

(مقاله پژوهشی)

**تست تجربی تاثیر هیدروفویل بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور**امین نجفی<sup>۱</sup>، علی احمدی<sup>۲</sup>، محمدجواد عامری<sup>۳</sup>

najafi.sharif@yahoo.com

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه امام حسین (ع)

۲- دانشجوی دکتری دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۳- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک-مرکز تحقیقات دریایی دانشگاه امام حسین (ع)

**چکیده**

افزایش روزافزون قیمت سوخت از یک سو و آلودگی محیط دریا از طرفی دیگر طراحان و مهندسان را به سمت طراحی و بهینه‌سازی بر پایه کاهش مصرف انرژی و کاهش اتلافات؛ هدایت نموده است، به نحوی که کاهش مصرف سوخت و به دنبال آن کاهش آلودگی محیط دریا از اولویتهای بسیار مهم در طراحی شناورهای جدید و بهینه‌سازی شناورهای موجود است. در چرخه بهینه‌سازی مصرف سوخت شناورهای دوبنده؛ یکی از بهترین راهبردها استفاده از هیدروفویل بین دوبنده می‌باشد. شناور هایسوکت از ترکیب حروف اول عبارت (Hydrofoil Supported Catamaran) گرفته شده است و بیانگر شناوری است که از ترکیب بدنه کاتاماران و هیدروفویل‌هایی که در بین دوبنده آن قرار می‌گیرند تشکیل شده است. این هیدروفویل‌ها در سرعت‌های بالا قسمتی از وزن شناور را تحمل کرده و باعث کاهش سطح خیس شناور می‌شوند. این المان با کاهش سطح خیس، درگ شناور و به طبع آن مصرف سوخت را کاهش می‌دهد. در این تحقیق تلاش شده است در گام اول شناور کاتامارانی که کاربری گسترده در صنایع حمل‌ونقل، پشتیبانی، خدماتی و نظامی دارد انتخاب شده و در ادامه با استفاده از هیدروفویل‌های مورد مطالعه، به بررسی تأثیر استفاده از هیدروفویل بر عملکرد هیدرودینامیکی و کاهش نیروی درگ یا افزایش سرعت شناور و کاهش مصرف سوخت شناور کاتاماران پرداخته شود.

واژگان کلیدی: شناور کاتاماران، هیدروفویل، درگ، مصرف سوخت، مقطع بهینه.

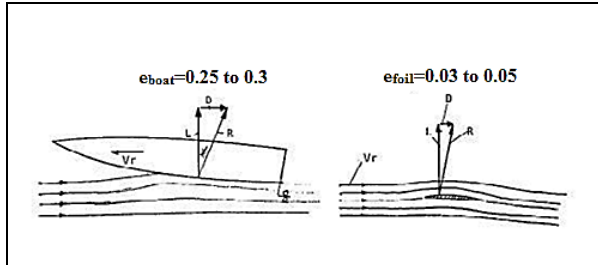
تاریخ دریافت مقاله : ۹۹/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۰/۰۲/۲۲

صص ۵۰-۶۰

## ۱ - مقدمه

اصطکاک کاهش می‌یابد و ثانیاً تولید نیروی برآ موردنیاز توسط یک هیدروفویل نسبت به یک بدنه پروازی با پسای کمتری همراه است.



شکل (۱) مقایسه یک بدنه پروازی و یک هیدروفویل از نظر راندمان تحمل بار [۱]

برای نشان دادن این مطلب یک هیدروفویل و یک تک بدنه در نظر گرفته شده است. برای مقایسه بازده تولید نیروی برآ بین این دو از نسبت نیروی پسا به برآ استفاده می‌کنیم.  $e = D/L$  که در آن:

$e$ : بازده حمل بار،  $D$ : نیروی پسا،  $L$ : نیروی برآ می‌باشد.  
با توجه به شکل (۱) و مقایسه بازده حمل بار، هیدروفویل به‌طور قابل توجهی مؤثرتر از تک بدنه برای حمل بار است؛ چراکه درازای تحمل وزن یکسان، پسای کمتری دارد. بنابراین استفاده از هیدروفویل در شناور کاتاماران با توجه به اینکه میزان لیفت به درگ این المان ناچیز است و همچنین اضافه کردن این المان باعث افزایش نیروی لیفت وارد بر شناور می‌شود، قابل توجه بوده و بنابراین می‌تواند در کاهش مصرف سوخت مؤثر باشد. اولین و ابتدایی‌ترین تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی استفاده از فویل در شناور کاتاماران توسط پروفیسور هوپ در سال ۱۹۸۰ میلادی با همکاری پروفیسور میگوته در دانشگاه استلنبوش انجام گرفت و در انجمن ثبت اختراعات آمریکا ثبت گردید. تحقیقات در این زمینه به‌صورت ناپیوسته و غیر مدون ادامه داشت. یکی از تحقیقات منسجم در این زمینه؛ پروژه انجام‌شده توسط پروفیسور هوپ [۱] و گانتز میگوته [۲] در سال ۱۹۹۷ در دانشگاه استلنبوش به‌عنوان پایان‌نامه انجام گرفت. در این تحقیق به‌صورت تجربی به بررسی تأثیر فویل‌ها و چیدمان آن‌ها بر روی دریامانی و مقاومت شناور کاتاماران پرداخته شد اما تحقیقات در همان مرحله آزمایشگاهی باقی ماند. نیکلاو کرنف و همکاران (۲۰۰۱) به بررسی تجربی

در چند دهه اخیر شناورهای تندرو اهمیت فوق‌العاده‌ای پیدا کرده‌اند. برای دستیابی به سرعت‌های بالاتر فرم بدنه‌های مختلفی پیشنهاد، طراحی و ساخته شده‌اند. یکی از متداول‌ترین آن‌ها کاتاماران می‌باشد. این نوع شناور با دوبدنه جدا از هم (هر یک از آن‌ها، نیم بدنه نامیده می‌شود) و عرشه‌ای که این دو را به هم متصل می‌کند شناخته می‌شود. در فعالیتهایی از قبیل جابجایی مسافر، گشت‌های شیلات، فعالیت‌های تحقیقاتی و تفریحی و غیره یکی از بهترین انتخاب‌ها کاتاماران‌ها هستند. در بخش نظامی همانند گشت‌های نظامی، استفاده از سلاح‌های سنگین مانند موشک‌ها و غیره، کاتاماران‌ها قابلیت‌های فراوانی جهت استفاده دارند. این شناورها دارای مساحت عرشه بزرگی بوده و پایداری عرضی مناسبی دارند و همچنین هنگام دریانوردی در امواج، حرکات ملایم‌تر و مناسب‌تری از خود بروز می‌دهند. شناورهای کاتاماران (دوبدنه) دارای پایداری عرضی فوق‌العاده خوب و توانایی حرکت در امواج بسیار مناسب هستند اما به نسبت شناور تک بدنه پروازی متناظر نیازمند توان رانش بالاتری می‌باشند. در نتیجه وجود یک سیستم رانش بزرگ به همراه مخزن ذخیره سوخت متناظر با آن از یک‌طرف قابلیت حمل بار را برای این شناورها محدود ساخته و از طرف دیگر مصرف سوخت شناور را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. در زمان کنونی که هزینه انرژی بسیار بالا می‌باشد وجود یک شناور که دارای توان رانش پایین و مصرف سوخت کم و درعین حال از شرایط خوب حرکت در امواج برخوردار باشد بسیار سودمند خواهد بود. در واقع نیاز به این هدف باعث پیدایش طرح شناور هایسوکت و شناور هیدروفیلی شد که شناورهایی با شرایط مطلوب از نظر هیدرودینامیکی و توان رانشی کمتر به نسبت شناورهای کاتاماران متناظر می‌باشند.

شناور هایسوکت یکی از انواع شناورهای ترکیبی است که با به‌کارگیری فویل در کاتاماران ابداع شده است، استفاده از فویل موجب افزایش بازده کلی شناور و بهبود در عملکرد آن می‌گردد. با استفاده از یک هیدروفویل در بین دوبدنه کاتاماران می‌توان مقاومت کل شناور را کاهش داد چراکه اولاً در سرعت‌های بالا بدنه از آب بیرون آمده و مقاومت

تأثیر فویل بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور کاتاماران در سه فاز جابجایی، نیمه جابجایی و پلنینگ پرداختند [۳]. با توجه به این موضوع، هدف اصلی در این تحقیق در ابتدا تعیین مناسب‌ترین مقطع هیدروفویل جهت کاهش هر چه بیشتر مصرف سوخت و همچنین پایداری شناور و در ادامه تعیین یک ترکیب مناسب از چیدمان فویل داخل بدنه کاتاماران است به طوری که هم‌زمان با کاهش مقاومت در تمامی سرعت‌ها پایداری عرضی و طول کافی در شناور ایجاد نماید. برای دستیابی به این هدف، ابتدا مدل یک شناور کاتاماران ساخته شد. در ادامه با بررسی تجربی و انجام تست مدل، با استفاده از هیدروفویل‌های مختلف، مقطع بهینه هیدروفویل جهت رسیدن به اهداف تعیین‌شده مشخص شده و سپس محل نصب هیدروفویل‌ها در طول بدنه شناور تعیین می‌شود. یانگ و همکاران (۲۰۰۲) به بررسی طراحی یک سیستم کنترل مقاوم برای کنترل حرکات شناور هایسوکت در امواج نامنظم پرداختند. در این تحقیق ورودی سیستم کنترل زاویه‌ی فویل بوده و هدف کنترل، حرکات طولی (هیو و پیچ) بوده است [۴]. رن و یانگ (۲۰۰۴) برای کنترل دینامیک و حرکات شناور هیدروفویل از سیستم کنترل فازی استفاده کردند. در این تحقیق به بررسی سیستم کنترل فازی و الزامات آن برای شناور پرداخته شده و انواع مدل سیستم کنترل فازی در کنترل حرکات شناور مورد بررسی قرار گرفته است [۵]. بونو و همکاران (۲۰۰۵) یک مدل خودرانش از یک شناور کاتاماران طراحی و پس از ساختن این مدل را در آب‌های آزاد تست کردند. یکی از اهداف این پروژه انجام تست دریامانی و الزامات آن در آب آزاد می‌باشد [۶]. هدف از تعبیه سیستم کنترل در این شناور علاوه بر کنترل حرکات شناور با استفاده از المان‌های کنترلی تعبیه شده، کنترل شناور به نحوی است که شناور به موانعی که در مسیرش قرار دارد برخورد نکند. سال ۲۰۰۶ سال پرکاری در زمینه بررسی کنترل شناور کاتاماران در امواج و آب آرام با استفاده از هیدروفویل بود. یکی از تحقیقات انجام گرفته در این سال توسط میلاندی انجام گرفت. سرجیو میلاندی به بررسی تجربی کنترل شناور کاتاماران در آب آرام با استفاده از فویل به‌عنوان المان کنترلی پرداخت. در این تحقیق

تست‌های تجربی انجام شده در حوضچه کشش انجام شد [۷]. فریرا و همکاران (۲۰۰۷) یک کار تجربی بسیار جامع بر روی سیستم کنترلی شناورهای سطحی و شناورهای زیرسطحی انجام داده‌اند [۸]. مدل شناور سطحی انتخاب شده در این تحقیق یک مدل شناور کاتاماران بوده که دارای طول ۴/۵ متر می‌باشد و همچنین خودرانش است. چگونگی انتخاب پروانه، موتور و جانمایی اجزای سیستم رانش در طول این مقاله بررسی شده است. یافتن یک سیستم کنترل مشترک برای هر دو مدل (مدل شناور کاتاماران و مدل شناور زیرسطحی) انتخاب شده هم به صورت تجربی و هم به صورت تحلیلی از اهداف این تحقیق بوده است. ژئو و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی تأثیر فویل و اینترسپتور بر حرکات شناور کاتاماران در آب آرام پرداختند. آن‌ها در ابتدا یک مدل دینامیکی از حرکات طولی شناور به دست آورده و سپس با در نظر گرفتن المان‌های کنترلی در این معادلات دینامیکی، معادلات مزبور را برای شناور با المان‌های مذکور توسعه دادند [۹]. در نهایت از یک سیستم کنترلی تناسبی چند متغیره برای کنترل حرکات شناور استفاده کردند. در این سیستم کنترل ورودی‌های سیستم زاویه‌ی حمله فویل و ارتفاع اینترسپتور بوده و خروجی‌های آن شتاب‌ها و حرکات عمودی می‌باشد. فویل استفاده شده در این تحقیق تی فویل می‌باشد. در سال ۲۰۱۶ وانگ و همکاران به کنترل حرکات طولی یک شناور سوات پرداختند، این محققان با استفاده از تئوری نواری حرکات طولی شناور را مدل‌سازی کرده و از کنترل مود لغزشی برای کنترل حرکات استفاده کردند. با بررسی تحقیقات انجام گرفته خلأ استفاده از نتایج تحقیق در صنعت و شناورهای ساخته شده مشاهده می‌شود [۱۰]. در این تحقیق سعی بر این است که نتایج استخراج شده از آزمایشگاه در نمونه واقعی پیاده‌سازی شده و نتایج استخراج گردد. هدف اصلی در این تحقیق تعیین مناسب‌ترین مقطع هیدروفویل جهت کاهش هر چه بیشتر مصرف سوخت و همچنین پایداری شناور در آزمایشگاه می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، ابتدا مدل یک شناور کاتاماران ساخته شد. در ادامه با بررسی تجربی و انجام تست مدل، با استفاده از هیدروفویل‌های مختلف، مقطع بهینه هیدروفویل

پس از ساخت، آماده‌سازی مدل شامل تنظیم مرکز ثقل، آبخور سینه و پاشنه انجام گرفته و مدل آماده انجام تست می‌گردد.



شکل (۲) مدل ساخته شده جهت انجام تست و مطالعات تجربی



شکل (۳) شناور کاتاماران مورد مطالعه

پس از ساخت مدل شناور می‌بایست به انتخاب و ساخت مقطع هیدروفویل پرداخت. که در بخش ۳ به فرآیند انتخاب و ساخت هیدروفویل پرداخته می‌شود.

### ۳- انتخاب نوع مقطع هیدروفویل

در این بخش ابتدا به بررسی فرآیند انتخاب مقطع هیدروفویل مناسب جهت رسیدن به هدف که همان کاهش مصرف سوخت و افزایش طول عمر مفید موتور شناور کاتاماران است، پرداخته می‌شود. پس از تعیین نوع مقطع، با استفاده از روند چرخه طراحی هیدروفویل برای شناورها، به طراحی فویل برای مدل شناور پرداخته و مشخصات هندسی فویل تعیین می‌گردد. برای انتخاب مقطع و نوع هیدروفویل مناسب جهت دستیابی به هدف، پارامترهای مؤثر جهت انتخاب مقطع تعیین گردید، این پارامترها عبارتند از:

➤ زاویه استال

جهت رسیدن به اهداف تعیین شده مشخص شده و محل نصب هیدروفویل‌ها در طول بدنه شناور تعیین می‌شود.

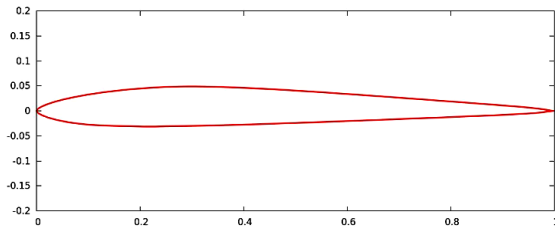
### ۲- ساخت مدل شناور کاتاماران

جهت بررسی تجربی تأثیر هیدروفویل بر عملکرد هیدروپینامیکی، عملکرد موتور و همچنین مدت زمان رسیدن به سرعت اسکی شناور کاتاماران، در ابتدا می‌بایست مدلی از شناور ساخته شود، شناور کاتاماران انتخابی در این تحقیق از نوع تندرو بوده و از کاربری زیادی در صنایع دریایی از جمله تفریحی، نظامی و خدماتی برخوردار است و بهینه‌سازی آن تأثیر گسترده‌ای برای ذینفعان شناور خواهد داشت. پس از تعیین نوع شناور کاتاماران، مدلی از شناور با مقیاس ۱ به ۴ ساخته می‌شود. ابعاد مدل و شناور در جدول ۱ آورده شده است.

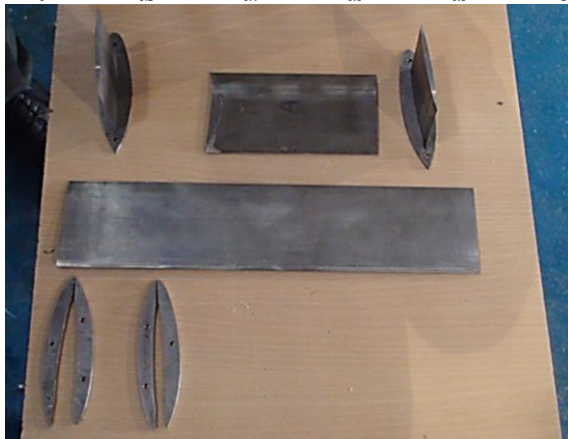
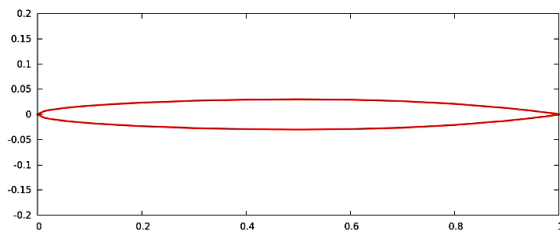
جدول (۱) مشخصات مدل و شناور کاتاماران

مشخصات شناور	
طول کلی	۱۲ متر
بیشترین عرض	۴/۴۳ متر
ارتفاع	۱/۲ متر
آبخور	۰/۶۸۴ متر
وزن	۷/۲ تن
حداکثر عرض تونل	۱/۶۳ متر
طول خط آب	۹/۶۲ متر
حداکثر سرعت	۴۵ گره دریایی
مشخصات مدل	
طول کلی	۳ متر
بیشترین عرض	۱/۱۰۷۵ متر
ارتفاع	۱/۲ متر
آبخور	۰/۱۷۱ متر
وزن	۱۱۲/۵ کیلوگرم
حداکثر عرض تونل	۰/۴۰۷۵ متر
طول خط آب	۲/۴۰۵ متر
حداکثر سرعت	۱۱/۲۹۵ متر بر ثانیه

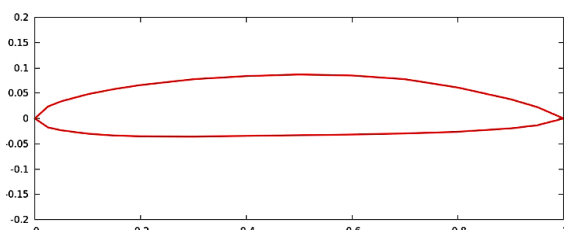
مدل ساخته شده شناور در شکل (۲) نشان داده شده است، لازم به ذکر است در ساخت مدل شناور تمام الزامات و دقت‌های استاندارد ITTC لحاظ شده است. و شکل (۳) تصویر شناور اصلی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل (۴) هیدروفویل‌های ساخته شده با مقطع EPPLER 874 برای مدل شناور



شکل (۵) هیدروفویل‌های ساخته شده با مقطع NACA 0016 برای مدل شناور



از آنجاکه هیدروفویل به صورت ثابت و با یک زاویه حمله اولیه بر روی شناور نصب می‌گردد، در انتخاب مقطع هیدروفویل‌ها می‌بایست به این نکته توجه کرد که زاویه حمله هیدروفویل با در نظر گرفتن زاویه حمله اولیه، حرکات و سرعت شناور نباید به زاویه استال یا واماندگی برسد زیرا در محدوده زاویه استال نیروی لیفت شناور کاهش می‌یابد. بنابراین در انتخاب هیدروفویل برای شناور می‌بایست از زاویه استال به قدر کافی فاصله گرفت.

➤ بیشترین نسبت لیفت به درگ

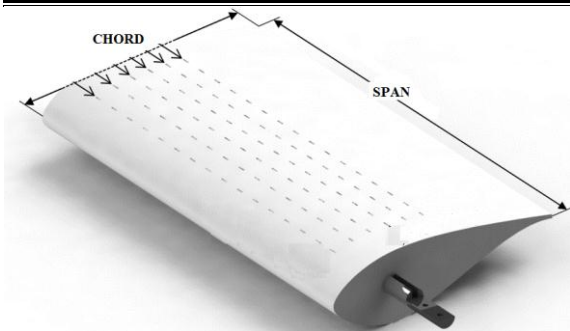
در طراحی فویل برای شناور از آنجاکه بر طبق نتایج تست‌های دریامانی شناور در سرعت طراحی زاویه حمله هیدروفویل تا حدود ۵ درجه می‌تواند باشد، بنابراین هیدروفویلی مناسب است که در این زاویه حمله بیشترین نسبت لیفت به درگ را داشته باشد.

➤ سادگی ساخت و همچنین قابلیت نصب بر روی شناور قابلیت ساخت و نصب بر روی شناور از دیگر معیارهای انتخاب مقطع می‌باشد، از آنجاکه کارفرمایان صنعتی به بحث سهل بودن نصب، تعمیر و نگهداری حساس بوده و این مقوله از اهمیت فراوانی برایشان برخوردار است در این تحقیق این مورد نیز مدنظر قرار گرفت.

پس از تعیین فیلترهای انتخاب مقطع، هیدروفویل‌هایی که قابلیت استفاده در شناورهای کاتاماران را دارا بودند شناسایی و مورد بررسی قرار گرفتند، لازم به ذکر است از آنجایی که تعداد بسیار زیادی فویل موجود و قابلیت تست تمام موارد وجود نداشت در نهایت سه مقطع که شرایط ۳ گانه فوق را دارا بودند مورد بررسی قرار گرفتند، سعی بر این بود که آن مقاطع شناخته شده باشند. این سه مقطع عبارت‌اند از:

- EPPLER 874
- NACA16
- Gottingen 11k

در شکل‌های ۴ تا ۶ نمایی از مقاطع هیدروفویل‌ها که در آزمایشگاه ساخته شده‌اند نشان داده شده است.



شکل (۷) معرفی ابعاد فویل هیدروفویل

$$F_L = 1/2 \rho C_L (\text{SPAN} * \text{CHORD}) v^2 \\ = 0.4 (\text{DISPLACEMENT})$$

در رابطه فوق پارامترها عبارتند از:

$F_L$ : نیرو لیفت هیدروفویل

□: چگالی آب

$C_L$ : ضریب لیفت

SPAN: طول اسپن هیدروفویل

CHORD: طول کورد هیدروفویل

$V$ : سرعت ورودی جریان به هیدروفویل (که تقریباً برابر با سرعت شناور در نظر گرفته می‌شود).

DISPLACEMENT: وزن شناور

از آنجاکه این تحقیق جنبه صنعتی دارد موارد آسانی ساخت و نصب فویل بر روی شناور اصلی و همچنین استحکام فویل در شرایط حرکت با سرعت ۳۸ نات در دریا نیز در نظر گرفته شده است. این موارد محققین را بر آن داشت که طول اسپن را برای افزایش استحکام، برابر بافاصله بین دوبنده در نظر بگیرند تا بتوان دو طرف فویل را به بدنه شناور متصل کرد، که با در نظر گرفتن این مورد ابعاد هیدروفویل در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است ضریب لیفت هیدروفویلها با توجه به سرعت، عدد رینولدز و همچنین زاویه حمله تعیین می‌گردد. از آنجاکه هر ۳ مقطع انتخابی شناخته شده می‌باشند با توجه به ۲ پارامتر عدد رینولدز و زاویه حمله، می‌توان ضریب لیفت آن‌ها را در استانداردها استخراج کرد.



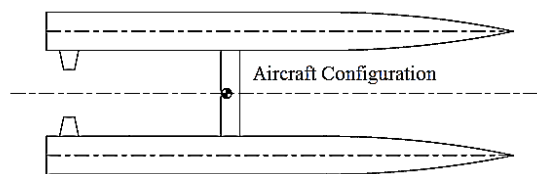
شکل (۶) هیدروفویل‌های ساخته شده با مقطع Gottingen

11k برای مدل شناور

#### ۴-۳- تعیین ابعاد هیدروفویل

در این بخش برای مدل شناور کاتاماران ابعاد فویل مناسب برای هر سه مقطع تعیین می‌گردد. ابعاد مدل شناور در جدول ۱ آورده شده است. اولین گام در تعیین ابعاد هیدروفویل تعیین سرعت می‌باشد، به این معنی که برای چه بازه‌ای از سرعت شناور، هیدروفویل استفاده می‌شود. در این تحقیق با توجه به اینکه بیشترین میزان سرعت شناور مورد بررسی ۳۸ نات می‌باشد بنابراین سرعت مورد نظر جهت طراحی فویل این سرعت در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین ابعاد فویل شامل طول کورد و اسپن (شکل ۷)، در این تحقیق نیروی لیفت هیدروفویل در سرعت ۳۸ نات شناور و زاویه حمله ۵ درجه؛ ۴۰ درصد وزن شناور در نظر گرفته شده است. بدین معنی که در این سرعت ۴۰ درصد وزن شناور توسط هیدروفویلها تحمل شود. با در نظر گرفتن این نکته و همچنین با توجه به اینکه در تست دریامانی زاویه پیچ شناور در این سرعت حدود ۵ درجه به دست آمده است (مجموع زاویه پیچ شناور و زاویه حمله اولیه، زاویه حمله نهایی هیدروفویل در نظر گرفته می‌شود)، بنابراین در سرعت طراحی ۳۸ نات برای شناور اصلی که معادل ۹/۷۷ متر بر ثانیه برای مدل در آزمایشگاه می‌باشد، زاویه حمله و ضریب لیفت فویل تعیین شده و در مرحله بعد با توجه به رابطه نیروی لیفت هیدروفویل (رابطه ۱)، ابعاد فویل به دست می‌آید.





شکل (۸) چیدمان فویل بر روی مدل شناور

دو فویل انتهایی بحث پایدارسازی شناور را دنبال کرده و فویل اصلی نیروی لیفت لازم جهت کاهش سطح خیس و به دنبال آن کاهش درگ و مصرف سوخت شناور را تأمین می‌کند. پس از تعیین نوع چیدمان فویل‌ها در طول شناور، در مرحله بعد تست‌های مدل انجام خواهد گرفت.

#### ۴-انجام تست‌های مدل

آزمایش‌های تست مدل در آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس انجام شده است. مشخصات آزمایشگاه در جدول ۳ ارائه شده است.

در این بخش نتایج تست مقاومت مدل شناور با سه هیدروفویل EPPLER, NACA16, Gottingen 11k در ۸۷۴ ارائه می‌شود. هیدروفویل‌ها در مرکز ثقل و همچنین پاشنه شناور بر طبق چیدمان تعیین شده نصب شده و شناور در دو حالت با فویل و بدون فویل تست می‌شود. در نهایت مقطع هیدروفویل مناسب از منظر کاهش هر چه بیشتر مقاومت تعیین و معرفی شده است. در شکل ۹ نصب هیدروفویل‌ها بر روی مدل شناور نشان داده شده است.

جدول (۳) مشخصات آزمایشگاه ملی دریایی ایران

۳۹۲	طول (متر)
۶	عرض (متر)
۴	عمق (متر)
۱۹	بیشترین سرعت ارا به (متر بر ثانیه)
مقاومت، دریامانی، مانور، بازده و ضرایب پروانه	پارامترهای قابل اندازه‌گیری مدل شناور در آزمایشگاه

جدول (۲) ابعاد مدل هیدروفویل

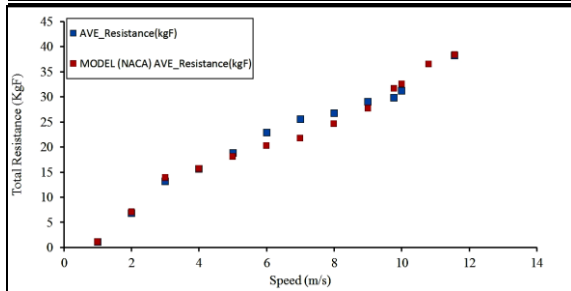
مقطع هیدروفویل	طول کورد (متر)	طول اسپین (متر)
EPPLER 874	۰/۰۵	۰/۴۰۷۵
NACA 16	۰/۰۵۵	۰/۴۰۷۵
Gottingen 11k	۰/۰۴۵	۰/۴۰۷۵

پس از تعیین ابعاد فویل‌ها در گام بعد چیدمان فویل‌ها مطرح می‌شود، به‌طور کلی می‌توان گفت که موقعیت طولی مرکز فشار ناشی از فویل زیر بدنه (L.C.P)<sup>۱</sup> باید در نزدیکی موقعیت طولی مرکز ثقل شناور (L.C.G)<sup>۲</sup> باشد. فرم بدنه زیر آب شناور یعنی شکل بدنه پروازی کاتاماران تأثیر زیادی روی تعیین بهترین مکان برای L.C.P می‌گذارد. بهترین مکان طوری انتخاب می‌شود که شناور در بازه سرعت‌های کارکرد اصلی خود دارای مقاومت بهینه شود. این مکان می‌تواند جلوتر از L.C.G یا عقب‌تر از آن، وابسته به فرم بدنه قرار گیرد.

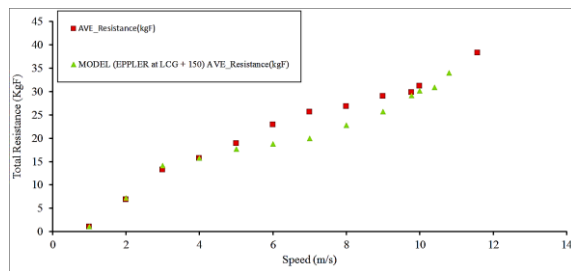
باید توجه داشت که در شناورهای کوچک تغییر مرکز ثقل شناور در اثر جابجایی بارها، مصرف سوخت و حرکت اشخاص بسیار محسوس است. برای نگاه‌داشتن شرایط کارکرد مناسب شناور این تغییر نباید باعث از بین رفتن خواص پایداری و مقاومت شناور شود. به‌عنوان یک راه‌حل می‌توان گفت فاصله L.C.P و L.C.G باید همواره ثابت بماند که این کار در شناورهای بزرگ توسط وسایل کنترل‌کننده برای تغییر موقعیت هیدروفویل‌ها و یا وسایل خودکار تنظیم‌کننده تریم شناور می‌تواند صورت پذیرد. در شناورهای کوچک استفاده از این وسایل پیچیده خیلی مطلوب نمی‌باشد. در شناور هایسوکت (استفاده از فویل در شناور کاتاماران) انواع چیدمان‌ها معرفی شده است که پس از بررسی تحقیقات علمی و صنعتی پیشین درزمینه‌ی مکان بهینه نصب هیدروفویل‌ها در شناور کاتاماران، چیدمان Aircraft Configuration به‌عنوان چیدمان بهینه تشخیص داده شد. در این چیدمان دو فویل کوچک در پاشنه شناور و همچنین یک فویل بزرگ‌تر که دارای اسپینی معادل فاصله بین دوبدنه شناور است در مرکز ثقل شناور قرار می‌گیرد. این چیدمان در شکل (۸) نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Longitudinal Center of Pressur

<sup>2</sup> Longitudinal Center of Gravity

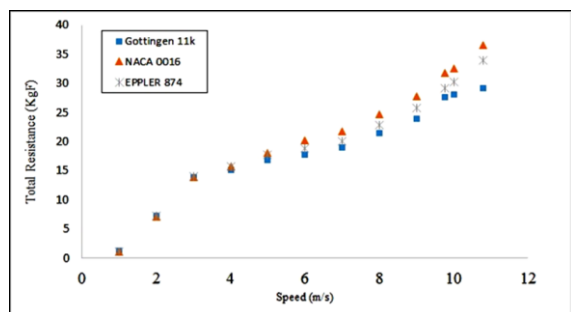


شکل (۸) نمودار مقایسه مقاومت مدل شناور در دو حالت با و بدون فویل NACA 0016



شکل (۹) نمودار مقایسه مقاومت مدل شناور در دو حالت با و بدون فویل EPPLER 874

همان طور که نمودارها مشاهده می شود در هر سه فویل مقاومت نسبت به حالت شناور خالی کاهش یافته است. برای تعیین مناسب ترین مقطع در شکل ۱۰ دیگرام مقاومت بر حسب سرعت شناور برای هر ۳ فویل رسم شده است.



شکل (۱۰) مقایسه مقاومت کل وارد بر مدل شناور در حالت نصب فویل های مختلف

با مشاهده شکل (۱۰) همان طور که مشاهده می شود مقطع هیدروفویل گوتینگن باعث کاهش بیشتر درگ وارد بر شناور در سرعت های مختلف می گردد. همچنین نتایج نشان داد که با استفاده از هیدروفویل ذکر شده میزان کاهش درگ شناور در سرعت های مختلف بین ۹ تا ۱۴ درصد می باشد. با کاهش درگ؛ مصرف سوخت شناور و همچنین بار وارد بر موتور شناور کاهش می یابد. که این



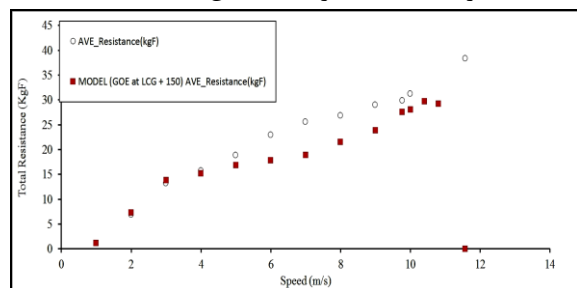
شکل (۹) نصب هیدروفویل بر روی مدل

پس از نصب هیدروفویل در روی بدنه شناور، و تعیین شرایط بارگذاری و همچنین تعیین سرعت های تست مدل، تست های مقاومت انجام شد.

#### ۴-۱ انتخاب هیدروفویل

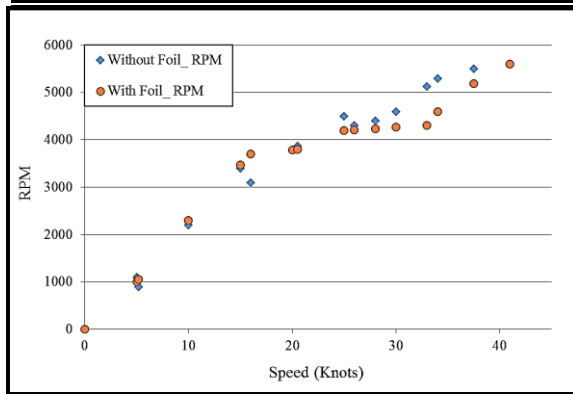
همان طور که قبلاً ذکر گردید چیدمان هیدروفویل ها بر روی بدنه بر طبق چیدمان Aircraft می باشد، در این بخش هر ۳ مقطع تعیین شده بر روی مدل شناور تست شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده و مناسب ترین مقطع تعیین می گردد. در شکل ۹ نمایی از نصب هیدروفویل بر روی مدل نمایش داده شده.

پس از نصب هیدرو فویل، تست ها در شرایط کاملاً یکسان از لحاظ بارگذاری و سرعت با فویل و حالت بدون فویل، انجام شده و نتایج شامل مقاومت که بیانگر میزان کاهش مقاومت و در ادامه کاهش مصرف سوخت است. در شکل های ۷، ۸ و ۹ نمودار مقاومت با و بدون فویل های مختلف بر حسب سرعت نشان داده شده است،



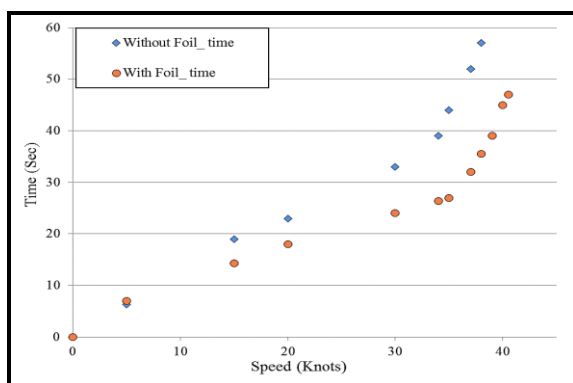
شکل (۷) نمودار مقایسه مقاومت مدل شناور در دو حالت با و بدون فویل GOE 11K





شکل (۱۱) میزان تریم شناور بر حسب سرعت در دو حالت با و

بدون نصب فویل



شکل (۱۲) مقایسه بین مدت زمان رسیدن به سرعت مشخص

در دو حالت با و بدون نصب فویل

شکل (۱۲) زمان رسیدن به یک سرعت مشخص را در دو حالت با یکدیگر مقایسه کرده است. از این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که در صورتیکه این دو شناور (شناور با و بدون فویل) با یکدیگر کورس (مسابقه) بگذارند آنگاه چون شناور با فویل در مدت زمان کمتری به بیشترین سرعت می‌رسد بنابراین مسیر را سریعتر طی می‌کند. این خود گواه چند نکته است: ۱) کاهش مصرف سوخت در یک ماموریت مشخص ۲) کاهش فشار بر روی موتور و افزایش عمر مفید موتور.

در ادامه؛ براساس شکل (۱۳) که نشان دهنده مقایسه نتایج میزان گاز موتور شناور در دو حالت با و بدون نصب فویل می‌باشد شاهد افزایش سرعت در زمان نصب فویل بر روی شناور هستیم.

کاهش بار باعث افزایش عمر مفید موتور شناور می‌گردد. تست مدل نشان داد برخلاف عرف که در اکثر تحقیقات دریایی از هیدروفویل با مقطع ناکا برای استفاده در بین دوبنده شناور استفاده شده است، هیدروفویل با مقطع گوتینگن برای کاهش درگ این شناور کاتاماران که شناوری معمول و با کاربرد فراوان است، مناسب‌تر می‌باشد. دلیل اینکه فویل با مقطع گوتینگن باعث کاهش بیشتر مقاومت وارد بر شناور می‌شود را می‌توان در توزیع فشار در دو طرف مقاطع جستجو کرد. در فویل با مقطع گوتینگن سرعت جریان ورودی در روی فویل و زیر فویل تغییرات بیشتری نسبت به مقاطع اپلر و ناکا داشته و بنابراین اختلاف فشار بالا و پایین فویل در این مقطع بیشتر است. با توجه به اختلاف فشار بیشتر سطوح در این مقطع بنابراین نیروی لیفت بیشتری تولید شده و سطح خیس بیشتر کاهش می‌یابد، با کاهش سطح خیس درگ وارد بر شناور کاهش می‌یابد.

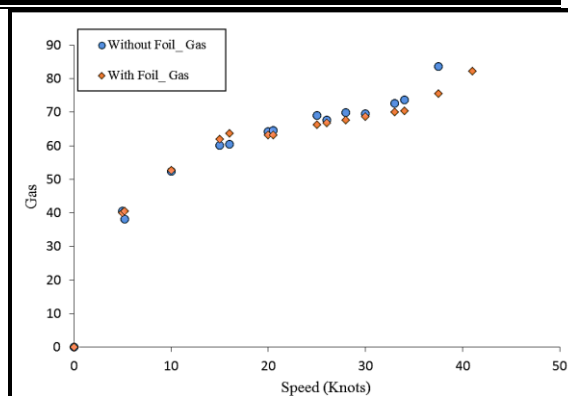
#### ۵- مقایسه نتایج بین دو حالت با و بدون نصب فویل

در قسمت مقایسه بین نتایج، دور موتور، زمان رسیدن به سرعت‌های متناظر، میزان گاز موتور با یکدیگر مقایسه شده‌اند. از اصلی‌ترین مقایسه‌ها می‌توان به مقایسه فی‌مابین دور موتور اشاره کرد، که این مقایسه می‌تواند به هدف اصلی تحقیق؛ که کاهش مصرف سوخت و باربرداری از موتور است را پاسخ دهد. در شکل (۱۱) دور موتور در دو حالت با و بدون فویل با یکدیگر مقایسه شده است، همانطور که مشاهده می‌شود فویل توانسته در یک سرعت یکسان دور موتور را به میزان حداقلی ۱۰ درصد کاهش دهد. دستاورد دیگر استفاده از فویل اینست که سرعت افزایش می‌یابد که در این تست مشاهده شد سرعت به میزان ۳ نات افزایش یافته و از ۳۸ نات به ۴۱ نات رسیده است. در ادامه، مدت زمان رسیدن به سرعت‌ها مقایسه شده‌اند.

- (۳) با انجام آزمایش تعیین گردید میزان کارایی هیدرو فویل‌های نامتقارن مانند گوتینگن بیشتر از هیدرو فویل‌هایی با مقاطع متقارن مانند ناکا و اپلر است. که منجر به کاهش درگ و
- (۴) استفاده از هیدروفویل تریم دینامیکی شناور را کاهش و باعث افزایش پایداری شناور گردید.

## ۷- مراجع

- [1] Hoppe KG. The hydrofoil supported catamaran. Progress research report, Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, Stellenbosch University, Stellenbosch, 1980.
- [2] Gunter G. Development of hydrofoil supported catamaran with semi-displacement hulls. MSc Thesis, Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, Stellenbosch University, Stellenbosch, 1997.
- [3] Migeotte G, Hoppe KG and Kornev N. Design and efficiency of hydrofoil-assisted catamarans. In: Proceedings of the sixth international conference on fast sea transportation (FAST '01), RINA, Southampton, 4-6 September 2001, vol. III, pp.79-86.
- [4] Yang L and Rhee K P, "Design of ship-motion regulators for foil catamarans in irregular sea waves". IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 27, no. 3, pp. 738-752, Jul 2002.
- [5] Ren J and Yang Y. Fuzzy gain scheduling attitude control for hydrofoil catamaran. In: Proceedings of the 2004 American control conference, Boston, MA, 30 June-2 July 2004. New York: IEEE.
- [6] Caccia M, Bono R, Bruzzone G, et al. Design and exploitation of an autonomous surface vessel for the study of sea-air interactions. In: Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation, Barcelona, 18-22 April 2005. New York: IEEE
- [7] Milandri SM. Seakeeping control of HYSUCATS. MSc Thesis, Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, Stellenbosch University, Stellenbosch, 2006.
- [8] Ferreira H, Marques RME, Pinto J, et al. SWORDFISH: an autonomous surface vehicle for network centric operations. In: Proceedings of the IEEE journal of oceanic engineering, Aberdeen, 18-21 June 2007. New York: IEEE.
- [9] Yang LZ, Li X, Guo Z, et al. Research of combined control scheme for fast catamaran motion control using Tfoils and interceptors. Int J Intell Eng Syst 2012; 5: 1-8.
- [10] Wang HD, Xiao PQ and Feng Liang HY. Vertical plane motion control of an S-SWATH vehicle with flapping foil stabilisers sailing in waves. Ocean Eng 2016; 121:184-195.



شکل (۱۳) مقایسه گاز موتور بین دو حالت با و بدون نصب فویل

## ۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق روند یا به عبارتی سیکل طراحی استفاده از هیدروفویل در شناور کاتاماران به منظور کاهش مصرف سوخت، افزایش طول عمر مفید موتور و همچنین افزایش سرعت شناور تدوین گردید. این سیکل از تست مدل و انتخاب مقطع هیدروفویل مناسب و همچنین نحوه تعیین ابعاد آن در آزمایشگاه دریایی شروع و به استفاده از هیدروفویل در شناور اصلی و در دریا منتهی می‌گردد. از آنجاکه شناور مطرح شده در این تحقیق طوری انتخاب گردید که کاربری گسترده و متنوعی داشته باشد، بنابراین بهینه‌سازی‌هایی از این دست که می‌توان با ساخت و نصب المان‌های ارزان قیمت مانند هیدروفویل مصرف سوخت شناور را کاهش و طول عمر مفید کارکرد موتور را افزایش داد، بسیار مفید و از لحاظ اقتصادی برای مالکان شناورها دارای صرفه اقتصادی قابل توجهی می‌باشد. این مورد یک دستاورد این تحقیق در حوزه‌ی صنعتی می‌باشد. همچنین این تحقیق نشان داد که برخلاف عرف موجود در اکثر تحقیقات دریایی که از مقطع هیدروفویل ناکا جهت کنترل و بهینه‌سازی عملکرد هیدرو دینامیکی شناور کاتاماران استفاده می‌شود، استفاده از هیدرو فویل‌هایی با مقاطع نامتقارن مانند گوتینگن می‌تواند مفیدتر بوده و کارایی بیشتری داشته باشد. از دیگر نتایج تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- (۱) استفاده از هیدروفویل گوتینگن باعث کاهش حداقلی ۱۰ درصدی درگ وارد بر شناور می‌گردد. که منجر به کاهش مصرف سوخت شناور و کاهش بار وارد بر موتور شناور می‌گردد.
- (۲) استفاده از هیدروفویل مدت زمان رسیدن به سرعت اسکی در مدل شناور را کاهش داد.