده است.

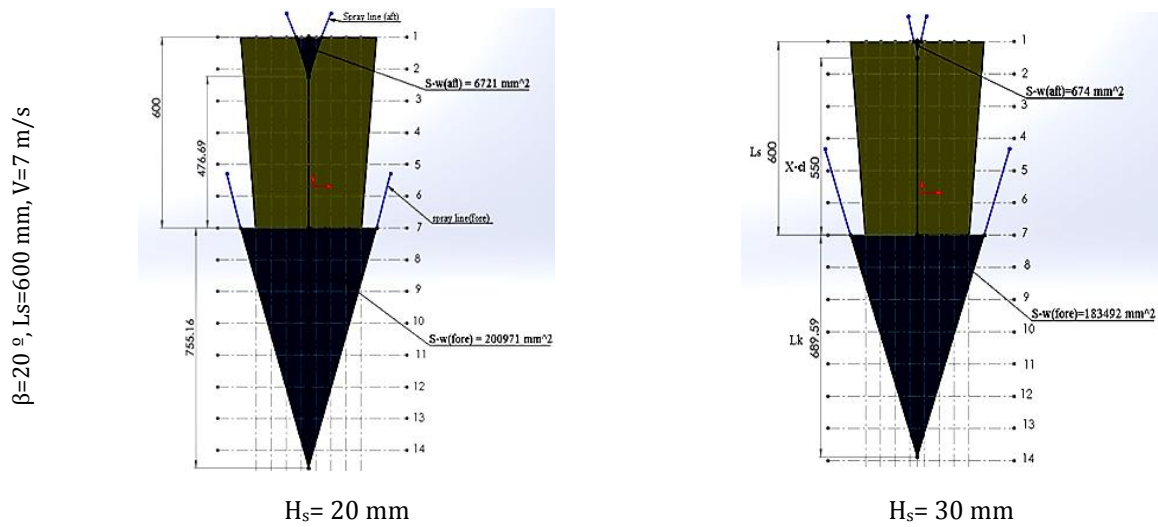
پس از نمایش سطوح با دانستن میزان خیسی چاین، کیل و میزان پرش آب می‌توان سطوح خیس را فرموله کرد. سطح خیس کل از مجموع سطوح خیس سینه و پاشنه به دست می‌آید (رابطه ۷).

$$SW_{total} = SW_{aft} + SW_{fore} \quad (7)$$

در رابطه فوق SW_{fore} مساحت خیس سینه شناور است که برای محاسبه این سطح دو سناریو تبیین می‌شود:

- اگر خط اسپری پله را قطع کرد، از رابطه ۸ برای محاسبه‌ی سطح خیس سینه استفاده می‌شود.



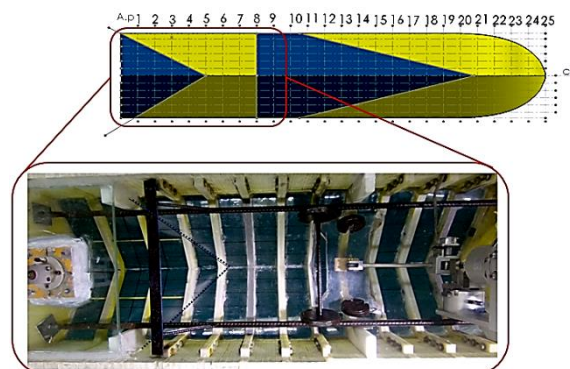


شکل (۱۴): نحوه استخراج نتایج پرش آب و سطح خیس در نرم‌افزار سالی‌دورکس.

جدول (۹): نتایج تست تجربی پرش آب و سطوح خیس سینه، پاشنه و سطح خیس کلی

معیارهای اندازه‌گیری شده				ورودی آزمون‌های تجربی				مورد
$Sw_{total} = Sw_{fore} + Sw_{aft}$ (mm ²)	Sw_{fore} (mm ²)	Sw_{aft} (mm ²)	x_{cl} (mm)	V (m/s)	H_s (mm)	L_s (mm)	β (deg)	
۴۴۸۰۲۴	۳۱۹۱۱۷	۱۲۸۹۰۷	۱۹۹/۴	۷	۱۰	۶۰۰	۲۰	۱
۳۰۳۶۴۲	۲۶۰۸۵۱	۴۲۷۹۱	۲۹۰/۲	۱۰	۱۰	۶۰۰	۲۰	۲
۲۰۷۰۴۲	۲۰۰۹۷۱	۶۰۷۱	۴۷۶/۶	۱۰	۲۰	۶۰۰	۲۰	۳
۳۴۲۶۱۱	۳۱۹۱۱۱	۲۳۵۰۰	۳۵۲/۸	۷	۳۰	۶۰۰	۲۰	۴
۲۷۷۰۵۰	۲۶۶۰۰۰	۱۱۰۵۰	۴۳۵/۱	۸	۳۰	۶۰۰	۲۰	۵
۱۸۴۱۶۶	۱۸۳۴۹۲	۶۷۴	۵۵۰/۱	۱۰	۳۰	۶۰۰	۲۰	۶
۵۹۱۴۹۵	۲۶۹۸۸۰	۳۲۱۶۱۵	۱۲۰/۴	۷	۱۰	۸۰۰	۲۰	۷
۵۲۸۶۷۷	۲۱۲۷۰۴	۳۱۵۹۷۳	۱۵۰/۳	۸	۱۰	۸۰۰	۲۰	۸
۴۴۷۶۰۰	۱۸۴۲۳۵	۲۶۳۳۶۵	۴۰۰/۱	۷	۳۰	۱۱۰۰	۲۰	۹
۵۹۷۴۳۷	۴۴۱۷۶۷	۱۵۵۶۷۰	۳۰۰/۵	۸	۲۰	۸۰۰	۳۰	۱۰
۵۳۴۰۸۸	۴۳۵۹۳۸	۹۸۱۵۰	۳۸۳/۵	۱۰	۲۰	۸۰۰	۳۰	۱۱

شکل (۱۵): نمایی از سطح خیس شده پاشنه در سرعت ۷ متر بر ثانیه و زاویه ددرایز ۳۰ درجه و ارتفاع و مکان پله ۸۰۰ و ۲۰ میلی‌متر.



۴-۲-۳- بررسی دقت نتایج روابط به‌دست آمده

روابط فوق بر مبنای استراتژی ساویتسکی به‌دست آمده‌اند، حال از آنجاکه در بخشهای قبل مساحت سطح خیس پیش و

می‌بایست به نحوی پله را طراحی کرد که در سرعت کاربری باعث کاهش درگ و افزایش پایداری یا به عبارت دیگر رفع ناپایداری‌ها گردد. در این راستا فرمول‌های تحلیلی که بتوان با تکیه بر آن‌ها درگ شناور تندروری پله‌دار را تخمین زد به وسیله محققانی همچون ساویتسکی و ساوان تدوین گردیده است و جای خالی روابطی که بتوان به وسیله آن‌ها سطح خیس و میزان پرش آب را تخمین زد خالی بود. در این راستا با الگوگیری از فرمولاسیون ساویتسکی برای پروفیل آب در این تحقیق میزان پرش آب در خط مرکزی کیل و یک‌چهارم عرض به دست آمده و با استفاده از نتایج تجربی صحت‌سنجی گردید. در ادامه با استفاده این دو پارامتر سطوح خیس که عامل بسیار مهمی در تعیین پایداری طولی شناور تندروری پله‌دار می‌باشند تعیین گردید.

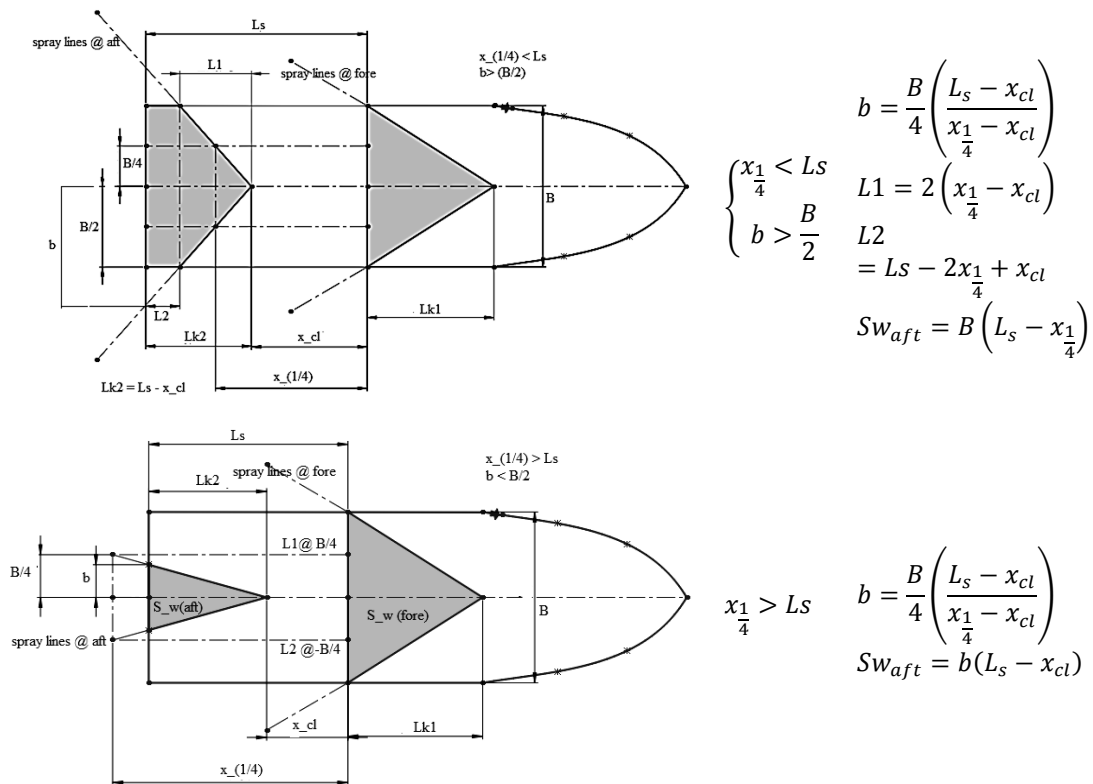
پس از پله در سرعت‌ها و زوایای ددرایز مختلف با تست مدل و بررسی تجربی نیز به دست آمده‌اند، به مقایسه نتایج خروجی روابط و فرمول‌های تحلیلی و اندازه‌گیری‌های تجربی جهت برآورد دقت روابط پرداخته می‌شود. مقایسه‌ها در جدول ۱۱ آورده شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۱۱ آورده شده است، نتایج بررسی تحلیلی و تجربی در اغلب موارد بررسی نزدیک به هم بوده و روابط و فرمول‌های استخراج شده دقت مناسبی دارند.

۴- نتیجه‌گیری

شناور تندروری پلنینگ تک پله در صنعت دریایی جایگاه ویژه‌ای دارد. یکی از اصلی‌ترین قسمت‌ها در طراحی بدنه این‌گونه شناورها طراحی پله می‌باشد. در راستای طراحی پله دو هدف دنبال می‌شود، درگ و پایداری. بدین معنی که

جدول ۱۰: فرمول‌ها و روابط استخراج سطح خیس پاشنه شناور تک پله

شکل مربوطه	شرایط	رابطه محاسبه سطح خیس پاشنه
	$x_1 = Ls$	$Sw_{aft} = \frac{B}{4 \left(x_1 - x_{cl} \right)}$
	$\begin{cases} x_1 < Ls \\ b \leq \frac{B}{2} \end{cases}$	$b = \frac{B}{4} \left(\frac{Ls - x_{cl}}{x_1 - x_{cl}} \right)$ $\begin{cases} b = \frac{B}{2} & Sw_{aft} = \frac{B}{2} (Ls - x_{cl}) \\ b < \frac{B}{2} & Sw_{aft} = b(Ls - x_{cl}) \end{cases}$



جدول ۱۱: مقایسه بین نتایج تحلیلی و تجربی در محاسبه پرش آب و سطح خیس پاشنه

مورد	شرایط انجام تست (ارتفاع و مکان پله، ددرایز، سرعت)				نتایج تست‌های تجربی		نتایج تحلیلی			
	β	L_s	H_s	V	x_{cl}	Sw_{aft}	x_{cl}	Sw_{aft}	درصد خطا در محاسبه سطح خیس پاشنه	درصد خطا در محاسبه پرش آب
۱	۲۰	۶۰۰	۱۰	۷	۱۹۹/۴	۱۲۸۹۰۷	۲۰۰	۱۳۸۰۰۰	۰/۳۰۱	۷/۰۵۴
۲	۲۰	۶۰۰	۱۰	۱۰	۲۹۰/۲	۴۲۷۹۱	۲۹۰	۴۵۸۳۹	۰/۰۶۹	۷/۱۲۳
۳	۲۰	۶۰۰	۲۰	۱۰	۴۷۶/۶	۶۰۷۱	۴۷۵	۵۶۶۲	۰/۳۳۶	۶/۷۳۷
۴	۲۰	۶۰۰	۳۰	۷	۳۵۲/۸	۲۳۵۰۰	۳۹۰	۲۶۸۵۹	۱۰/۵۴۴	۱۴/۲۹۴
۵	۲۰	۶۰۰	۳۰	۸	۴۳۵/۱	۱۱۰۵۰	۴۳۶	۱۳۸۰۰	۰/۲۰۷	۲۴/۸۸۷
۶	۲۰	۶۰۰	۳۰	۱۰	۵۵۰/۱	۶۷۴	۵۵۰	۸۰۱	۰/۰۱۸	۱۸/۸۴۳
۷	۲۰	۸۰۰	۱۰	۷	۱۲۰/۴	۳۲۱۶۱۵	۱۲۰	۳۲۷۹۹۰	۰/۳۳۲	۱/۹۸۲
۸	۲۰	۸۰۰	۱۰	۸	۱۵۰/۳	۳۱۵۹۷۳	۱۵۰	۳۰۵۵۳۰	۰/۲۰۰	۳/۳۰۵
۹	۲۰	۱۱۰۰	۳۰	۷	۴۰۰/۱	۲۶۳۳۶۵	۴۰۰	۲۳۷۴۴۰	۰/۰۲۵	۹/۸۴۴
۱۰	۳۰	۸۰۰	۲۰	۸	۳۰۰/۵	۱۵۵۶۷۰	۳۲۸	۱۴۸۳۲۰	۹/۱۵۱	۴/۷۲۲
۱۱	۳۰	۸۰۰	۲۰	۱۰	۳۸۳/۵	۹۸۱۵۰	۳۸۶	۱۰۰۱۹۰	۰/۶۲۵	۲/۰۷۸

نشان داده‌شده که نتایج و روابط تحلیلی از دقت مناسبی برخوردارند. روابط استخراج شده برای زوایای ددرایز مختلف،

با مقایسه نتایج تحلیلی با نتایج تجربی که بر روی مدل فریدزما در سرعت‌ها و زوایای ددرایز مختلف به دست آمد،

[12] Clement EP, Pope JD. Stepless and stepped planing hulls-graphs for performance prediction and design. *International Shipbuilding Progress*. 1961;8(84):344-60.

[13] Clement EP, Koelbel J, editors. Optimized designs for stepped planing monohulls and catamarans. HPMV-92, Intersociety High Performance Marine Vehicles Conference and Exhibit; 1992.

[14] Svahn D. Performance prediction of hulls with transverse steps. A Report of Masters Thesis, The Royal Institute of Technology, KTH, Centre for Naval Architecture. 2009.

[15] Makasyeyev MV. Numerical modeling of cavity flow on bottom of a stepped planing hull. 2009.

[16] Taunton D, Hudson D, Sheno R. Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls-part 1: performance in calm water. *International Journal of Small Craft Technology*. 2010;152:55-75.

[17] Taunton D, Hudson D, Sheno R. Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls-part II: performance in waves. *International Journal of Small Craft Technology*. 2011;153:B1-B22.

[18] Lee E, Pavkov M, McCue-Weil L. The systematic variation of step configuration and displacement for a double-step planing craft. *Journal of Ship Production and Design*. 2014;30(02):89-97.

[19] Timmins C. Yaw stability of a recreational stepped planing hull. *Transactions-The Society of Naval Architects and Marine Engineers*. 2014.

[20] Lotfi P, Ashrafizaadeh M, Esfahan RK. Numerical investigation of a stepped planing hull in calm water. *Ocean engineering*. 2015;94:103-10.

[21] Stansberg C, Contento G, Hong SW, Irani M, Ishida S, Mercier R, et al. The specialist committee on waves final report and recommendations to the 23rd ITTC. *Proceedings of the 23rd ITTC*. 2002;2:505-51.

[22] Najafi A, Nowruzi H, Ghassemi H. Performance prediction of hydrofoil-supported catamarans using experiment and ANNs. *Applied Ocean Research*. 2018;75:66-84.

[23] Najafi A, Nowruzi H, Hashemi SA. The effects of pre-swirl ducts on the propulsion performance of conventional ship: an experimental study. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2018;40(12):1-10.

[24] Nowruzi H, Najafi A. An experimental and CFD study on the effects of different pre-swirl ducts on propulsion performance of series 60 ship. *Ocean Engineering*. 2019;173:491-509.

[25] Procedures IR. Guidelines 7.5-01.01. 01, "Ship models. 2011.

مکان و ارتفاع پله مختلف و سرعت مختلف و پارامترهای هندسی بدنه شناور مساحت سطح خیس پشت پله را که معیاری از پایداری شناور و درگ آن است را با دقت مناسبی بدست آورده و دید مناسبی به طراح در راستای طراحی بدنه خواهد داد. این روابط باعث صرفه‌جویی مناسبی در زمان و هزینه طراحی خواهند شد.

۵- مراجع

[1] Doctors LJ. Hydrodynamics of high-speed small craft. 1985.

[2] Savitsky D, Morabito M. Surface wave contours associated with the forebody wake of stepped planing hulls. *Marine Technology and SNAME news*. 2010;47(01):1-16.

[3] Clement EP, Blount DL. Resistance tests of a systematic series of planing hull forms. *Trans sname*. 1963;71(3):491-579.

[4] Savitsky D. Hydrodynamic design of planing hulls. *Marine Technology and SNAME News*. 1964;1(04):71-95.

[5] Brizzolara S, Serra F, editors. Accuracy of CFD codes in the prediction of planing surfaces hydrodynamic characteristics. 2nd International Conference on Marine Research and Transportation; 2007.

[6] Shuford Jr CL. A theoretical and experimental study of planing surfaces including effects of cross section and plan form. 1958.

[7] Savitsky D, DeLorme MF, Datla R. Inclusion of whisker spray drag in performance prediction method for high-speed planing hulls. *Marine Technology and SNAME News*. 2007;44(01):35-56.

[8] Seo J, Choi H-K, Jeong U-C, Lee DK, Rhee SH, Jung C-M, et al. Model tests on resistance and seakeeping performance of wave-piercing high-speed vessel with spray rails. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2016;8(5):442-55.

[9] Jiang Y, Sun H, Zou J, Hu A, Yang J. Analysis of tunnel hydrodynamic characteristics for planing trimaran by model tests and numerical simulations. *Ocean Engineering*. 2016;113:101-10.

[10] De Marco A, Mancini S, Miranda S, Scognamiglio R, Vitiello L. Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planing hull. *Applied Ocean Research*. 2017;64:135-54.

[11] Cucinotta F, Guglielmino E, Sfravara F. An experimental comparison between different artificial air cavity designs for a planing hull. *Ocean Engineering*. 2017;140:233-43.



Experimental Investigation and Compilation of Analytical Relationships for the Calculation of Wet Surfaces in Stepped Planing Craft with Zero Step Angle

Mohammad Javad Ameri¹, Hossein Ahmadi-Danesh-Ashtiani^{2*}, Amin Najafi³, Hamid Kazemi³

¹ Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

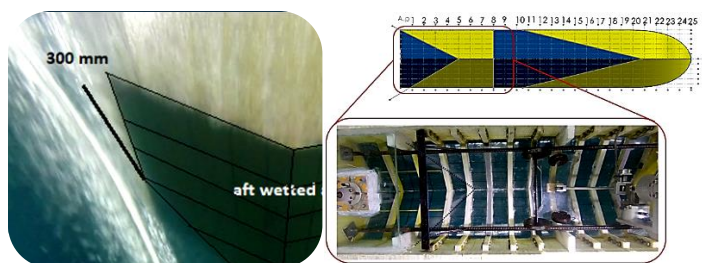
² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- The location and height of the step was determined in the design of high-speed Crafts at different speeds and body parameters.
- Analytical relationships were compiled based on the geometric parameters of the vessels body, steps and vessels speed.
- A new build method was introduced in the test model.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 13 August 2022

Received in revised form: 5 September 2022

Accepted: 24 September 2022

Available online: 18 October 2022

*Correspondence:

h_a_danesh@azad.ac.ir

How to cite this article:

M.J. Ameri, H. Ahmadi-Danesh-Ashtiani, A. Najafi, H. Kazemi. Experimental investigation and compilation of analytical relationships for the calculation of wet surfaces in stepped planing craft with zero step angle. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2022; 18(4):147-162.

Keywords:

Planing craft

Transverse step

Triangular surfaces

Analytical relationships

Model test

ABSTRACT

By investigation of the research conducted in the field of stepping planing Craft, almost no research has been done that studies the wet surfaces that are created by water jumping from the step and can have a direct impact on the design of the step. Calculating the area of these wetted Surfaces can help the designer in solving the dynamic longitudinal instability (porpoising), which is one of the most important issues in the design of stepped high-speed Crafts. In this regard, experimental tests have been carried out on the Fridesma model at three different elevation angles as well as at different speeds and geometrical parameters of the step (heights and different places of the step). The purpose of this research is to obtain an analytical and computational formula to calculate these wet surfaces based on the geometric parameters of the body, the geometric parameters of the step and other hydrodynamic parameters that are measured during the tests, including the wetted length of the keel and Chine, dynamic trim, is the amount of water jumping from the Steps. These relations can play a very important role in the design of step in stepped vessels.

