



مقاله پژوهشی

Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>



## بررسی اثر زاویه خیز کف متغیر، بر مولفه‌های هیدرودینامیکی شناور پروازی در آب آرام

علی اصغر مقدس آهنگری\*، سید مجتبی علوی جم

مرکز تحقیقات دریایی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

\* نویسنده مسؤل، پست الکترونیک: [moghadas14@gmail.com](mailto:moghadas14@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22113/JMST.2019.176525.2273

### چکیده

از اهداف مهم طراحی شناورهای تندرو، دستیابی به سرعت‌های بالاتر است که یکی از موانع این مهم مسئله ناپایداری طولی است. در این تحقیق روش جدیدی جهت رفع ناپایداری طولی شناور تندرو پله‌دار ارائه شده است. در این روش با استفاده از زاویه خیز کف بدنه، ناپایداری شناور رفع شده است. دو بدنه به نام‌های Nimala1 و Nimala2 در حوضچه کشش مورد بررسی قرار گرفتند. تفاوت اصلی این دو بدنه زاویه خیز کف آنها می‌باشد که Nimala1 دارای زاویه خیز کف ثابت و Nimala2 دارای زاویه خیز کف متغیر است. برای مشخص شدن تاثیر زاویه خیز کف بر ناپایداری طولی، هر کدام از مدل‌ها تا سرعتی که دچار ناپایداری طولی شوند؛ مورد تست مقاومت در حوضچه کشش آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس قرار گرفتند. با توجه به تجهیزات نصب شده در حین تست مدل در حوضچه کشش، امکان اندازه‌گیری حرکات وجود نداشت، به همین دلیل در کنار تست تجربی از تست عددی به عنوان مکمل استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که، تغییر زاویه خیز کف تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی ناپایداری طولی دارد. بطوری که جابجا کردن مرکز فشار به سمت پاشنه، موجب تاخیر در وقوع پورپویزینگ از عدد فرود حجمی ۸۹/۵ در بدنه با زاویه خیز کف ثابت، به عدد فرود حجمی ۳۴/۸ در بدنه با زاویه خیز کف متغیر گردیده است. همچنین مقاومت این بدنه در مقایسه با بدنه با زاویه خیز کف ثابت به خصوص در سرعت‌های بالا تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند.

**واژگان کلیدی:** ناپایداری طولی، زاویه خیز کف متغیر، شناور پروازی، حوضچه کشش، تست مدل

## ۱. مقدمه

به دلیل استفاده روزافزون از شناورهای تندرو در کاربردهای مختلف اعم از نظامی و غیرنظامی، روز به روز بر اهمیت آن‌ها افزوده شده و تقاضا برای استفاده از این شناورها در حال افزایش است. به همین علت تعداد این دست شناورها به میزان قابل چشمگیری افزایش یافته است. برای این شناورها طراحی مناسب فرم بدنه به دلیل تأثیرگذاری آن روی وزن شناور و همچنین بارهای وارده بر آن و به دنبال آن هزینه‌های ناشی از آن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. به همین دلیل طراحی بهینه بدنه و ارائه مفاهیم و ایده‌های نو در بهینه‌سازی آن ضروری به نظر می‌رسد. نیروی لیفت هیدرودینامیکی تولیدشده توسط سطوح پلنینگ یکی از دلایل مهم افزایش سرعت شناوری است (Doctors, 1985).

افزایش سرعت شناور سبب تغییر زاویه‌تیریم دینامیکی و کاهش مقاومت هیدرودینامیکی شناور می‌شود. در چند سال اخیر، روش دینامیک سیالات محاسباتی به دلیل قدرت غیرقابل چشم پوشیش در تحلیل و تجزیه جریان اطراف یک شناور و پیش‌بینی نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر آن جایگاه ویژه‌ای در این زمینه پیدا کرده است. یکی از نخستین مطالعات در مورد شبیه‌سازی عددی شناورهای تندرو مربوط به کاپوننتو (Caponnetto) است که از حل گر رنس (Reynolds-averaged Navier-Stokes: RANS) equations) برای تحلیل هیدرودینامیکی یک شناور تندرو استفاده کرد. به‌کارگیری دینامیک سیالات محاسباتی در کنار تست مدل‌های آزمایشگاهی می‌تواند تعداد مدل‌های ساخته شده برای تست تجربی را به مقدار زیادی کاهش دهد و این به معنای صرفه‌جویی در هزینه و زمان است (Caponnetto, 2001).

Perring و Glauert (1943) گزارشی را مبنی بر پایداری شناورهای پروازی در صفحه قائم و احتمال وقوع پدیده پروپوزیونگ منتشر کردند. چند سال بعد

Benson (1942) با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی، شناورهای پروازی هاردچاین را باهدف بررسی پدیده ناپایداری پروپوزیونگ مورد بررسی قرارداد. مشاهدات وی نشان داد که عواملی همچون وزن شناور و نقطه کشش شناور (معادل مرکز ثقل) بر پدیده پروپوزیونگ تأثیرگذار هستند. وی در همه نتایج خود مشاهده کرد که در هر سرعت و وزن خاص، یک محدوده مشخص برای زاویه‌تیریم وجود دارد. در صورتی که زاویه تیریم از این زاویه کمتر باشد، پدیده پروپوزیونگ رخ داده و اگر از این زاویه بیشتر باشد، پدیده پروپوزیونگ رخ نخواهد داد.

Davidson و Locke در سال ۱۹۴۳ آزمایش‌های هدفمندی را به منظور مطالعه پدیده پروپوزیونگ و برطرف کردن آن در شناورهای پروازی انجام دادند. آزمایش‌های آن‌ها دستاوردهای مهمی هم از نظر کاربردی و هم از نظر مفهومی داشت (Davidson and Locke, 1943).

نقطه عطف تمامی مطالعات کلاسیک انجام‌شده توسط Day (1952) در مجموعه‌ای از آزمایش‌های منظم قابل بررسی است. این آزمایش‌ها برای سه مجموعه شناور پروازی با زاویه ددرایز ۱۰، ۲۰، و ۳۰ درجه انجام شد. وی در نتایج به‌دست‌آمده حد بالایی تیریم ناپایداری طولی را مورد توجه قرارداد و نمودارهایی را برای این زاویه تیریم رسم کرد و تیریم بالا را تیریم بحرانی نامید. گراف‌های رسم شده آن‌ها حاکی از این قضیه بود که زاویه‌تیریم بحرانی شدیداً به ضریب نیروی لیفت بستگی دارد.

Savitsky (1946) با ارائه یک روش خاص برای طراحی هیدرودینامیکی شناورهای پروازی پدیده پروپوزیونگ را نیز در بحث طراحی شناورها مورد بررسی قرارداد. وی با بیان آن‌که در بین داده‌های آزمایش شده آن سال‌ها، آزمایش‌های Day (1952) بیشترین کاربرد را در طراحی شناورهای پروازی دارد، رابطه‌ای تجربی را برای پیش‌بینی تیریم بحرانی شناورهای پروازی ارائه داد.

Blount و Clement (1963) آزمایش‌هایی را برای

اندازه‌گیری مشخصات هیدرودینامیکی شناورهای پروازی در آب آرام انجام دادند و نتیجه گرفتند که موقعیت طولی مرکز ثقل، اثر بسیار مهمی بر ناپایداری شناورهای پروازی دارد. محققین بسیاری نیز برای یافتن مکانیزم پورپویزینگ و پیش‌بینی آن تلاش کرده‌اند.

در قسمت پاشنه شناور  $\beta_2 = 0$  است. با افزایش زاویه خیز کف در قسمت جلوی شناور، نیروی لیفت کاهش و در نتیجه غرق شدگی پله افزایش و زاویه تریم کاهش یافته است. در مرحله دوم محاسبات،  $\beta_1 = 0$  و  $0 < \beta_2 < 15$  تغییر کرده است. در این حالت با افزایش زاویه خیز کف، تریم و غرق شدگی شناور بیشتر شده است.

Zeraatgar et al. (2017) به منظور بررسی اثر زاویه خیز کف بر مقاومت و رفتار هیدرودینامیکی شناور منشوری پروازی، مدل  $1/5$  متری بدنه فریدزما با زاویه خیز کف  $20^\circ$  و  $25^\circ$  درجه را با شرایط یکسان در آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس تست کرده‌اند. در این تحقیق مقاومت، تریم و بالآمدگی مرکز ثقل دو مدل با هم مقایسه شده است. این مقایسه نشان داد که با افزایش زاویه خیز کف در حالت پروازی، مقدار مقاومت افزایش، مقدار تریم کاهش و بالآمدگی مرکز ثقل شناور افزایش می‌یابد.

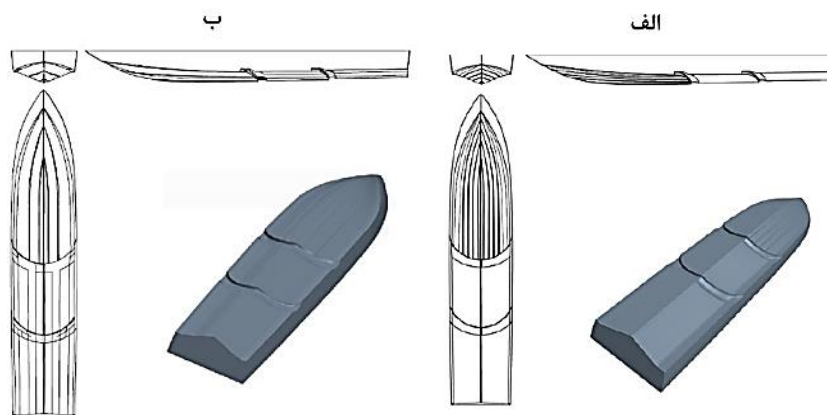
Ghadimi و Dashtimanesh (2017) به ارائه یک مدل ریاضی برای ارزیابی آثار زاویه خیز کف متغیر بر عملکرد شناورهای پروازی پرداختند.

Matveev et al. (2016) نیز مقاله‌ای را در تاثیر زاویه خیز کف بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور دارای پله ارائه دادند. آن‌ها مدل شناور پروازی دارای پله را در زاویه‌های ددرایز مختلف و در دو سرعت متفاوت راه، با مدل ریاضی بررسی و نتایج آن را ارائه کردند. پارامترهای هندسی مدل‌ها برابر و فقط در زاویه خیز کف بخش جلو و عقب شناور اختلاف است. در مرحله اول محاسبات، زاویه خیز کف در قسمت جلو شناور  $\beta_1$  بین صفر و  $15^\circ$  درجه تغییر کرده است و زاویه خیز کف

در این پژوهش با تهیه یک مدل ریاضی، زاویه تریم و مقاومت شناورهای پروازی با زاویه خیز کف متغیر محاسبه شده است. در این پژوهش به صورت تجربی و عددی به بررسی تاثیر زاویه خیز کف بر مولفه‌های هیدرودینامیکی از قبیل مقاومت، تریم دینامیکی، ناپایداری طولی و ... پرداخته می‌شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تاثیر زاویه خیز کف بر مولفه‌های مختلف هیدرودینامیکی از ترکیبی از روش‌های عددی و آزمایشگاهی استفاده می‌شود. ابتدا دو بدنه شناور پروازی مدرن به نام‌های Nimala1 و Nimala2 که هندسه‌های آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است؛ بررسی می‌شوند.



شکل ۱: نمای کلی بدنه الف- بدنه Nimala1 و ب- بدنه Nimala2

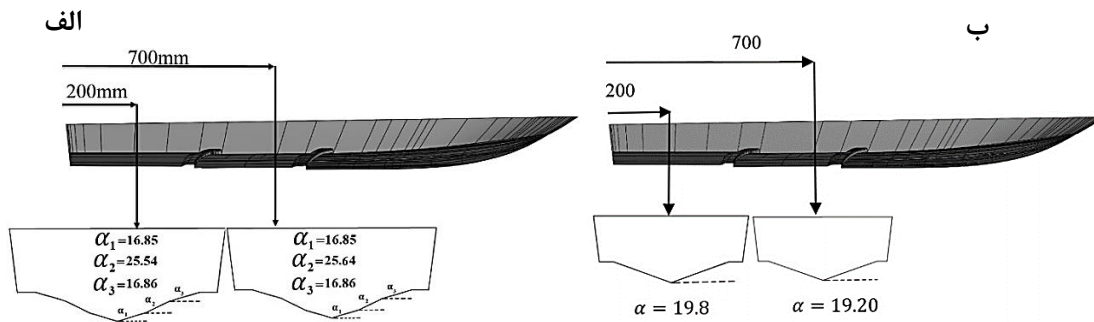
تست تجربی از روش عددی به عنوان مکمل کار استفاده می‌شود و مقادیری که در تست آزمایشگاهی ثبت نشد به کمک روش عددی ثبت می‌شوند. برای اعتبارسنجی روش عددی از نتایج تجربی مدل Nimala2 استفاده می‌شود. در انتها نیز به مقایسه نتایج دو مدل مذکور پرداخته می‌شود تا تاثیر زاویه خیز کف روی کارکرد هیدرودینامیکی شناور پله‌دار مشخص شود.

در مطالعه حاضر یک شناور تندرو تک بدنه دوپله مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۱ مشخصات کلی و شرایط انجام تست مدل با مقیاس ۹/۹۵ : ۱ گزارش شده است. نمای کلی از دو بدنه نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. که در این شکل‌ها می‌توان به وضوح تفاوت اصلی دو مدل را مشاهده نمود.

این دو مدل به جز در زاویه خیز کف پاشنه شناور و بین دو پله کاملاً مشابه هستند به طوریکه مدل Nimala1 دارای زاویه خیز کف ثابت و مدل Nimala2 دارای زاویه خیز کف متغیر می‌باشد. در تست‌های تجربی پارامترهایی چون مقاومت، تریم دینامیکی، بالامدگی مرکز ثقل و سرعت شروع ناپایداری طولی ثبت می‌شود. برای ثبت تریم دینامیکی و بالامدگی مرکز ثقل از دو پتاسیومتر که بوسیله تریم گایدهای نصب شده روی ابتدا و انتهای شناور قرار دارند اندازه‌گیری می‌شوند. به دلیل تاثیر تریم گایدها روی سرعت شروع ناپایداری طولی در سرعت‌های بالا که احتمال شروع ناپایداری طولی وجود دارد، تریم گاید حذف می‌شود. در این وضعیت امکان ثبت تریم دینامیکی و بالامدگی مرکز ثقل نیست؛ به همین دلیل در کنار

جدول ۱: ابعاد و شرایط تست بدنه Nimala

اندازه مدل	پارامتر (واحد)
۲/۰۰	طول (متر)
۰/۳۵۲	عرض (متر)
۶/۲	ارتفاع پله‌ها (متر)
۰/۴۴	موقعیت طولی پله اول از ترنزم (متر)
۰/۸۷	موقعیت طولی پله دوم از ترنزم (متر)
۰/۱۱۴۷	آبخور (متر)
۳۴	موقعیت طولی مرکز ثقل از ترنزم (%)
۳۶/۷۲	جرم (کیلوگرم)
۱۰۰۲	چگالی
۰/۰۴۳	ارتفاع محل خروج شافت از نوک ترانزوم (متر)
۵	زاویه شفت (درجه)
۰/۸۴۲	زاویه تریم استاتیکی Nimala1 (درجه)
۰/۷۲۴	زاویه تریم استاتیکی Nimala2 (درجه)



شکل ۲: مقاطع عرضی در فاصله ۲۰۰ و ۷۰۰ میلیمتری از پاشنه الف- بدنه Nimala1 و ب- بدنه Nimala2

این زاویه خیز کف از بین چندین مقطع مختلف بوسیله تست عددی و اترانتری انتخاب شده است.

آزمایشات آب آرام این مدل‌ها در حوضچه کشش آزمایشگاه دریایی شهدای خلیج فارس انجام شده است. این حوضچه کشش دارای طول ۴۰۰ متر، عرض ۶ متر و عمق ۴/۵ متر می‌باشد. ارا به این حوضچه از نوع سرنشین دار و با ماکزیمم سرعت ۱۸ متربرثانیه می‌باشد. تست مدل‌ها در آب آرام مطابق با توصیه‌های مطرح شده استاندارد انجام گرفته است (ITTC, 2011).

تست‌های مقاومت برای یک جابجایی ۳۶۰/۲۲ نیوتون انجام شده است. سرعت‌های تست مدل‌ها از مقدار ۱ متربرثانیه شروع شده و در هر مرحله افزایش می‌یابد و تا جایی ادامه پیدا می‌کند که بدنه دچار ناپایداری طولی شود. در جدول ۲ تست‌های انجام شده روی دو بدنه مورد نظر گزارش شده است.

مدل مهیا شده برای انجام آزمایشات تجربی در حوضچه کشش بوسیله نرم افزارهای طراحی ایجاد شده و با مواد کامپوزیتی ساخته شده است. مطابق بادرستورالعمل کنفرانس بین المللی حوضچه کشش (ITTC: International Towing Tank Conference) تفرانس ساخت مدل برای طول و عرض و آبخور mm  $\pm 0.5$  است. تفرانس ساخت مدل برای طول آن کمتر از  $\pm 0.5\%$  است (ITTC, 2002).

تنها تفاوت دو مدل، زاویه خیز کف مقاطع بین دوپله و پاشنه آن‌ها می‌باشد که مقطعی از پاشنه و بین دوپله از هر مدل در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۲ مشخص است، بدنه Nimala1 دارای زاویه خیز کف ثابت در پاشنه و بین دوپله می‌باشد. در مقابل بدنه Nimala2 دارای زاویه خیز کف متغیر می‌باشد. این زاویه خیز کف دارای سه شکستگی و به صورت ترکیبی از حالت‌های محدب و مقعر است.

جدول ۲: تست‌های انجام گرفته روی مدل‌ها

Nimala1		Nimala2	
V(m/s)	$F_{rV}$	V(m/s)	$F_{rV}$
1	0.56	1	0.56
2	1.11	2	1.11
3	1.67	3	1.67
4	2.22	4	2.22
5	2.78	5	2.78
6	3.34	6	3.34
7	3.89	7	3.89
8	4.45	8	4.45
8.3	4.61	9	5.00
9	5.00	10.59	5.89
10.59	5.89	11.41	6.34
porpoise	porpoise	12.22	6.79
porpoise	porpoise	13.04	7.25
porpoise	porpoise	15	8.34

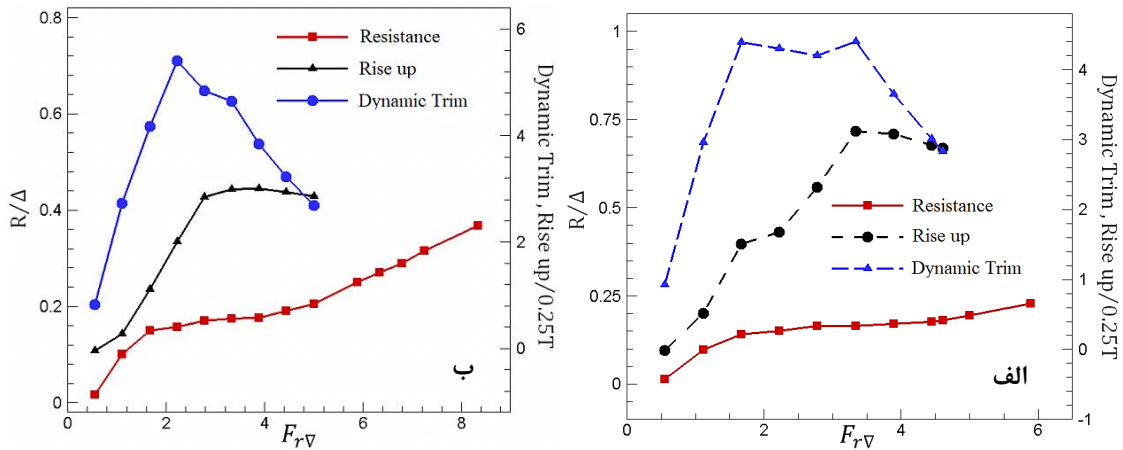
مقادیر اندازه گیری شده در این تست‌ها عبارتند از مقاومت، بالآمدگی مرکزثقل، زاویه تریم دینامیکی و سرعت شروع ناپایداری طولی.

مطابق جدول تست‌ها، مدل Nimala1 تا سرعت ۱۰/۵۹ و مدل Nimala2 تا سرعت ۱۵ متربرثانیه مورد تست قرار گرفته است. در سرعت‌های بالاتر این دو مدل دچار ناپایداری طولی شده‌اند.

### ۳. نتایج

مقدار بی بعد  $\frac{\text{Sinkage}}{0.25 \times T}$  بیان می‌شود که در این روابط  $R$  مقدار مقاومت،  $\Delta$  مقدار جابجایی و  $T$  مقدار آب‌خور شناور می‌باشد. در شکل ۳ نتایج مقاومت، تریم دینامیکی و بالآمدگی مرکز ثقل برای هر دو مدل به صورت مجزا نشان داده شده است.

در این پژوهش، سرعت بر مبنای عدد بی بعد فرود حجمی  $Fr_V = \frac{V}{\sqrt{g\Delta^{1/3}}}$  بیان می‌شود که در این فرمول  $V$  سرعت مدل شناور،  $g$  شتاب جاذبه و  $L$  طول شناور می‌باشد. همچنین مقدار نیروی مقاومت را بر حسب مقدار بی بعد  $\frac{R}{\Delta}$  و مقدار بالآمدگی مرکز ثقل را بر حسب



شکل ۳: نتایج تست تجربی مدل‌ها الف: نتایج تست تجربی مدل Nimala1 و ب: نتایج تست تجربی مدل Nimala2

آید. این امر برای شناور Nimala2 مشهودتر است. همچنین مشاهده می‌شود که تریم دینامیکی و بالآمدگی مرکز ثقل برای مدل Nimala1 تا عدد فرود حجمی  $4/6$  و برای مدل Nimala2 تا  $5$  ثابت شده است. علت این امر همانطور که در مقدمه نیز توضیح داده شد، جلوگیری از تاثیر تریم گایدها روی سرعت شروع ناپایداری طولی است. در شکل ۴ نمایی از تست مدل در حوضچه کشش دیده می‌شود.

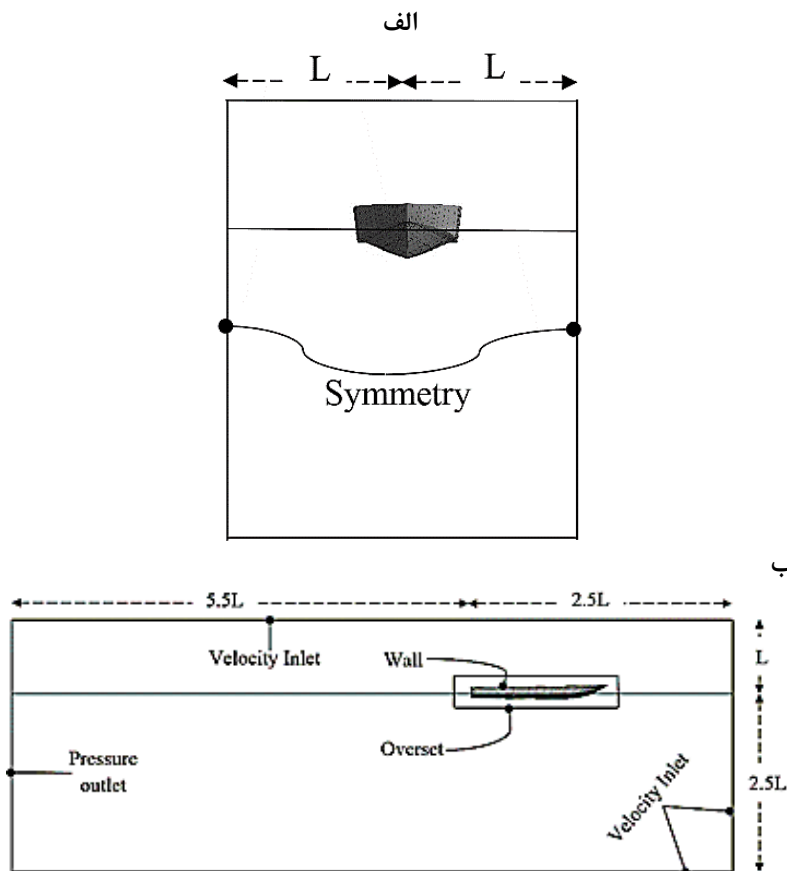
با دقت در شکل ۳ مشخص است که ابتدا زاویه تریم با افزایش سرعت افزایش می‌یابد و همین امر سبب می‌شود که سطحی که مقابل جریان آب قرار می‌گیرد به حالت عمودی نزدیکتر باشد و سبب افزایش مقاومت می‌شود. ولی بعد از عبور شناور از مود پلنینگ با افزایش سرعت زاویه تریم به تدریج کاهش می‌یابد و همچنین مقدار لیفت هیدرودینامیکی به بدنه بیشتر شده و مقدار بیشتری از بدنه از سطح آب بیرون می‌آید.



شکل ۴: نمایی از تست مدل در حوضچه

الف- برای مرزهای ورودی، بالا و پایین دامنه جریانی با یک سرعت ثابت و یکنواخت اعمال شده است.  
 ب- برای مرزهای راست و چپ شرط مرزی تقارن با شرایط فشار هیدرو استاتیکی در نظر گرفته شده است.  
 ج- بدنه شناور به صورت دیواره‌ای با شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است.  
 د- برای مرز خروجی-پایین دست جریان شرط فشار خروجی تعریف شده است.  
 چگالی مش روی سطح بدنه، تاثیر بسزایی روی دقت محاسبات دارد. به منظور اطمینان از اینکه الگوریتم عددی مستقل از اندازه مش است، یک آنالیز عدم حساسیت شبکه به اندازه مش روی یک سطح انجام گشته است. این تحلیل برای دو  $7+$ ،  $50$  و  $120$  و برای هر  $7+$ ، سه مش متفاوت در نظر گرفته شده است. همچنین تحلیل‌ها روی مدل دوم و عدد فرود  $1/67$  انجام شده است.

به منظور تکمیل نتایج تست دو شناور مذکور و بررسی پارامترهایی که آزمایشگاه قادر به ثبت آن‌ها نیست (همچون توزیع فشار)، در ادامه از روش شبیه‌سازی عددی کمک گرفته می‌شود. در این مطالعه میدان جریان اطراف شناور با استفاده از روش حجم محدود (Finite Volume Method) و به کمک نرم افزار تجاری استارسی‌سی‌ام پلاس (StarCCM+) حل می‌شود. برای ایجاد یک سیستم حل یکپارچه برای جریان ویسکوز و تراکم ناپذیر حول بدنه شناور، معادلات رنس و پیوستگی به همراه مدل SST برای آشفتگی جریان و روش حجم سیال (VOF) برای مدل‌سازی سطح آزاد جریان با هم حل می‌شوند.  
 در انتخاب دامنه محاسباتی همانطور که در شکل ۵ مشخص شده است به این نکته توجه شده که تأثیرات حل روی مرزها تا حد ممکن مینیمم شود.  
 مطابق شکل ۵ شرایط مرزی مطابق زیر است:

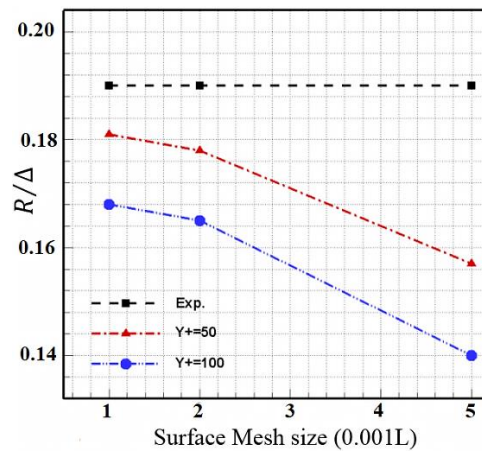


شکل ۵: دامنه محاسباتی و شرایط مرزی



نتیجه این تحلیل‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. در مقاومت تجربی هم به منظور بررسی دقت نتایج عددی نشان داده شده است. از شکل مشهود است که برای مش ریزتز (مقدار  $y+=50$  و کمتر و اندازه مش روی سطح کوچکتر) عموماً نتایج دقیق‌تری بدست می‌آید. همچنین برای  $y+=50$  زمانی که اندازه مش سطح از  $L$  به  $0.001L$  افزایش می‌یابد، دقت نتایج تغییر محسوسی نمی‌کند. بنابراین استقلال از مش مربوط به

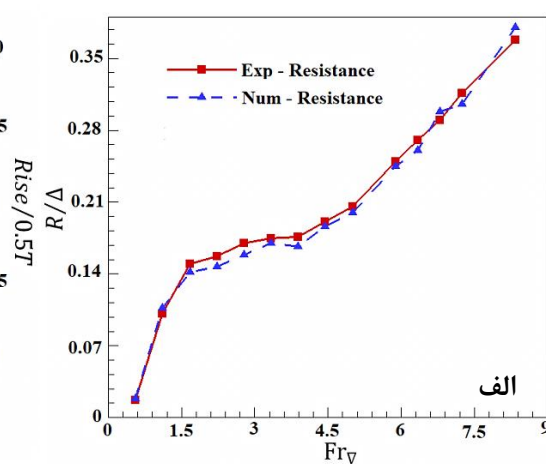
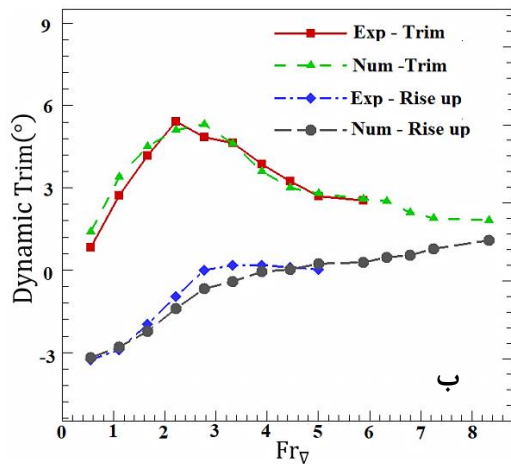
الگوریتم عددی ارضا شده و مشی با  $y+=50$  و اندازه مش روی سطح  $L$  به  $0.002L$  برای حل عددی انتخاب می‌شود. شبکه‌ای با این ویژگی دارای تعداد المان  $2/6$  میلیون تعداد سلول است. این شبیه‌سازی روی یک پردازنده اینتل هشت هسته‌ای با ماکزیمم فرکانس  $4$  گیگاهرتز با  $16$  گیگابایت رم انجام می‌گیرد.



شکل ۶: مطالعه استقلال از شبکه

برای اعتبارسنجی حل، از تست تجربی مدل Nimala2 و مقایسه نتایج تجربی آن با نتایج عددی استفاده می‌شود. همچنین چگونگی و شرایط انجام این تست

در بخش‌های قبل تشریح شد. برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، نتایج مقاومت، بالادمدگی مرکز ثقل و تریم دینامیکی در شکل ۷ با هم مقایسه شده‌اند. ...



شکل ۷: مقایسه نتایج الف-مقاومت عددی و تجربی مدل Nimala2 و ب- تریم دینامیکی و بالادمدگی مرکز ثقل عددی و تجربی مدل Nimala2



پایداری طولی دو بدنه مشابه به نام‌های Nimala1 و Nimala2 به صورت تجربی و عددی مورد شبیه‌سازی در آب آرام قرار گرفته‌اند. تفاوت این دو بدنه در زاویه خیز کف آن‌ها می‌باشد به طوری که بدنه Nimala1 دارای زاویه خیز کف ثابت و بدنه Nimala2 دارای زاویه خیز کف متغیر با سه شکستگی و به صورت ترکیبی از حالت محدب و مقعر است. شرایط انجام تست این دو شناور در جدول ۱ و سرعت‌هایی که دو بدنه مورد تست قرار گرفته‌اند نیز در جدول ۲ گزارش شده است.

از مهمترین پارامترهای در طراحی هر شناوری مقدار مقاومت می‌باشد. در این پژوهش نیز مقدار این پارامتر با استفاده از تست آب آرام در حوضچه کشش ثبت شده است. در شکل ۸ مقایسه بین نتایج تجربی مقاومت دو بدنه مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است؛ با تغییر زاویه خیز کف شناور تندرو مقدار مقاومت افزایش می‌یابد. اما با افزایش سرعت درصد افزایش مقاومت کاهش می‌یابد. بطوریکه در عدد فرود ۵/۸۹، مقاومت مدل Nimala2 ۴٪ بیشتر از مقاومت مدل Nimala1 می‌باشد. بطوریکه می‌توان ادعا کرد که اگر بدنه Nimala1 دچار ناپایداری طولی نمی‌شد مقدار مقاومت بدنه Nimala2 در سرعت‌های بالاتر به مقاومت بدنه Nimala1 بسیار نزدیک می‌شد.

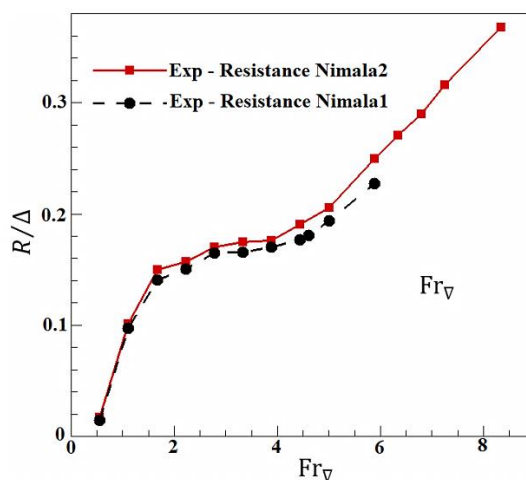
برای نمودار اعتبارسنجی مقاومت (شکل ۷- الف) مشخص است که در سرعت‌های پایین خطای روش عددی کمتر از ۷/۵٪ است ولی با افزایش سرعت، خطای روش عددی کاهش پیدا می‌کند تا اینکه از عدد فرود حجمی ۳/۸۹ به بعد، ماکزیمم مقدار خطا به ۴٪ می‌رسد که نشانگر مطابقت بسیار خوب نتایج عددی و تجربی برای مقاومت است.

برای مقادیر تریم دینامیکی (شکل ۷- ب) به جز سرعت‌های پایین (اعداد فرود ۰/۵۵ و ۱/۱ که میزان خطا به ترتیب برابر ۲۵٪ و ۱۵٪ است) برای بقیه موارد میزان خطا کمتر از ۱۰٪ است. بیشترین میزان خطای نتایج عددی مربوط به مقادیر بالآمدگی مرکز ثقل می‌باشد.

به طوری که در اعداد فرود کمتر از ۳/۸۹ میزان خطا بین ۱۵٪ تا ۲۸٪ می‌باشد. اما با افزایش سرعت و در اعداد فرود بالاتر از ۳/۸۹، میزان خطا به کمتر از ۱۰/۳٪ می‌رسد. همچنین روش عددی توانسته سرعتی که در آن ناپایداری طولی اتفاق می‌افتد را به درستی پیش‌بینی کند، که این امر بیانگر مطابقت خوبی بین روش تجربی و عددی است.

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

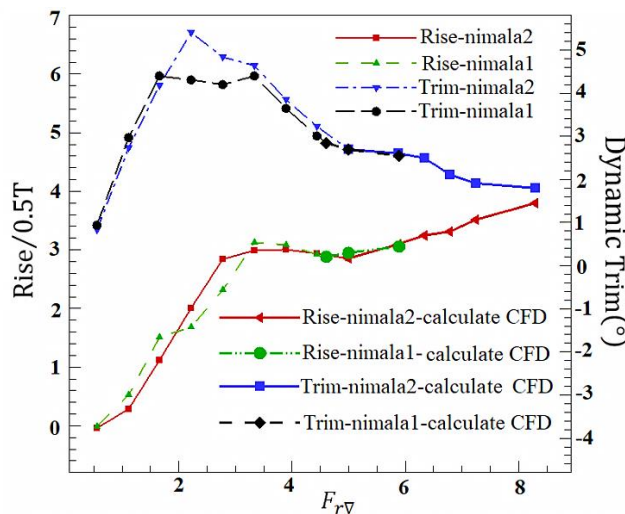
به منظور بررسی و تحلیل اثر زاویه خیز کف شناور تندرو پله دار روی مولفه‌های هیدرودینامیکی آن نظیر مقاومت، تریم دینامیکی، بالآمدگی مرکز ثقل و



شکل ۸: مقایسه مقدار مقاومت دو بدنه با یکدیگر

این سرعت‌ها برای ثبت مقادیر تریم دینامیکی و بالآمدگی مرکز ثقل از روش عددی استفاده می‌شود. به این ترتیب برای هر مدل از عدد فرود ۵ تا نقطه شروع ناپایداری طولی، مقادیر تریم دینامیکی و بالآمدگی مرکز ثقل به کمک روش عددی مشخص می‌شود. نتایج تریم دینامیکی و بالآمدگی مرکز ثقل در شکل ۹ گزارش شده‌اند.

از پارامترهای دیگری که در تست تجربی در حوضچه کشتی ثبت می‌شود تریم دینامیکی و بالآمدگی مرکز ثقل می‌باشد. برای ثبت این دو پارامتر در حوضچه از دو پتاسیومتر که بوسیله دو تریم گاید در جلو و عقب شناور نصب شده‌اند استفاده می‌شود. به علت تاثیر این تریم گایدها روی شروع ناپایداری طولی، در سرعت‌های بالا این تریم گایدها حذف می‌شوند. به همین دلیل در



شکل ۹: مقایسه نتایج تریم دینامیکی و بالآمدگی مرکز ثقل دو بدنه با یکدیگر

در مورد بالآمدگی مرکز ثقل نیز با دقت در شکل ۹ مشخص می‌شود که با افزایش سرعت مقدار بالآمدگی مرکز ثقل برای هر دو مدل افزایش می‌یابد. اما نکته قابل توجه این که مقدار این پارامتر در اکثر سرعت‌ها و به خصوص در سرعت‌های بالاتر برای مدل Nimala2 بیشتر از مدل Nimala1 می‌باشد.

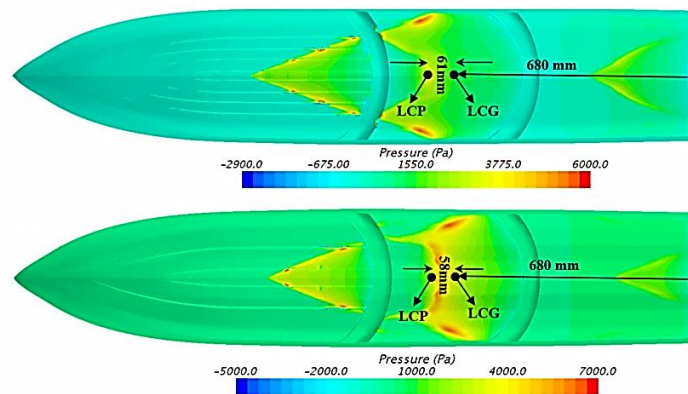
هدف اصلی از تغییر زاویه خیز کف شناور تندر و حذف و یا به تعویق انداختن ناپایداری طولی (پورپویزینگ) بدون اضافه کردن ملحقات اضافی مانند اینترسپتور، تریم تب و ... می‌باشد.

در این پژوهش زاویه خیز کف ثابت بدنه شناور دوپله Nimala1 به زاویه خیز کف متغیر با سه شکستگی به صورت محدب و مقعر تبدیل شده و بدنه به نام Nimala2 ایجاد شده است. بدنه Nimala1 از عدد فرود ۵/۸۹ به بعد دچار ناپایداری طولی شده است. در حالی

در شکل ۹، مقادیر محاسبه شده به روش عددی نیز گنجانده شده است تا نموداری جامع از تریم دینامیکی و بالآمدگی مرکز ثقل دو بدنه فراهم آید. مطابق این شکل، برای هر دو مدل با افزایش سرعت مقدار تریم دینامیکی ابتدا افزایش می‌یابد ولی بعد از عبور شناور از نقطه هامپ و رسیدن شناور به حالت اسکی با افزایش سرعت مقدار زاویه تریم دینامیکی برای هر دو مدل کاهش می‌یابد، ولی مقدار کاهش این زاویه برای مدل Nimala2 به خصوص در سرعت‌های بالاتر قابل ملاحظه‌تر است به طوری که در دو عدد فرود ۵ و ۵/۸۹ مقدار کاهش این زاویه برای مدل Nimala2 نسبت به مدل Nimala1 به ترتیب ۰/۴ و ۱/۸۹٪ می‌باشد. همچنین با افزایش بیشتر سرعت شناور Nimala2 (به دلیل عدم پورپویز)، این مدل شناور به زوایای تریم بسیار پایینتری نسبت به مدل Nimala1 می‌رسد.

۳۰ میلیمتر کمتر از بدنه Nimala1 می‌باشد. به عبارتی دیگر تغییر زاویه خیز کف از ثابت به متغیر منجر به جابجایی مرکز فشار به سمت پاشنه شناور شده است، در نتیجه گشتاوری که منجر به افزایش زاویه تریم دینامیکی شده کمتر می‌شود و همین امر باعث می‌شود که شناور بتواند سرعت‌های بالاتری را بدون ناپایداری طولی طی کند.

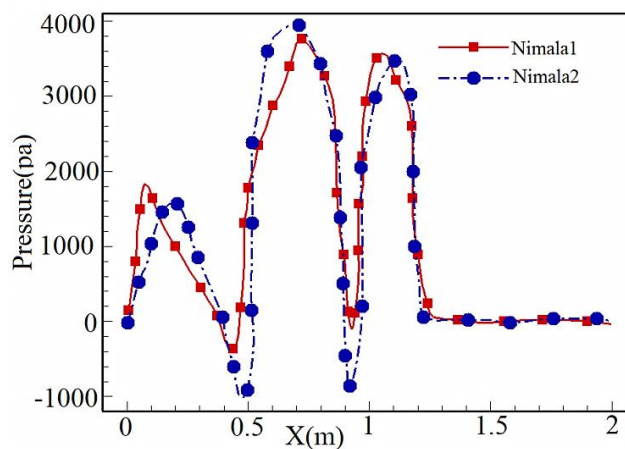
که بدنه Nimala2 عدد فرود ۸/۳۴ را نیز بدون ناپایداری طولی طی کرده است. برای توضیح علت این امر به مقایسه توزیع فشار در کف هر دو شناور در یک سرعت برابر پرداخته می‌شود. این مقایسه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با دقت در شکل ۱۰ می‌توان مشاهده کرد که در بدنه Nimala2 که دارای انحنا متغیر است فاصله بین مرکز ثقل و مرکز فشار حدود



شکل ۱۰: موقعیت مرکز فشار نسبت به مرکز ثقل برای هر دو مدل در عدد فرود حجمی ۳/۸۹

حتی در سرعت‌هایی بالاتر نیز دچار این ناپایداری نشده است. همچنین در شکل ۱۱ نمودار توزیع فشار دو بدنه در عدد فرود ۳/۸۹ گزارش شده است. مطابق این نمودار در ناحیه پشت پله اول مقدار متوسط فشار برای بدنه با زاویه خیز کف متغیر مقدار بزرگتری می‌باشد.

همچنین باید در نظر داشت که با افزایش سرعت اختلاف فاصله بین مرکز فشار و مرکز ثقل برای مدل Nimala1 نسبت به مدل Nimala2 به مراتب بیشتر و بیشتر می‌شود. به همین دلیل در عدد فرود ۵/۸۹ مدل Nimala1 به دلیل افزایش زیاد این فاصله دچار ناپایداری طولی می‌شود در حالی که مدل Nimala2



شکل ۱۱: توزیع فشار در امتداد خط کیل برای دو شناور در عدد فرود ۳/۸۹

نیروی لیفت بیشتری از پاشنه به شناور می‌باشد که

بزرگتر بودن مقدار فشار در این ناحیه به معنای اعمال

شدن مرکز ثقل و شناور و برقراری تعادل طولی، احتمال وقوع پدیده پورپویزینگ به شدت کاهش می‌یابد و شناور می‌تواند به سرعت‌های بالاتری دست یابد. این در حالی است که افزایش سطح خیس ناشی از کاهش تریم دینامیکی، با کاهش سطح خیس ناشی از افزایش بالا آمدگی، جبران شده و با ثابت ماندن سطح خیس، نیروی مقاومت افزایش جدی نمی‌یابد.

می‌تواند مانع از رسیدن تریم دینامیکی شناور به تریم بحرانی شود و در نتیجه مشابه عملکرد ملحقاتی چون اینترسپتور، تریم تب و... باعث حذف و یا به تاخیر انداختن ناپایداری طولی شود.

لذا می‌توان گفت تغییر زاویه خیز کف شناور از ثابت به متغیر با الگوی مناسب، می‌تواند موجب کاهش تریم دینامیکی در سرعت‌های بالا شده که بدلیل نزدیک

## References:

- Benson, J. M. 1942. The Porpoising Characteristics of a Planing Surface Representing the Forebody of a Flying-Boat Hull. National Aeronautics and Space Admin Langley Research Center Hampton Va.
- Caponnetto, M. 2001. Practical CFD simulations for planing hulls. Process of Second International EuroConference on High Performance Marine Vehicles, HIPER'01: 128-138.
- Clement, E. P. and Blount, D. L. 1963. Resistance tests of a systematic series of planing hull forms. Trans. Sname. 71(3): 491-579.
- Davidson, K.S. and Locke Jr, F. w. 1943. Some Systematic Model Experiments on the Porpoising Characteristics of Flying-Boat Hulls. Stevens Inst of Tech Hoboken NJ Experimental Towing Tank.
- Day J.P. 1952. Planing Boat Porpoising-A Study of the Critical Boundries for a Series of Prismatic Hulls. Thesis submitted to Webb Institute of Naval Architecture.
- Doctors, L. J. 1985. Hydrodynamics of high-speed small craft (No. 292).
- Ghadimi, P. and Dashtimanesh, A. 2017. Provide a mathematical model for evaluating the effects of a variable tip angle on the performance of planing hulls. Ph.D Thesis Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic).
- International Towing Tank Conference (ITTC). 2002. Recommended Procedures and Guidelines. 7.5-01-01-01.
- International Towing Tank Conference (ITTC). 2011. Recommended Procedures and Guidelines. 7.5-02-02-01.
- Matveev, K. I. and Bari, G. S. 2016. Effect of deadrise angles on hydrodynamic performance of a stepped hull. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. 230(4): 616-622.
- Perring, W. G. A. and Glauert, H. 1943. The stability on the water of a seaplane in planing condition. No. 1493. British ARC.
- Zeraatgar, H., Ghasemi, H., Moghadas Ahangari, A. A. and Hashemi, S. A. 2017. Investigating the effect of changing the angle of deadrise angle of planing prismatic hull on the resistance, trim and rise up through the model test and empirical formulas (regression).5th. National Conference on fast craft.



Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>

Original Article



## **The study of the effect of Variable Deadrise Angle on Hydrodynamic parameter of planning boat in calm water**

**Ali Asghar Moghaddas Ahangari\* , Seyed Mojtaba Alavijam**

National Iranian Marine Laboratory, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

\*Corresponding Author E-mail: [moghadas14@gmail.com](mailto:moghadas14@gmail.com)

**Received:** 17 March 2019

**Accepted:** 13 November 2019

DOI: 10.22113/JMST.2019.176525.2273

### **Abstract**

One of the important goals of designing of planing boats is to achieve higher speeds, one of the major obstacles to this issue is longitudinal instability.

In this research, a new method is proposed to solve the longitudinal instability of stepped planing boats. In this method, using the transverse curvature or variable deadrise angle of the body, the instability of boat has been corrected. Two bodies, called Nimala1 and Nimala2, were tested in National Iranian Marine Laboratory. The main difference between the two transverse curvature bodies is that Nimala1 has a constant deadrise angle and nimala2 has a variable deadrise angle in a section. To determine the effect of the variable deadrise angle on the longitudinal instability, each of the models has been tested up to longitudinal instability. Due to the equipment installed during the test of the model in the towing tank, it was not possible to measure the movement and therefore numerical analysis is used as a complement to the experimental test. The results show that the variation in cross-curvature has a significant effect on longitudinal instability. By shifting the center of pressure to Aft, the delay of the porpoising was changed from 5.89 volumetric  $F_n$  in the fixed deadrise angle model, to 8.34 volumetric  $F_n$  in Variable deadrise angle model. Also, the resistance of this body is not significantly different from that of a body with constant transverse curvature, especially at high speeds.

**Keywords:** Longitudinal Instability, Variable Deadrise Angle, Planing Craft, Towing Tank, Model Test.

**List of Table and Figures**

**Table 1:** Dimensions and test conditions of Nimala body

**Table 2:** Tests performed on models

**Figure 1:** view of body: A- Nimala1 body / B- Nimala2 body

**Figure 2:** Transverse sections at a distance of 200 and 700 mm from heel: A: Nimala1 body / B: Nimala2 body

**Figure 3:** Experimental test of models Results: A: Experimental test results of Nimala1 model / B: Experimental test results of Nimala2 model

**Figure 4:** View of the model test in the pond

**Figure 5:** Computational range and boundary conditions

**Figure 6:** Study of network independence

**Figure 7:** Comparison of the results of a) Numerical and experimental strength of Nimala2 model and B- Dynamic trimming and elevation of numerical and experimental center of gravity of Nimala2 model

**Figure 8:** Comparing the resistance values of two bodies with each other

**Figure 9:** Comparison of dynamic trim results and center of gravity rise of two bodies with each other

**Figure 10:** Position of the pressure center relative to the center of gravity for both models at a volume landing number of 3.89

**Figure 11:** Pressure distribution along the Kiel line for two vessels at landing number 3.89