

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1403.10.1.11.3

درصد همانندی: ۰٪

## بررسی آزمایشگاهی مدل بدنه یک هواپیمای دریایی در حالت پورپویزینگ

محمد نوروزیان<sup>۱\*</sup>، بهادر سرانجام<sup>۲</sup>

mnourozian@mut.ac.ir

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول، مجتمع هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

saranjam@mut.ac.ir

<sup>۲</sup> مجتمع هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

### چکیده

وجود نوسانات طولی در آزمایش‌های هیدرودینامیکی بعضی از مدل‌های هواپیمای آب‌نشین در حوضچه کشش، عاملی برای انجام این تحقیق شده است. در این تحقیق پورپویزینگ در مدل بدنه یک هواپیمای آب‌نشین به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. با توجه به مخاطرات بررسی پورپویزینگ، در ابتدا این اطمینان حاصل شده است که در مراحل مختلف بررسی، پدیده پورپویزینگ قابل مشاهده و تکرار باشد. در ادامه اثر تغییر پارامترهای کاربری شامل تغییر مکان مرکز جرم، افزایش سرعت در ناحیه پورپویزینگ، کاهش وزن و اعمال ممان طولی اولیه، همچنین وجود و عدم وجود اسکوپها و جابجایی اسکوپها در این موضوع بررسی شده است. کاهش وزن و کاهش مرکز جرم در کاربری وسیله معادل با خالی کردن بار یا مصرف سوخت می‌باشد. کلیه تست‌ها برای اطمینان از صحت نتایج با تکرار انجام شده است. تغییر در برخی از پارامترهای فوق نشان داده است که دامنه پایداری وسیله با افزایش سرعت شروع پورپویزینگ، می‌تواند بهبود یابد.

**واژه‌های کلیدی:** پورپویزینگ، پایداری هیدرودینامیکی، بدنه سرشی، حوضچه کشش

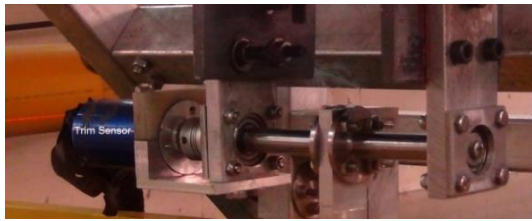
## ۱. مقدمه

از میان تست‌های هیدرودینامیک مدل هواپیمای آب‌نشین انجام شده در کانال تست کشش دانشگاه مالک اشتر، برخی از آن‌ها نوسانات منظم طولی داشتند. این نوسانات به صورت حرکات متناوب در تریم و جابجایی عمودی مرکز جرم خود را نشان داده و در سرعت‌های بعد از شروع مرحله سرش مشاهده شده است. این پدیده که به نام پورپوزینگ<sup>۱</sup> شناخته می‌شود، در قایق‌های تندرو، قایق‌های پرنده و هواپیماهای آب‌نشین که از زیر بدنه سرشی استفاده می‌کنند ممکن است دیده شود. پورپوزینگ ترکیبی از دو نوسان زاویه‌ای طولی و نوسان جابجایی عمودی است که نوسان عمودی با تغییر متناوب آبخور و نوسان طولی با تغییر تریم خود را نشان می‌دهد. این دو حرکت دارای پیوند مشابه است ولی فاز آن‌ها در حالت کلی متفاوت می‌باشد. انرژی لازم برای انجام پورپوزینگ توسط نیروی افقی حاصل از پیش‌رانش وسیله تأمین می‌شود. لازم به ذکر است که برای ایجاد پورپوزینگ عامل ارتعاش‌کننده خارجی وجود ندارد و تعریف دیگری که برای این پدیده می‌توان داشت، جابجایی نوسانی خوداتکای وسیله در صفحه طولی و عمودی در هنگام حرکت در سرعت‌های سرش است [۱].

## ۲. مرور پیشینه

بررسی ناپایداری طولی یا پورپوزینگ در بدنه‌های سرشی<sup>۲</sup> در تحقیقات مختلفی دنبال شده است. تورنهل [۲] (۲۰۰۰) در بررسی آزمایشگاهی خود بر روی بدنه یک قایق سرشی مرز ناپایداری ناشی از پورپوزینگ را به دست آورده است و با کاهش میزان تریم طی افزایش سرعت نشان داده است مرز ناپایداری جابجا می‌شود. در تحقیق کاتایاما [۳] (۲۰۰۴) چند مورد از ناپایداری‌های شناورهای سرشی معرفی و مکانیزم ایجاد آن نیز تشریح شده و اثر استفاده از یک فویل تی (T) شکل که در کیل بدنه نصب شده، بر پورپوزینگ بررسی شده است. تانیگوچی و کاتایاما [۴] (۲۰۱۰) مدل دو بدنه قایق سرشی را بررسی کرده و مرز پورپوزینگ را برای آن‌ها تعیین نموده‌اند. پس از آن تأثیر موتور خارجی<sup>۳</sup> و شرایط نصب

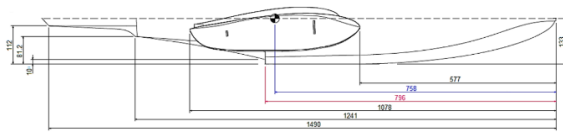
موتور را بر پورپوزینگ نشان داده‌اند. در ادامه ضمن تعمیم نتایج به شناور اصلی، روشی برای کاهش میزان پورپوزینگ در نمونه اصلی را ارائه نموده‌اند. ساجدی و قدیمی (۲۰۱۹) [۵] در بررسی یک شناور تک بدنه تندرو نشان داده‌اند که پورپوزینگ این بدنه را با گوه‌ای کردن پاشنه شناور می‌توان برطرف نمود. زو و همکارانش (۲۰۱۹) [۶] در بررسی آزمایشگاهی و عددی یک شناور تندرو تک بدنه دو استپ نشان داده‌اند که استفاده از فلپ پاشنه می‌تواند پورپوزینگ را در سرعت‌های بالای حرکت به تعویق بیندازد. کیم و همکاران (۲۰۲۰) [۷] بر روی بدنه‌های موج شکاف<sup>۴</sup> تأثیر ملحقات بدنه مانند چاین، تریم تب و پاشنه هرمی<sup>۵</sup> را در آب آرام و در آب موج بر پورپوزینگ بررسی نموده‌اند. ساجدی و قدیمی (۲۰۲۰) [۸] تأثیر محل قرارگیری استپ در یک شناور پرسرعت تک بدنه‌ای را بر رفتار هیدرودینامیکی و پورپوزینگ آن بررسی نموده‌اند. زو و همکارانش (۲۰۲۱) [۹] در بررسی آزمایشگاهی یک تریماران سرشی پرسرعت نشان داده‌اند که نصب فلپ در انتهای تونل و همچنین نصب فلپ در پاشنه می‌تواند در کنار افزایش نیروی مقاومت، سرعتی که در آن پورپوزینگ وجود دارد را به تعویق بیندازد. وانگ و همکارانش (۲۰۲۱) [۱۰] در بررسی آزمایشگاهی یک بدنه ۷ شکل سرشی، نشان داده‌اند استفاده از بدنه‌های کوچک‌تر جانی می‌تواند به کاهش یا رفع پورپوزینگ منجر شود. الیفراناندا و همکارانش (۲۰۲۲) [۱۱] اثر زاویه عرضی بدنه و مکان مرکز جرم را در پورپوزینگ پانتونهای<sup>۶</sup> یک هواپیمای دریایی به صورت عددی بررسی کرده‌اند. در تحقیق حاضر، بهبود پایداری هیدرودینامیکی در مدل یک هواپیمای آب‌نشین با بررسی مجموعه پارامترهای کاربری شامل کاهش ارتفاع مرکز جرم، افزایش سرعت در ناحیه پورپوزینگ، کاهش وزن و اعمال ممان طولی اولیه، همچنین وجود اسکوها و جابجایی اسکوها، به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. معیار بهبود عملکرد در این مورد، افزایش و بالاتر رفتن سرعتی است که در آن پورپوزینگ آغاز می‌شود. وجه تمایز این تحقیق با موارد مشابه در این حوزه، بررسی پورپوزینگ در هواپیماهای دریایی، حصول اطمینان از قابل مشاهده بودن و تکرارپذیری



شکل ۱. حس گر اندازه گیری زاویه تریم نصب شده روی محور اتصال مدل به پیلون



شکل ۲. حس گر اندازه گیری مقدار جابجایی عمودی مدل نصب شده روی پیلون



شکل ۳. نمای جانبی مدل هیدرودینامیکی همراه با اسکی در سری دوم تست های انجام شده

جدول ۱. مشخصات مدل جهت انجام تست های هیدرودینامیکی

مقدار	کمیت	
۱۴۹۰	طول کل مدل [mm]	۱
۶۹۴	طول بدنه عقب [mm]	۲
۴۴۵	طول هیدرودینامیکی بدنه عقب* [mm]	۳
۷۹۶	طول بدنه جلو [mm]	۴
۱۶/۸	حداکثر عرض بدنه در محل استپ [mm]	۵
۱۷	زاویه عرضی بدنه عقب در محل استپ [°]	۶
۱۷	زاویه عرضی بدنه جلو در محل استپ [°]	۷
۱۰	ارتفاع استپ [mm]	۸
۹	زاویه طولی بدنه عقب [°]	۹
۰	زاویه طولی بدنه جلو در محل استپ [°]	۱۰
۳۸	فاصله طولی مرکز جرم از استپ [mm]	۱۱
۳۷۹	ارتفاع مرکز جرم از خط کیل [mm]	۱۲
۵/۷	وزن مدل [kg]	۱۳

\* منظور از طول هیدرودینامیکی بدنه عقب، بخشی از بدنه عقب است که در هنگام قرارگیری مدل در آب در حالت تعادل هیدرواستاتیکی، در آب فرو می رود.

انجام تست ها در حالت پورپویزینگ در آزمایشگاه و بررسی پارامترهای کاربری به صورت اثر تجمیعی می باشد.

### ۳. موضوع تحقیق و مدل هندسی

هندسه مدل مورد بررسی، مدل بدنه هیدرودینامیکی یک هواپیمای دریایی است. دامنه سرعت مورد بررسی شامل ناحیه پیش از برخاست و سرش بر روی آب می باشد. در این مرحله از حرکت وسیله بر روی سطح آب، مقادیر مشخصات هیدرودینامیکی نسبت به مقادیر آیرودینامیکی غالب است و به همین دلیل بخش های آیرودینامیکی مانند بال و دم افقی و عمودی و کانوپی از مدل حذف گردیده و مدل مورد بررسی شامل بدنه اصلی و اسکیها می باشد. تصویر جانبی این مدل در شکل ۳ نشان داده شده و مشخصات کامل آن در جدول ۱ آورده شده است. برای انجام تست های هیدرودینامیکی بخش های بالای هندسه وسیله از قسمت خط چین حذف شده است.

تست های انجام شده در این تحقیق در حوضچه تست کشش دانشگاه مالک اشتر انجام شده است. این حوضچه با طول ۱۴۰ متر، عرض ۷ متر و عمق ۳ متر دارای ارابه کشش کابلی است که می تواند مدل را تا ۱۲ متر بر ثانیه روی آب حرکت دهد. در کلیه تست های انجام شده، مدل دارای سه درجه آزادی شامل جابجایی خطی در جهت طولی<sup>۷</sup>، جابجایی خطی عمودی<sup>۸</sup> و جابجایی زاویه ای حول محور عرضی مدل یا پیچش<sup>۹</sup> بوده است. در تست های انجام شده، نیروی درگ افقی با استفاده از مکانیزم ریل و واگن و با استفاده از یک لود سل ۲۰ کیلوگرمی اندازه گیری شده است. زاویه تریم مدل نیز با استفاده از یک زاویه سنج که در امتداد محور دوران مدل نصب شده اندازه گیری شده است. میزان جابجایی عمودی مرکز جرم نیز با استفاده از اندازه گیری زاویه دوران بازوی متصل به مرکز جرم مدل محاسبه و تعیین می شود. کلیه مقادیر در طول انجام تست با فرکانس بالای ۱۰۰ هرتز می تواند ثبت شود. در شکل های زیر این حس گر ها و نحوه اتصال مدل به پیلون نشان داده شده است. تست ها نشان دادند که در بخشی از بازه مورد بررسی، این بدنه وارد پورپویزینگ می شود.

است. مشاهدات نشان داده است که واژگونی و آسیب به مدل زمانی ممکن است ایجاد شود که طی نوسانات، بخش جلوی بدنه زیر سطح آب برود و حرکت روبه جلوی مدل باعث شود بخش عقب مدل از آب خارج شده و مدل برگردد؛ بنابراین در طول انجام تست، کل مدل و بخش جلوی بدنه از نظر احتمال رفتن به زیر آب و همچنین افزایش دامنه نوسانات حین پورپویزینگ به وسیله دوربین‌های نصب شده کنترل می‌شد و همچنین در دامنه سرعت‌هایی که در آنها احتمال بروز پورپویزینگ وجود داشته، گام افزایش سرعت کمتر از گام اصلی انتخاب شده تا احتمال بروز آسیب کاهش یابد و شدت نوسانات و مشاهده تغییر رفتار هیدرودینامیکی طی افزایش سرعت، بهتر صورت پذیرد. تمام این موارد بدین دلیل بود که بتوان رفتار وسیله را در سرعت‌های بالاتر از شروع پورپویزینگ مشاهده نمود.

در مرحله اول از تست‌ها اسکپها از مدل جدا شده و مدل بدون اسکپ بررسی شده است. در این سری از مجموعه تست‌ها، مدل از سرعت  $0.8 \text{ m/s}$  تا  $5 \text{ m/s}$  با گام  $0.4 \text{ m/s}$  بررسی شده است. به جز در سرعت  $5 \text{ m/s}$ ، به دلیل افزایش پورپویزینگ مدل و احتمال بروز آسیب، بر اساس استاندارد، تست‌ها با تکرار صورت گرفته‌اند. نتایج نشان داده که در این حالت پورپویزینگ از سرعت  $4 \text{ m/s}$  آغاز و شدت نوسانات نیز در این حالت کمتر از پورپویزینگ در سرعت  $5 \text{ m/s}$  است.

تست‌های انجام شده مدل با اسکپها نشان داد که در سرعت‌های بالاتر از  $4/4 \text{ m/s}$  حرکت مدل همراه با پورپویزینگ می‌شود. با توجه به نتایج تحقیق تانگوچی و کاتایاما (۲۰۱۰) [۴]، دامنه ناپایداری می‌تواند بخشی از کل دامنه حرکت را شامل شود؛ یعنی در پس از بروز ناپایداری، امکان دارد با افزایش سرعت ناپایداری در سرعت‌های بالاتر مرتفع شده و وسیله در ناحیه پایدار قرار گیرد؛ بنابراین لازم بود ارزیابی شود که ناپایداری مدل مقطعی است یا از یک سرعت به بعد وجود دارد که در سری دوم تست‌های انجام شده، این موضوع بررسی شده است. در شکل ۵ تصاویر مدل هیدرودینامیکی در سری تست‌های مرحله دوم (بدنه همراه با اسکپ) نشان داده شده است.

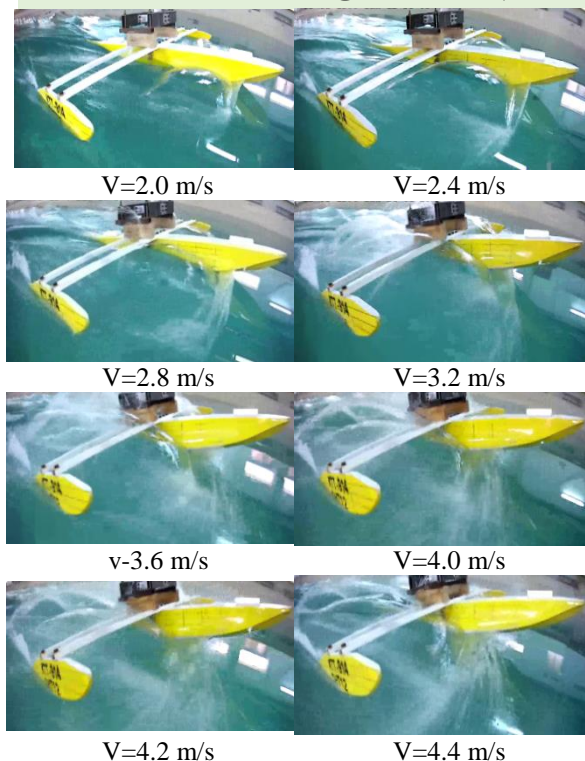
مشاهدات نشان داد که در سرعت  $4/2 \text{ m/s}$  نوسانات کوچکی وجود دارد که چندان قابل توجه نیست. این نوسانات در سرعت  $4/4 \text{ m/s}$  منظم و ملایم است ولی در  $4/8 \text{ m/s}$  از حالت ملایم خارج شده و همراه با ضربه زدن به ناحیه استپ گردیده است. فیلم‌ها نشان می‌دهد که در سرعت  $4/8 \text{ m/s}$ ، مدل در حین



شکل ۴. مدل هیدرودینامیکی، پیلون و مکانیزم اتصال به ارايه

لازم به ذکر است که تجهیزات و حس‌گرها به صورت دوره‌ای توسط شرکت‌های دارای صلاحیت کالیبراسیون، ارزیابی شده و گواهی‌نامه برای آنها صادر می‌شود.

#### ۴. انجام تست‌ها و نتایج



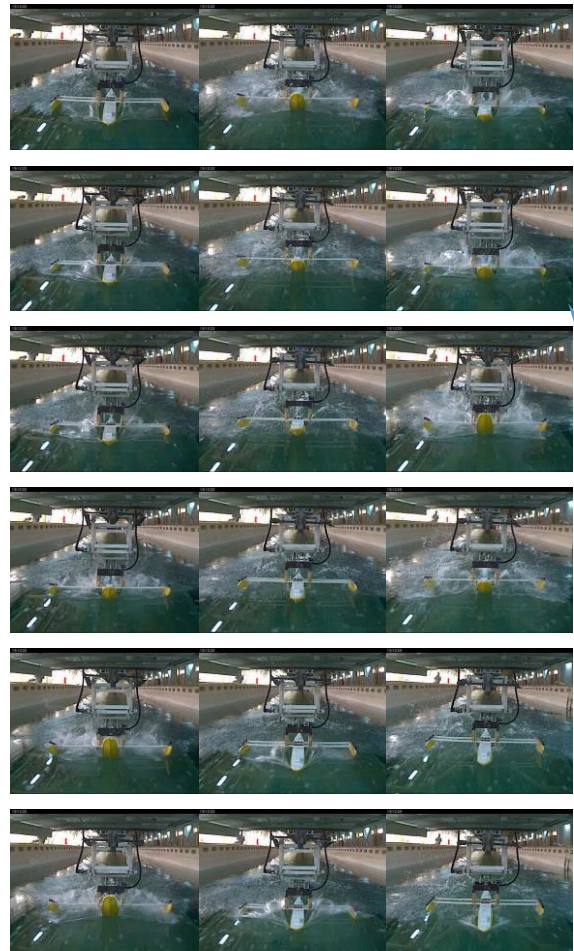
شکل ۵. تست مدل هیدرودینامیکی در سرعت‌های مختلف

بررسی مدل همراه با پورپویزینگ، تحقیق پرمخاطره‌ای است که هر زمان احتمال دارد به دلیل واژگونی مدل، حادثه ایجاد شود و تجهیزات و مدل تخریب شود. با وجود این، تجربه ارزشمند مشاهده وضعیت مدل حین پورپویزینگ، وضعیت آب‌خور بدنه جلو و عقب طی سیکل نوسانات و مشاهده تغییر رفتار وسیله با افزایش سرعت و تغییر شدت نوسانات حین پورپویزینگ، از جمله موارد قابل توجه در این تحقیق بوده

- سری اول: در این مرحله بدنه اصلی مدل بدون اسکیها به تنهایی با تنظیمات اولیه بررسی شده است تا مقادیر مشخصات هیدرودینامیکی تا مرحله شروع پورپویزینگ و بعد از آن به دست آید.
  - سری دوم: در این مرحله، اسکیها به مدل اضافه شده است تا تأثیر وجود اسکیها بر رفتار مدل حاصل شود. در این حالت مدل به شکل استاندارد طراحی خود در آمده است. پس از شروع پورپویزینگ نیز تا سرعت‌های بالاتر تا آنجا که امکان بررسی رفتار مدل وجود داشته، تست‌ها ادامه یافته است. نتایج این بخش مبنایی برای مقایسه نتایج مراحل بعد می‌باشد.
  - سری سوم: در این مرحله اسکیهای مدل ۳۰ mm نسبت به موقعیت نصب، به سمت عقب برده شده است تا با عقب بردن مرکز فشار هیدرودینامیکی، روند پایداری بررسی شود. تصاویر مدل حین نوسانات در این حالت نشان می‌دهد که تا نیمی از بدنه جلو در آب فرو می‌رود و قسمت جلوی بدنه جلو به درون آب وارد نمی‌شود؛ بنابراین احتمال واژگونی مدل حین تست پایین است.
  - سری چهارم: در این مرحله با توجه به افزایش دامنه پایداری در مرحله قبل، اسکیهای مدل ۶۰ mm دیگر نیز به سمت عقب برده شده است (در مجموع ۹۰ mm).
  - سری پنجم: در این مرحله ارتفاع مرکز جرم از ۳۷۹ mm به ۲۵۲ mm رسیده و به اندازه ۱۲۷ mm کاهش یافته است.
  - سری ششم: در این مرحله وزن مدل از ۵/۷ kg با ۲ kg کاهش به ۳/۷ kg رسیده است تا اثر سبک‌تر شدن وسیله بر روی پایداری بررسی شود.
  - سری هفتم: در این مرحله ۳۰۰ گرم از وزن مدل در سمت جلوی مرکز جرم قرار داده شده است که به منظور اعمال ممان در جهت کاهش زاویه تریم آن می‌باشد. بدین وسیله در این مرحله اثر وجود یک ممان اولیه بر روی مدل در جهت کاهش تریم، بررسی شده است.
- خلاصه موارد بررسی شده همراه با نتایج حاصل بر روی شرایط پورپویزینگ مدل مورد بررسی در جدول زیر ارائه شده است.

نوسان تریم و هیو، به سمت بالا پرتاب می‌شود ولی از آب خارج نمی‌شود. تست‌ها تا سرعت ۵/۲ m/s نیز انجام شده است که در این سرعت، وسیله حین نوسانات بر روی قسمت استپ و بدنه عقب (بخش استپ به سمت عقب) قرار می‌گیرد.

نوسان مدل در این حالت به گونه‌ای است که زمانی که بدنه به سمت بالا پرتاب می‌شود، در لحظاتی استپ کاملاً از آب خارج شده و تنها قسمت‌هایی از بدنه عقب با آب در تماس می‌ماند. همان‌طور که در شکل ۶ نیز دیده می‌شود، روند انجام افزایش دامنه نوسانات به صورتی است که بدنه جلوی شناور در قسمت سینه کاملاً در آب فرو می‌رود و در صورت ادامه افزایش سرعت به بیش از ۵/۲ m/s، احتمال زیادی برای مغروق شدن قسمت جلو و شکستن مدل و تخریب تجهیزات وجود دارد. این حالت زمانی به وجود می‌آید که به دلیل شدت نوسانات، بخش جلوی بدنه به زیر سطح آب برود.



شکل ۶. تریم فریم تست مدل با اسکی در سرعت ۵ m/s هنگام پورپویزینگ

انجام تست‌های هیدرودینامیک بر روی مدل در طی ۷ سری تست انجام گرفته است که شرح موارد انجام گرفته در هر سری به قرار زیر است:

جدول ۲. مشخصات مدل و نتیجه حاصل در مراحل مختلف بررسی

سری	۱	۲	۳	۴
موضوع بررسی	حذف اسکپها (بدنه تنها)	اثر افزایش سرعت	عقب بردن اسکپها	عقب بردن اسکپها
وزن مدل [kg]	۵/۶۸۸	۵/۶۸۸	۵/۶۸۸	۵/۶۸۸
طول مرکز جرم [mm]	۳۸	۳۸	۳۸	۳۸
ارتفاع مرکز جرم [mm]	۳۷۹	۳۷۹	۳۷۹	۳۷۹
مکان اسکپها	بدون اسکپ	مکان طراحی	عقب ۳۰ mm	عقب ۳۰ mm
دامنه سرعت [m/s]	۵/۰ - ۱/۶	۵/۱۵ - ۱/۶	۴/۸ - ۴/۰	۵/۵ - ۴/۰
نتیجه	شروع پورپویزینگ در سرعت ۴/۳ m/s	شروع پورپویزینگ در سرعت ۴/۴ m/s	شروع پورپویزینگ در سرعت ۴/۶ m/s	شروع پورپویزینگ در سرعت ۴/۷ m/s

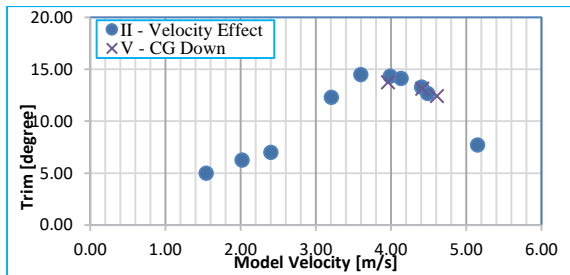
جدول ۲. مشخصات مدل و نتیجه حاصل در مراحل مختلف بررسی (ادامه)

سری	۵	۶	۷
موضوع بررسی	کاهش ارتفاع مرکز جرم	کاهش وزن	ممان اولیه کاهشده تریم
وزن مدل [kg]	۵/۶۸۸	۳/۶۸۸	۳/۶۸۸
طول مرکز جرم [mm]	۳۸	۳۸	۳۸
ارتفاع مرکز جرم [mm]	۲۵۲	۲۵۲	۲۵۲
مکان اسکپها	عقب ۳۰ mm	عقب ۳۰ mm	عقب ۳۰ mm
دامنه سرعت [m/s]	۵/۲ - ۴/۰	۵/۲ - ۴/۴	۵/۰ - ۴/۰
نتیجه	شروع پورپویزینگ در سرعت ۴/۷ m/s	شروع پورپویزینگ در سرعت ۴/۴ m/s	شروع پورپویزینگ در سرعت ۴/۳ m/s

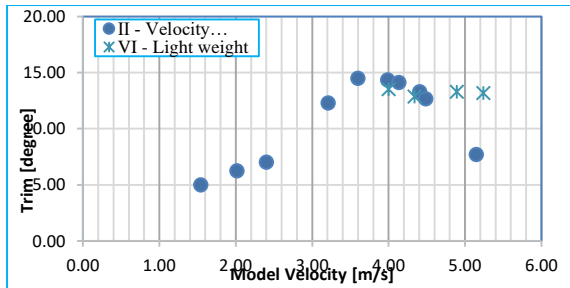
منحنی مقادیر تریم هیدرودینامیکی مدل تست به صورت نوسانی به دست می‌آید. با میانگین گرفتن از آن می‌توان مقادیر متوسط کمیت موردنظر را در حین نوسان محاسبه نمود. مقایسه بین میانگین نوسانات به دست آمده در حالت پورپویزینگ و قبل از آن نشان می‌دهد که در هنگام پورپویزینگ وقتی که نوسانات شدید باشد، یک تفاوت قابل توجه در روند تغییرات کمیت مشاهده می‌شود. این موضوع در منحنی تغییرات تریم با سرعت در شکل ۷ مشاهده می‌شود. داده‌های تریم به دست آمده برای سری اول تست‌ها

نتایج به دست آمده در ردیف آخر جدول، سرعت شروع پورپویزینگ در هر مرحله از بررسی‌ها را نشان می‌دهد. نتایج نشان داده است که در این مدل هندسی بیشترین جابجایی مرز شروع پورپویزینگ در سری چهارم حاصل شده است که مربوط به جابجایی اسکپهاست.

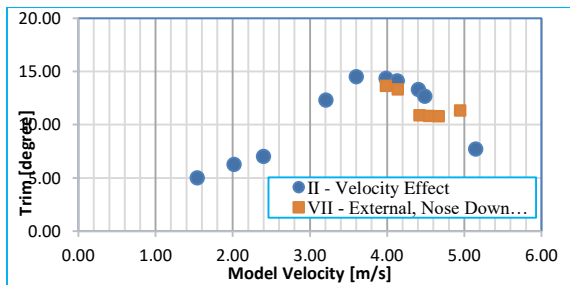
در شکل‌های ۷ تا ۱۱ تغییرات زاویه تریم دینامیکی در هر مرحله از بررسی‌ها نسبت به سری تست دوم مقایسه شده است. سرعت‌هایی که در آن مدل دارای پورپویزینگ است،



شکل ۹. تغییرات تریم نسبت به سرعت، قبل و بعد از پورپوزینگ برای سری دوم و پنجم بررسی‌ها

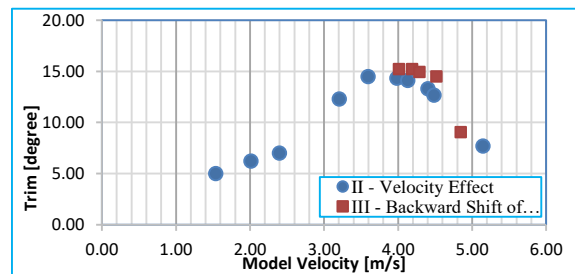


شکل ۱۰. تغییرات تریم نسبت به سرعت، قبل و بعد از پورپوزینگ برای سری دوم و ششم بررسی‌ها

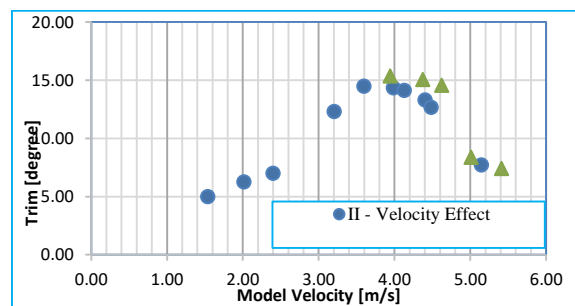


شکل ۱۱. تغییرات تریم نسبت به سرعت، قبل و بعد از پورپوزینگ برای سری دوم و هفتم بررسی‌ها

در دو مورد قبل از آخرین داده، هنگامی است که مدل دارای پورپوزینگ ملایمی بوده است. در این حالت داده‌های به دست آمده از میانگین تغییرات تریم، نسبت به سایر داده‌ها، تفاوت اندکی در روند تغییرات را نشان می‌دهد. داده آخر پورپوزینگ شدیدی دارد. در سری سوم تست‌ها نیز داده آخر مربوط به هنگامی است که حرکت مدل همراه با پورپوزینگ شدیدی بوده است. در این حالت میانگین تغییرات تریم در زمان وجود پورپوزینگ، نسبت به داده‌های تریم سرعت‌های پایین‌تر از آن که مدل تست دارای پورپوزینگ نبوده، یک تفاوت قابل توجه را نشان می‌دهد. این مطلب در شکل‌های دیگر نیز دیده می‌شود. این بدین معنی است که میانگین مقادیر مشخصات هیدرودینامیکی در هنگام پورپوزینگ می‌تواند همراه با یک جابجایی نسبت به مقادیر داده‌های نزدیک به آن، هنگامی که حرکت بدون پورپوزینگ است باشد.



شکل ۷. تغییرات تریم نسبت به سرعت، قبل و بعد از پورپوزینگ برای سری دوم و سوم بررسی‌ها



شکل ۸. تغییرات تریم نسبت به سرعت، قبل و بعد از پورپوزینگ برای سری دوم و چهارم بررسی‌ها

## ۵. جمع بندی

- امکان مشاهده و تکرار تست‌های هیدرودینامیکی مدل هواپیمای آب‌نشین همراه با پورپوزینگ، با انجام تمهیدات لازم امکان‌پذیر است.
- بدنه دارای پورپوزینگ، یک سرعت شروع ناپایداری دارد که تا قبل از آن حرکت وسیله بر روی آب فاقد نوسانات طولی است و با افزایش سرعت نسبت به آن، نوسانات شدیدتر می‌شود و در سرعت‌های بالا امکان واژگونی مدل نیز وجود دارد.
- در مدل مورد بررسی، بیشترین میزان تأثیر در تغییر سرعت شروع نوسانات مربوط به عقب بردن اسکینها نسبت به موقعیت اولیه نصب آن‌ها بوده است. این

- [4] Taniguchi T, Katayama T. Development of Porpoising Simulation Method for Real Scaled High Speed Planing Craft with Outboard Engine. In The 5th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics-APHydro 2010.
- [5] Mahdi Sajedi S, Ghadimi P, Sheikholeslami M, Ghassemi MA. Experimental and numerical analyses of wedge effects on the rooster tail and porpoising phenomenon of a high-speed planing craft in calm water. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2019 Jul;233(13):4637-52.
- [6] Zou J, Lu S, Jiang Y, Sun H, Li Z. Experimental and numerical research on the influence of stern flap mounting angle on double-stepped planing hull hydrodynamic performance. Journal of Marine Science and Engineering. 2019 Oct 1;7(10):346.
- [7] Kim S, Oshima N, Lee S, Lee G, Seo K. Hydrodynamic performance and appendage considerations of wave-piercing planing craft overlapping waves and porpoising. Journal of Fluid Science and Technology. 2020;15(2):JFST0013-.
- [8] Sajedi SM, Ghadimi P. Experimental and numerical investigation of stepped planing hulls in finding an optimized step location and analysis of its porpoising phenomenon. Mathematical Problems in Engineering. 2020;2020(1):3580491.
- [9] Zou J, Lu S, Sun H, Zan L, Cang J. Experimental study on motion behavior and longitudinal stability assessment of a trimaran planing hull model in calm water. Journal of Marine Science and Engineering. 2021 Feb 6;9(2):164.
- [10] Wang J, Zhuang J, Su Y, Bi X. Inhibition and hydrodynamic analysis of twin side-hulls on the porpoising instability of planing boats. Journal of Marine Science and Engineering. 2021 Jan 5;9(1):50.
- [11] Aliffrananda MH, Sulisetyono A, Hermawan YA, Zubaydi A. Numerical analysis of floatplane porpoising instability in calm water during takeoff. International Journal Technology. 2022 Jan 1;13(1):190-201.

### پی‌نوشت‌ها

1. Porpoising
2. Planing Hull
3. Outboard
4. Wave piercing
5. Wedge transom
6. Pontoon
7. Surge
8. Sinkage
9. Pitching

موضوع باعث شده است که سرعت شروع پورپوئینگ در سرعت بالاتری اتفاق بیفتد. به‌طور کلی، وجود یا نبودن اسکپها در روند پایداری تأثیر قابل توجهی داشته و موقعیت نصب آن‌ها بر روند پایداری تأثیرگذار است.

- در مدل مورد بررسی کاهش ارتفاع مرکز جرم و کاهش وزن هردو باعث کاهش سرعت شروع پورپوئینگ شده‌اند و اثر منفی بر پایداری شدن مدل داشته‌اند. این بدین معنی است که در شرایط واقعی با مصرف سوخت و یا خارج شدن بار وسیله که باعث کاهش وزن یا افزایش ارتفاع مرکز جرم آن می‌شود، ممکن است وسیله با ناپایداری روبرو شود.

- در این مدل، اعمال ممان طولی اولیه نتوانسته است منجر به پایدار شدن وسیله شود.

- وجود پورپوئینگ می‌تواند باعث ایجاد یک جابجایی در میانگین مقادیر مشخصات هیدرودینامیکی وسیله نسبت به هنگامی که پورپوئینگ وجود ندارد، شود.

- هر مدل هواپیمای آب‌نشین در مرحله قبل از برخاست و حرکت بر روی آب ممکن است با پدیده پورپوئینگ مواجه شود. بررسی این موضوع لازم است به‌عنوان یک گام در مسیر طراحی لحاظ شود.

### سپاسگزاری

این تحقیق مدیون همکاری و مساعدت ریاست محترم مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری هوادریا و تیم آزمایشگاه تست کشش کوثر است. از زحمات ایشان تشکر می‌شود.

### مراجع

- [1] Davidson KS, Locke FW. Some Systematic Model Experiments on the Porpoising Characteristics of Flying-Boat Hulls. National Advisory Committee for Aeronautics; 1943.
- [2] Thornhill E, Veitch B, Bose N. Dynamic instability of a high-speed planing boat model. Marine technology and SNAME news. 2000 Jul 1;37(03):146-52.
- [3] Katayama T. Mechanism of porpoising instabilities for high-speed planing craft. In ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium 2004 Sep 12 (pp. ISOPE-P). ISOPE.