

# کاهش مقاومت هیدرودینامیکی شناورهای کاتاماران توسط هیدروفویل

مهدی عسگری\* و محمد سعید سیف\*\*

آزمایشگاه مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۸۲/۶/۱۸ - دریافت نسخه نهایی: ۸۳/۳/۲۴)

**چکیده** - مقاله حاضر نتایج حاصل از آزمایشهای انجام شده بر روی مدل یک شناور کاتاماران از نوع پروازی است. هدف از انجام این آزمایشها بررسی تأثیر به کارگیری هیدروفویل در این نوع شناور است. آزمایش ابتدا روی مدل بدون هیدروفویل انجام شده و نمودار نیروی مقاومت هیدرودینامیکی بر حسب سرعت آن به صورت بی بعد به دست آمده است. سپس مدل شناور به همراه هیدروفویل با آرایشهای مختلف از نظر محل قرارگیری و زاویه حمله مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج آن با حالت بدون هیدروفویل مقایسه شده است. نتایج بیانگر کاهش قابل توجهی در مقاومت شناور مجهز به هیدروفویل به خصوص در سرعتهای بالا است. همچنین جانمایی هیدروفویل ها مهم بوده و طراحی نامناسب موجب ناپایداری در حرکت و افزایش مقاومت هیدرودینامیکی خواهد شد.

واژگان کلیدی: شناور کاتاماران، هیدروفویل، آزمایش مدل، مقاومت هیدرودینامیکی

## Hydrodynamic Resistance Reduction in Catamaran Assisted Hydrofoils

M. Asgaree and M. S. Seif

Marine Engineering Laboratory, Sharif University of Technology

**Abstract:** *The present paper contains the test results of a planing catamaran model. The aim of the tests was to study the effect of hydrofoil in these types of crafts. First, experiments were carried out on the bare body (i.e. without hydrofoils) to obtain non-dimensional hydrodynamic resistance coefficient versus speed. Then, the model with hydrofoils, by various locations and attack angles were subjected to tests and the results were compared with those from the tests with the bare body. Results show that*

\* - کارشناسی ارشد      \*\* - دانشیار

great reduction in hydrodynamic resistance of hydrofoil-supported catamaran is accessible especially at high speeds. In addition, hydrofoils positioning is important and un-suitable designs may result in instability in motion and increased in hydrodynamic resistance.

**Keywords:** Catamaran Vessel, Hydrofoil, Model test, Hydrodynamic Resistance

## فهرست علائم

$L_W$ طول صفحه آبخور شناور	$A$ مساحت تصویر شده هیدروفویل
$R$ نیروی مقاومت هیدرودینامیکی	$b$ طول دهانه هیدروفویل
$R_F$ نیروی مقاومت اصطکاک	$B_{max}$ بیشترین عرض بدنه
$R_T$ نیروی کل مقاومت هیدرودینامیکی	$B_f$ عرض (متوسط) تونل بین دو بدنه
$R_r$ نیروی مقاومت باقیمانده	$ch$ طول وتر هیدروفویل
$Re$ عدد رینولدز	$C_F$ ضریب نیروی مقاومت اصطکاک
$V$ سرعت	$C_L$ ضریب نیروی بالابر هیدروفویل
$\Delta$ وزن جابه جایی	$C_T$ ضریب نیروی مقاومت باقیمانده
$\varepsilon = \frac{R_T}{\Delta}$ نیروی مقاومت کل بی بعد	$C_T$ ضریب نیروی مقاومت کل
$\rho$ چکالی آب	$F_L$ نیروی بالابر هیدروفویل
$\nabla$ حجم مغروق بدنه در حالت سکون	$Fn_{\nabla}$ عدد فرود حجمی (سرعت بی بعد)
$\alpha$ زاویه حمله هیدروفویل (برحسب درجه)	$Fn_h$ عدد فرود بر حسب عمق هیدروفویل از سطح آب
	$h$ عمق هیدروفویل از سطح آب

۱. علائم استفاده شده برای مدل با اندیس  $m$  و برای نمونه واقعی با اندیس  $s$  مشخص شده اند.

### ۱- مقدمه

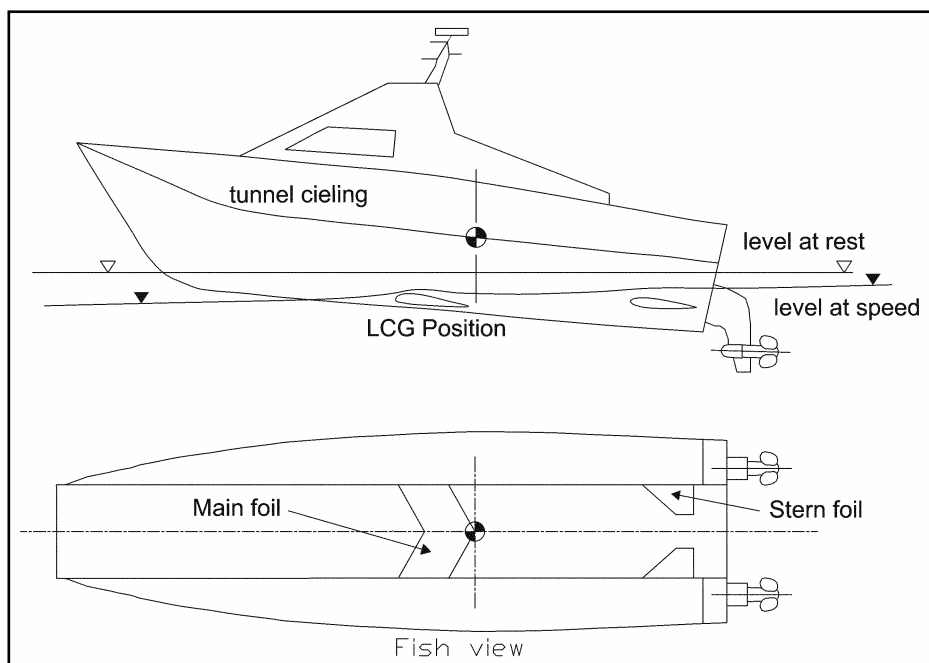
شناور هیسوکت<sup>۲</sup> یکی از انواع شناورهای ترکیبی است که با به کارگیری هیدروفویل در فضای (تونل) بین دو بدنه کاتاماران ابداع شده است. استفاده از هیدروفویل موجب افزایش بازده کلی شناور و بهبود در عملکرد آن می شود [۱]. شکل (۱) نمای کلی این نوع شناورها را نمایش می دهد.

### ۲- جانمایی هیدروفویلها

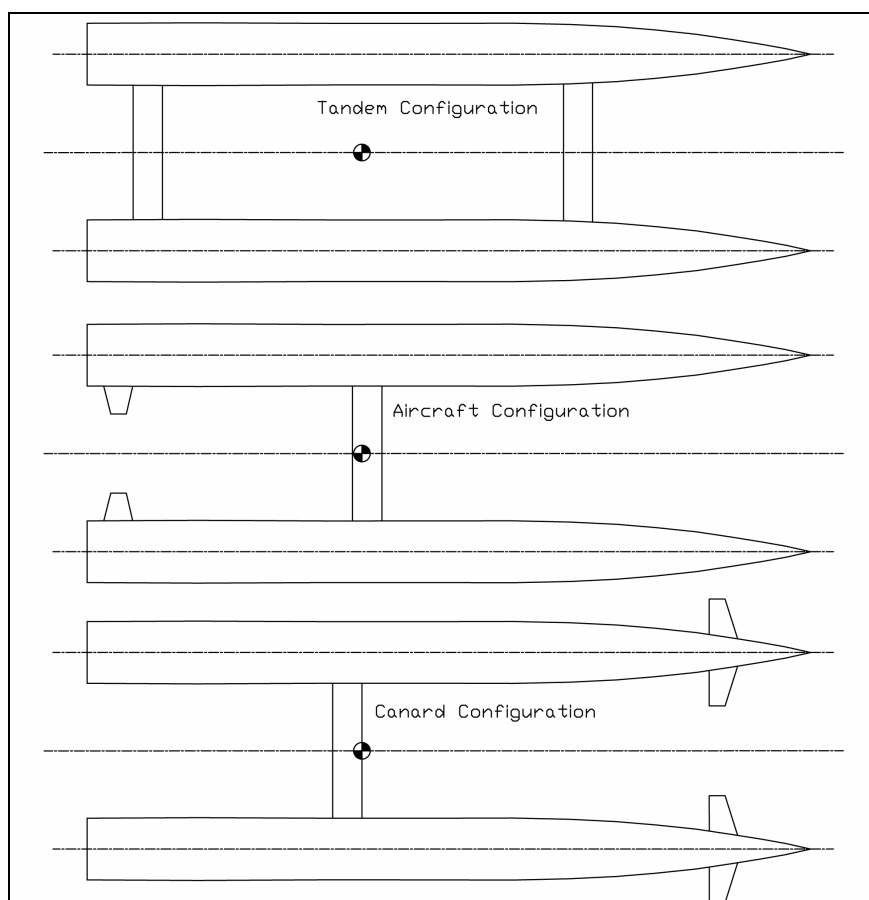
شکل (۲) انواع جانماییهای مهم هیدروفویلها را نشان می دهد. آرایش نخست که پشت سرهم<sup>۳</sup> نام دارد متداولترین آنهاست و هیدروفویلها از نظر توزیع بار تقریباً حالتی یکسان دارند.

در چند دهه اخیر استفاده از شناورهای تندرو گسترش زیادی پیدا کرده است. با گذشت زمان و استفاده از انواع این شناورها، نقاط ضعف و قوت هر یک مشخص و اصلاحاتی برای برطرف کردن عیوب آنها ارائه شده است.

اصلاحات صورت گرفته در نهایت موجب پیدایش شناورهای ترکیبی<sup>۱</sup> شده اند. این شناورها از ترکیب دو یا چند نوع نیرو برای خشی کردن وزن خود استفاده می کنند. استفاده از این ترکیب موجب دستیابی به مزایای چند نوع شناور به طور یکجا و کاهش نواقص و عیوب شناورهای مذکور می شود.



شکل ۱- نمای کلی شناور هیسوکت [۲]



شکل ۲- آرایشهای مختلف هیدروفویلها [۳]

آرایش دیگر، آرایشی شبیه آرایش بالهای هواپیماست که حالت ساده‌تر آن به صورت تک هیدروفویلی بوده و بیشتر در شناورهای نوع پروازی کاربرد پیدا کرده است.

آرایش سوم موسوم به کانارد<sup>۴</sup> است که در تعدادی از شناورها مورد استفاده قرار گرفته است و باعث می‌شود که تا ۱۰۰٪ وزن جابه‌جایی آنها توسط نیروی بالابر هیدروفویل خنثی شود. در این نوع شناور، مانند شناور نوع دوم قسمت اصلی بار روی هیدروفویل بزرگ است و هیدروفویل‌های کوچک بار کمتری تحمل می‌کنند.

انتخاب آرایش مناسب هیدروفویل‌ها کار پیچیده‌ای است و وابستگی زیادی به هندسه بدنه و میزان بارگذاری روی آنها دارد. در طراحی برای عدد فرودهای پایتتر (بین ۱/۵ و ۲) آرایش هیدروفویل‌ها نقش مهمتر و حساستری ایفا می‌کند، چرا که هر آرایشی را نمی‌توان در سرعت‌های پایین استفاده کرد. علاوه بر اینکه، تأثیر شکل بدنه در کاهش نیروی مقاومت هیدرودینامیکی خیلی بیشتر می‌شود. این نکته در طراحی هیدروفویل‌ها برای شناورهای کاتامارانی که قبلاً هیدروفویل در آنها استفاده نشده است به توجه بیشتری نیاز دارد [۳و۴].

### ۳- مقاومت هیدرودینامیکی شناورها

بهبود در نیروی مقاومت شناورهای هیسوکت یعنی کاهش مقاومت هیدرودینامیکی به خاطر اثرات مثبت ناشی از به‌کارگیری هیدروفویل است که شامل موارد زیر می‌شود:

۱- کاهش سطح خیس شده و طول صفحه آب‌خور که موجب کاهش اصطکاک بدنه می‌شود.

۲- مقاومت باقیمانده بدنه نیز که رابطه مستقیم با حجم زیرآب بدنه دارد کاهش می‌یابد.

۳- اثرات متقابل بین هیدروفویل‌ها و بدنه که در بعضی از شرایط ممکن است موجب کاهش نیروی مقاومت هیدرودینامیکی شود.

نیروی مقاومت هیدرودینامیکی شناور در آب آرام علاوه بر اینکه مؤلفه‌های معمول وارد بر بدنه و هیدروفویل را به طور

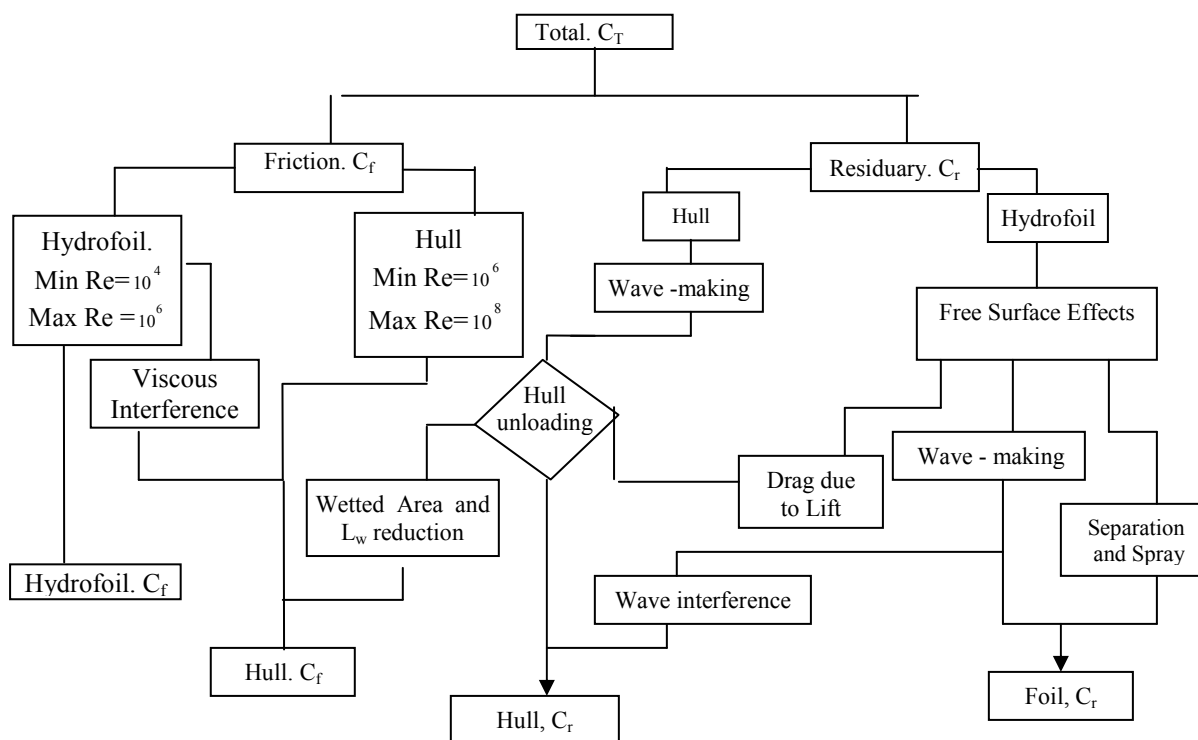
مجزا در بر دارد، شامل اثرهای متقابل بین هیدروفویل و بدنه نیز می‌شود. تقسیم بندی معمول نیروی مقاومت هیدرودینامیکی وارد به شناور هیسوکت در نمودار شکل (۳) نشان داده شده است.

همان‌گونه که در نمودار فوق ملاحظه می‌شود به دلیل اختلاف عدد رینولدز بدنه با هیدروفویل رژیم جریان حول آنها با یکدیگر تفاوت دارد که سبب اختلاف در ضخامت لایه مرزی شده است.

اثرهای تداخل لزجی بین بدنه و هیدروفویل‌ها یکی از مؤلفه‌های مؤثر در مقاومت وارد بر شناور هیسوکت است. این اثرها ناشی از ترکیب لایه مرزی ایجاد شده روی هیدروفویل و بدنه در نقاط اتصال هیدروفویل‌ها به بدنه است. حرکت ذرات سیال در لایه مرزی توسط گرادیان فشار معکوس ناشی از این تداخل، در امتداد لبه فرار هیدروفویل کند می‌شود، در نتیجه جدایش سریعتر اتفاق می‌افتد که پسای فشاری را افزایش می‌دهد [۳].

مقاومت باقیمانده یکی از مؤلفه‌های مهم مقاومت کل است. با توجه به اینکه بدنه هیسوکت به خاطر نیروی بالابر هیدرودینامیکی هیدروفویل‌ها مقدار زیادی از آب خارج می‌شود و انحراف زاویه ای طولی<sup>۵</sup> نیز تغییر زیادی پیدا می‌کند، روشهای تجربی موجود که برای تخمین مقاومت باقیمانده کاتامارانها استفاده می‌شود دیگر کارآمد نیست. همچنین به دلیل توسعه مناسب و خوب نظریه هیدروفویل (ایرفویل)، تخمین نیروهای مقاومت وارد به هیدروفویل و مؤلفه باقیمانده آن مشکل اصلی به شمار نمی‌رود و تعیین ابعاد هیدروفویل‌ها و موقعیتشان نسبت به بدنه با تقریب خوبی امکانپذیر است [۳].

امواج تولیدی توسط هیدروفویل‌ها با امواج تولیدی به وسیله بدنه تداخل پیدا می‌کند که ممکن است در مقاومت هیدرودینامیکی تأثیر مثبت یا منفی داشته باشد. در آزمایشهای انجام شده توسط هوپ<sup>۶</sup> [۱۹۸۹] نشان داده شده که کاهش خالص نیروی مقاومت هیدرودینامیکی ناشی از تداخل امواج برای کاتامارانهای نوع پروازی با تک بدنه‌های متقارن قابل دستیابی است [۵]. این کاهش ممکن است برای کاتامارانهای با بدنه نیمه



شکل ۳- تجزیه مؤلفه های نیروی مقاومت هیدرودینامیکی وارد به شناور و هیدروفویل‌های آن [۳]

می‌یابد [۳].

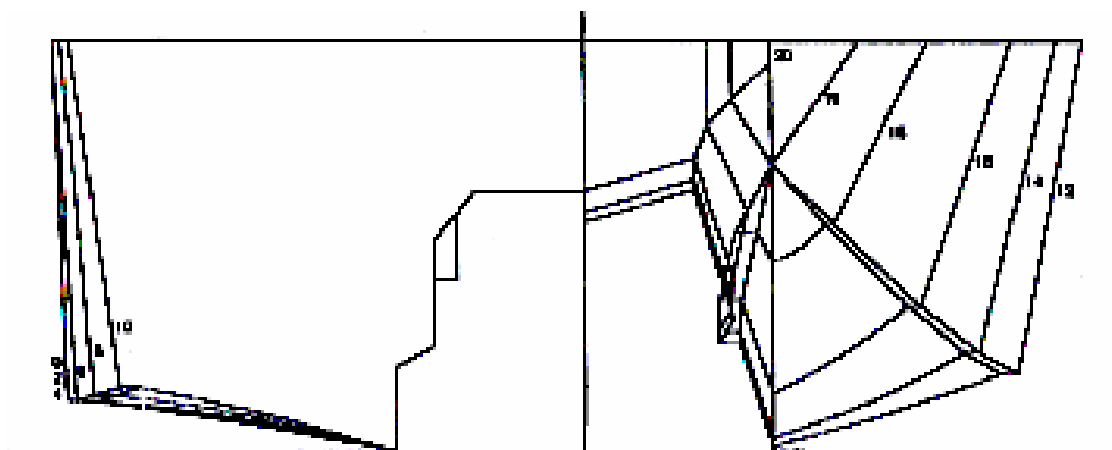
در تمامی کاتامارانهای با سرعت بالا، اصطکاک بزرگترین مؤلفه نیروی مقاومت هیدرودینامیکی است [۳]. حتی در کاتامارانهای با سرعت کم هم اصطکاک در مقایسه با شناورهای تک بدنه مشابه سهم بیشتری در مقاومت وارد به شناور دارد [۷].

#### ۴- مشخصات شناور مورد آزمایش

با توجه به مطالب ذکر شده در بخشهای قبل و اینکه مدل کاتاماران نوع پروازی انتخاب شده است، شکل (۴)، مناسبترین آرایش، برای مدل نوع Avion است. البته با توجه به نتایج ارائه شده در مراجع [۳] و [۸] ممکن است آرایش پشت سرهم نیز به اندازه Avion در بهبود نیروی مقاومت تأثیر داشته باشد.

با توجه به امکانات موجود برای ساخت مدل و سرعت قابل دسترسی در حوضچه کشش، آرایش پشت سرهم برای هیدروفویلها انتخاب شده است. البته مدل با تک هیدروفویل که نوع ساده آرایش Avion است نیز آزمایش شده و نتایج ارائه

جابه جایی ثابت به دست نیاید، چرا که جریان اطراف هیدروفویل ها و بدنه در اعداد فرود پایینتر بسیار پیچیده است. مکانیزم واقعی که باعث چنین اثراتی می‌شود ناشناخته و مبهم است، اما تخمین های عددی، با حل جریان پتانسیل که توسط وان والر<sup>۷</sup> [۱۹۹۹] در مورد اثرات متقابل هیدروفویل و بدنه در شناورهای هیدروفویل (تک بدنه) قبل از بلند شدن<sup>۸</sup> صورت گرفته است [۶]، می‌تواند در روشن شدن مسئله کمک مؤثری کند. گردابه‌های به جا مانده<sup>۹</sup> توسط هیدروفویلها باعث ایجاد خلاء نسبی، یعنی کاهش فشار زیر بدنه شناور، به ویژه در قسمت انتهایی آن می‌شود که نیروی مکشی به سمت پایین به بدنه وارد می‌کند. این نیرو باعث فرورفتن بیشتر پاشنه در آب شده، یعنی افزایش زاویه انحراف طولی و حجم مغروق بدنه و در نتیجه افزایش نیروی مقاومت هیدرودینامیکی وارد به شناور می‌شود. در مورد کاتامارانها در صورتی که هیدروفویل ها در تونل بین دو بدنه نصب شوند قدرت گردابه‌های به جا مانده به خاطر محدود شدن دو سر هیدروفویل به دو بدنه کاهش



شکل ۴- تصویر خطوط بدنه مدل کاتاماران

هیدرودینامیکی وارد به آن می‌شود که تغییرات در ضریب

نیروی برا به صورت زیر قابل محاسبه است [۱۰]:

$$C_L\left(\frac{h}{ch}\right) = \begin{cases} C_L\left(\frac{h}{ch} = \infty\right) \left[1 + \frac{1}{16} \left(\frac{ch}{h}\right)^2\right] & (Fn_h \rightarrow 0) \\ C_L\left(\frac{h}{ch} = \infty\right) \left[\frac{1 + 16\left(\frac{h}{ch}\right)^2}{2 + 16\left(\frac{h}{ch}\right)^2}\right] & (Fn_h > 10\left(\frac{h}{ch}\right)^{1/2}) \end{cases} \quad (2)$$

عدد فرود در معادلات فوق به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Fn_h = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

برای تخمین ابعاد هیدروفویل فرضهای ارائه شده در جدول (۱)

مورد استفاده قرار گرفته اند. که برای درک بهتر شکل (۵)

پارامترهای هندسی هیدروفویل و کاتاماران را نشان می‌دهد.

با توجه به معادله موجود برای محاسبه نیروی برا توسط

هیدروفویل (۴) و معادله محاسبه مساحت هیدروفویل (۵)

می‌توان با داشتن طول دهانه هیدروفویل عرض هیدروفویل یا

طول وتر آن را،  $ch$ ، حساب کرد.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_L \quad (4)$$

$$A = b \cdot ch \quad (5)$$

مقدار  $C_L$  از معادله (۱) تخمین زده می‌شود و مقدار نیروی برا

توسط هیدروفویل نیز طبق معادله زیر به دست می‌آید.

$$F_L = \frac{1}{2} (0.11\alpha) \rho (b \cdot ch) V^2 \quad (6)$$

شده است.

نظر به اینکه مدل موجود مربوط به شناوری با سرعت حدود

۴۰ گره دریایی است در شناور اصلی باید از هیدروفویل نوع

Delayed Cavitating استفاده کرد. از سوی دیگر به دلیل پایین

بودن سرعت در حوضچه کشش (با توجه به مقیاس مدل) و

محدودیت ساخت مدل، سرعت متناظر شناور واقعی در

بیشترین سرعت آزمایش حدود ۲۸ گره دریایی می‌شود که

ایجاد دو محدودیت می‌کند. نخست آنکه عدد کاویتاسیون در

مدل و نمونه اصلی اختلاف قابل توجهی دارد. دوم آنکه در

خارج از محدوده سرعت آزمایش، مقدار کاهش نیروی مقاومت

هیدرودینامیکی در شناور نامعلوم است. در نهایت با توجه به

محدودیت‌های ذکر شده، از هیدروفویل نوع (Sub-cavitating)

که برای سرعت مدل مورد آزمایش مناسب می‌باشد استفاده

شده است.

در حالت جریان دو بعدی شیب منحنی نیروی برا برای

تمامی انواع و مقاطع هیدروفویل‌های نازک تقریباً یکسان است و

مقدار ضریب نیروی برا ایجاد شده طبق معادله زیر می‌تواند

بیان شود [۹]:

$$C_L = 0.11\alpha \quad (1)$$

نکته‌ای که نباید فراموش شود این است که کار هیدروفویل در

نزدیک سطح آب، موجب تغییر در مقدار نیروهای

جدول ۱- فرضهای مورد نیاز برای تخمین ابتدایی ابعاد هیدروفویل

نوع آرایش	بار وارد به هیدروفویل (درصد از وزن شناور)	زاویه حمله	طول دهانه هیدروفویل (b) در مدل (cm)	عمق کارکرد هیدروفویل از سطح آب (cm)
پشت سر هم	٪۴۵ هیدروفویل جلو	۴°	۱۰	۰/۵
	٪۲۵ هیدروفویل عقب	۴°	۱۰	۱/۵
تک فویل	٪۴۵	۴°	۱۰	۰/۵

بنابراین مقدار طول وتر هیدروفویل به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$ch = \frac{2F_L}{0.11\alpha\rho bV^2} \quad (7)$$

طول وتر هیدروفویل برای دو آرایش آزمایش شده در مدل از معادله (۷) مطابق جدول (۲) به دست می‌آید. در صورتی که اثر سطح آزاد آب طبق معادله (۲) در نظر گرفته شود، تغییراتی در مقادیر محاسبه شده رخ خواهد داد، که در جدول مذکور آورده شده است.

## ۵- نتایج آزمایشها

آزمایشها، برای یک وزن جابه‌جایی و موقعیت مرکز ثقل ثابت انجام شده است. مدل در دو حالت بدون هیدروفویل و با هیدروفویل در بازه سرعت  $0.9\text{m/s}$  تا  $3.2\text{m/s}$  در حوضچه کشش با آرایش و موقعیتهای مختلف هیدروفویل آزمایش شده است، شکلهای (۶) و (۷) و در نهایت نتایج آزمایشها به صورت نمودار با یکدیگر مقایسه شده‌اند. آزمایش شناور بدون هیدروفویل در نمودارها با نام کاتاماران و شناور با هیدروفویل با نامهای HysuCAT21 و HysuCAT15 و نظیر آن - که رقم نخست از سمت چپ نشان دهنده تعداد هیدروفویل و رقم دوم نشان دهنده سری آزمایش است- مشخص شده است. مشخصات اصلی مدل در جدول (۳) ارائه شده است.

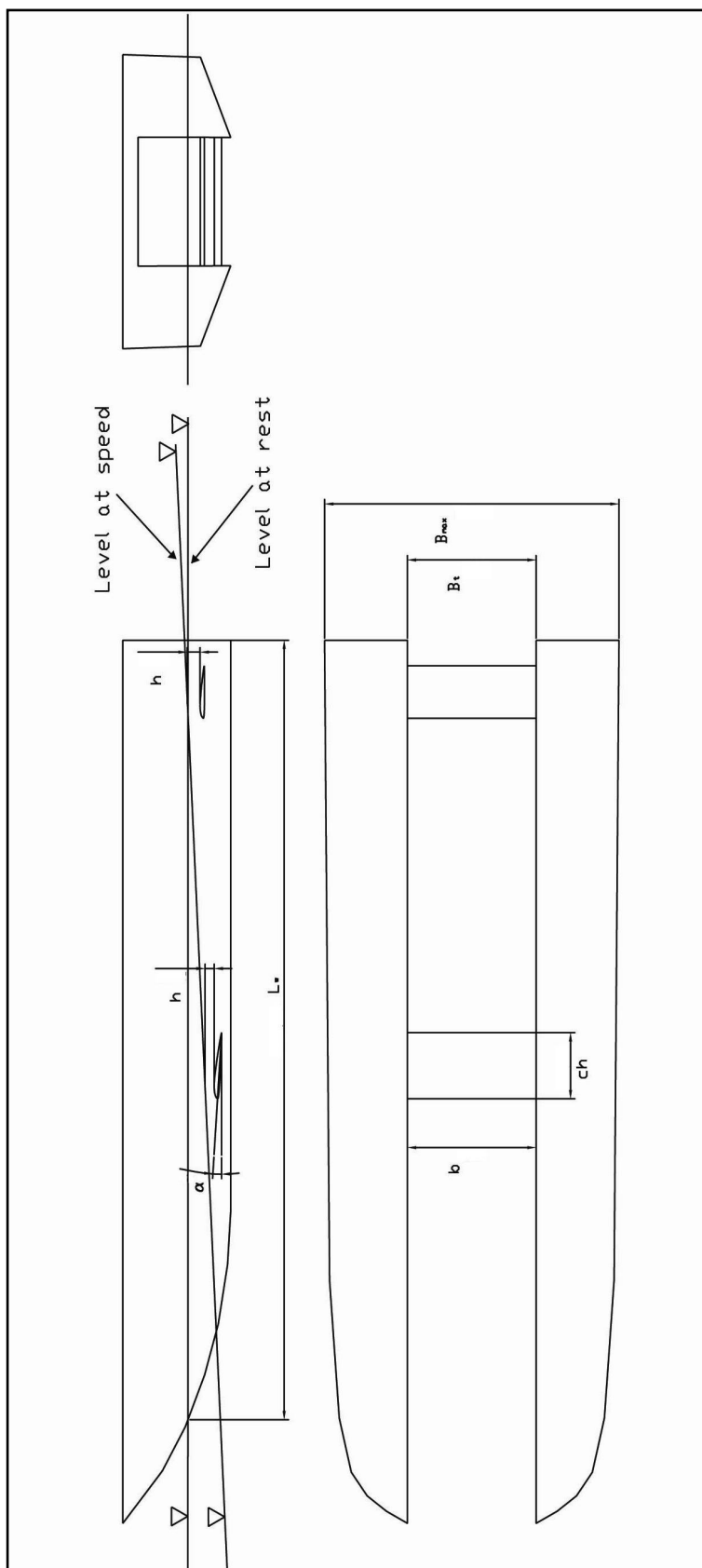
مسئله مهم در آزمایشها، قابلیت اطمینان نتایج به دست آمده است. به عبارت دیگر باید از تکرار پذیری آزمایشها مطمئن شد. برای این منظور داده‌های ثبت شده برخی از آزمایشها که

در سرعتهای مختلف (هر کدام ۲ مرتبه برای نمونه) صورت گرفته در شکلهای (۸) و (۹) نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکلهای مشاهده می‌شود حرکت مدل از ابتدا تا طی مسافتی مشخص شتابدار است و پس از ثابت شدن سرعت مقدار نیروی مقاومت کل نیز ثابت می‌شود. شکلهای (۱۰) و (۱۱) نیز نمونه‌هایی از وضعیت مدل را در هنگام آزمایش نمایش می‌دهند.

مدل مورد نظر در محدوده سرعت  $0.9\text{m/s}$  تا  $3.2\text{m/s}$  با تغییر موقعیت طولی، ارتفاع و زاویه حمله هیدروفویلها آزمایش شد که در برخی موارد کاهش نیروی مقاومت هیدرودینامیکی در حدود ۲۰٪ به دست آمد که در صورت امکان آزمایش، در سرعتهای بالاتر، انتظار می‌رود درصد کاهش بیشتری در نیروی مقاومت به دست آید.

برای آرایش پشت سرهم در محدوده عدد فرود ۱ تا ۱/۵ کاهش در نیروی مقاومت شروع می‌شود. این حالت قبل از سرعتی است که نیروی بالابر هیدروفویل، مقداری قابل مقایسه با وزن شناور پیدا کند. در سری آزمایشهای هیسوکت ۲۲ و ۲۳ کاهش نیروی مقاومت در مقایسه با دیگر آزمایشها نرخ بیشتری دارد که می‌توان نتیجه گرفت هیدروفویلها در وضعیت نسبی مناسبتری قرار دارند، شکل (۱۲) و (۱۳).

در سرعتهای پایین به دلیل اضافه شدن نیروی پسای هیدروفویل به نیروی پسای شناور افزایش کمی در  $R_T$  دیده می‌شود. با افزایش سرعت مدل و نزدیک شدن به حالت Foil-born و خروج تدریجی بدنه از آب مقداری کاهش در پسای کل دیده می‌شود که ناشی از کاهش سطح خیس شده و



شکل ۵- پارامترهای هندسی بدنه کاتاماران و هیدروفویلها



جدول ۲- تخمین زاویه حمله و اندازه هیدروفویلها در شرایط سرعت طراحی و تصحیح آن با توجه به اثر سطح آزاد آب

نوع آرایش	تخمین ابتدایی طول وتر هیدروفویل جلو	تخمین ابتدایی طول وتر هیدروفویل عقب	تصحیح اندازه هیدروفویل جلو	تصحیح اندازه هیدروفویل عقب
پشت سرهم	۳/۲ cm	۱/۸ Cm	۴/۸ cm	۲/۸ cm
زاویه حمله	۴°	۴°	۵°	۳°
تک فویل	۳/۲ cm	_____	۴/۸ cm	_____
	۴°		۵°	

جدول ۳- مشخصه‌های اصلی مدل کاتاماران آزمایش شده

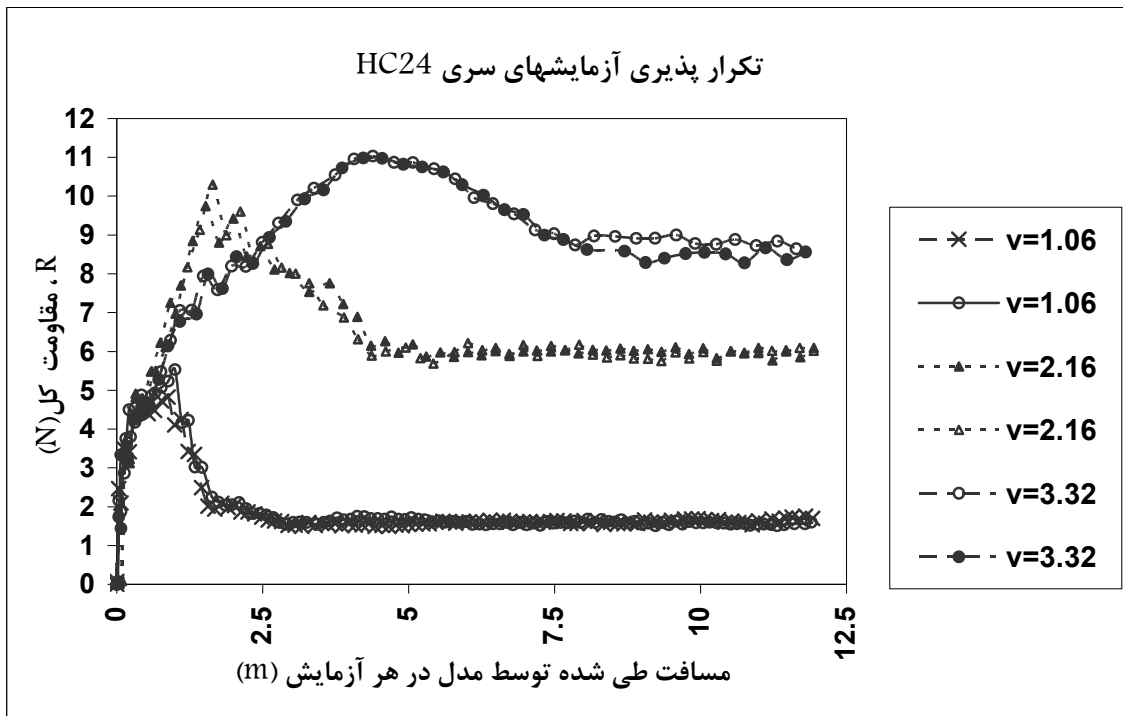
$\Delta$ (kg)	$L_W$ (m)	$B_{max}$ (m)	$B_t$ (m)
۳/۴۱	۰/۷۳	۰/۲۸	۰/۱۰



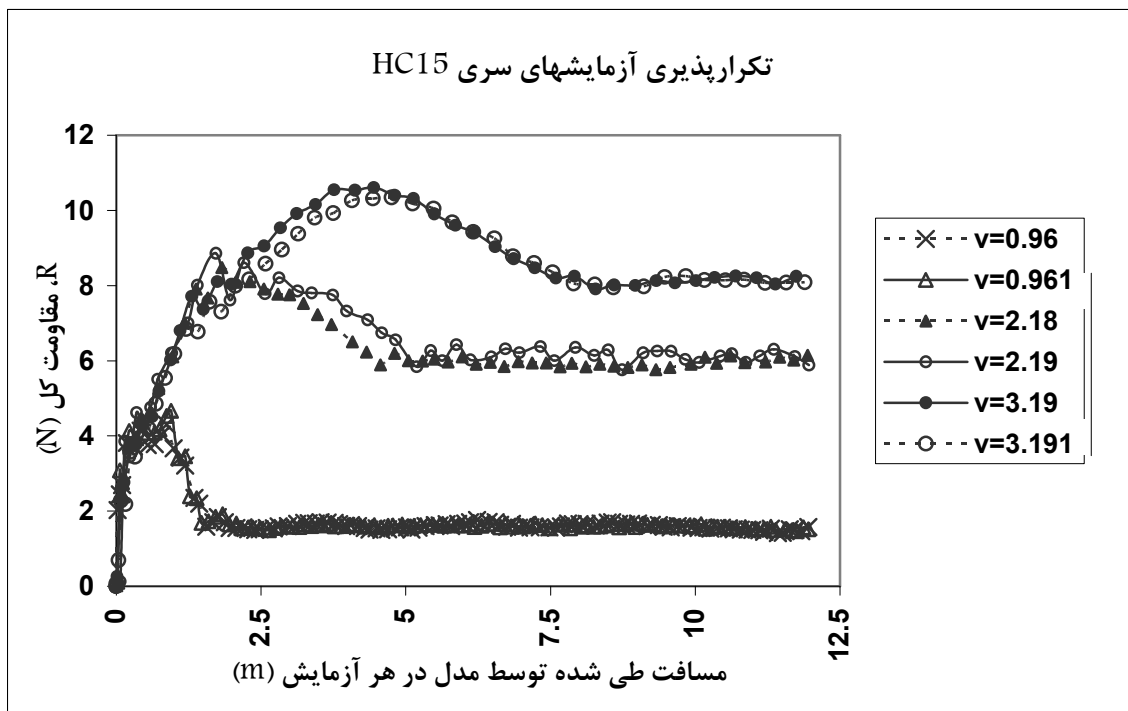
شکل ۶- مدل هیسوکت با آرایش پشت سرهم



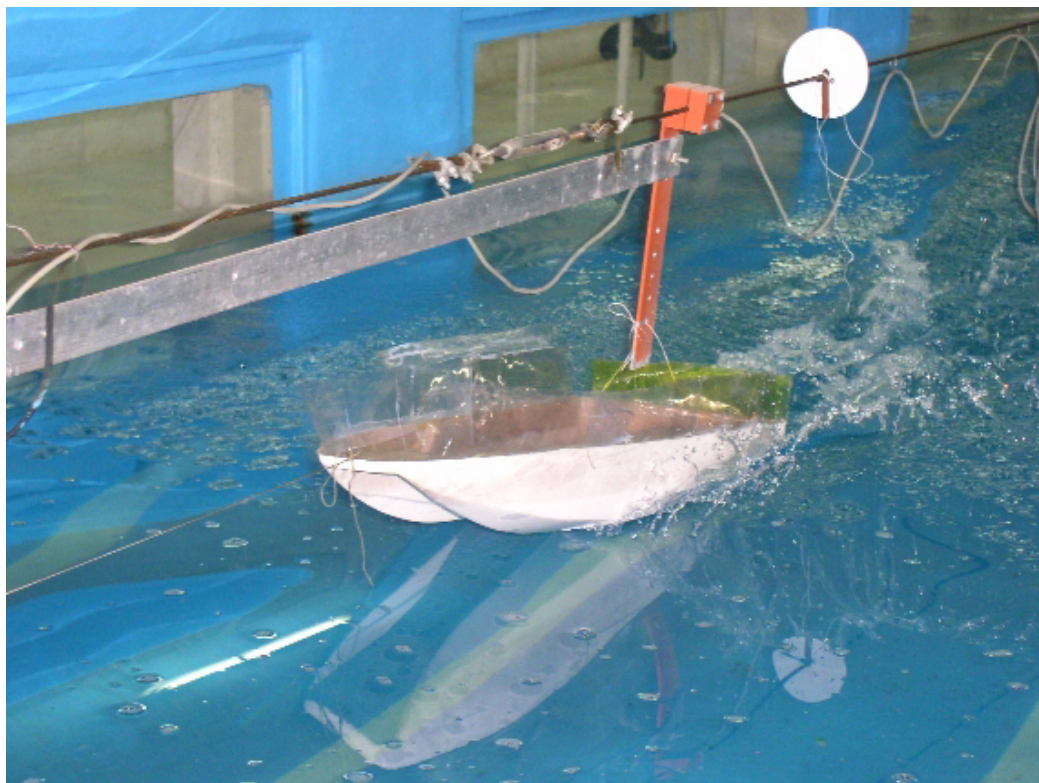
شکل ۷- مدل هیسوکت با آرایش تک هیدروفویلی



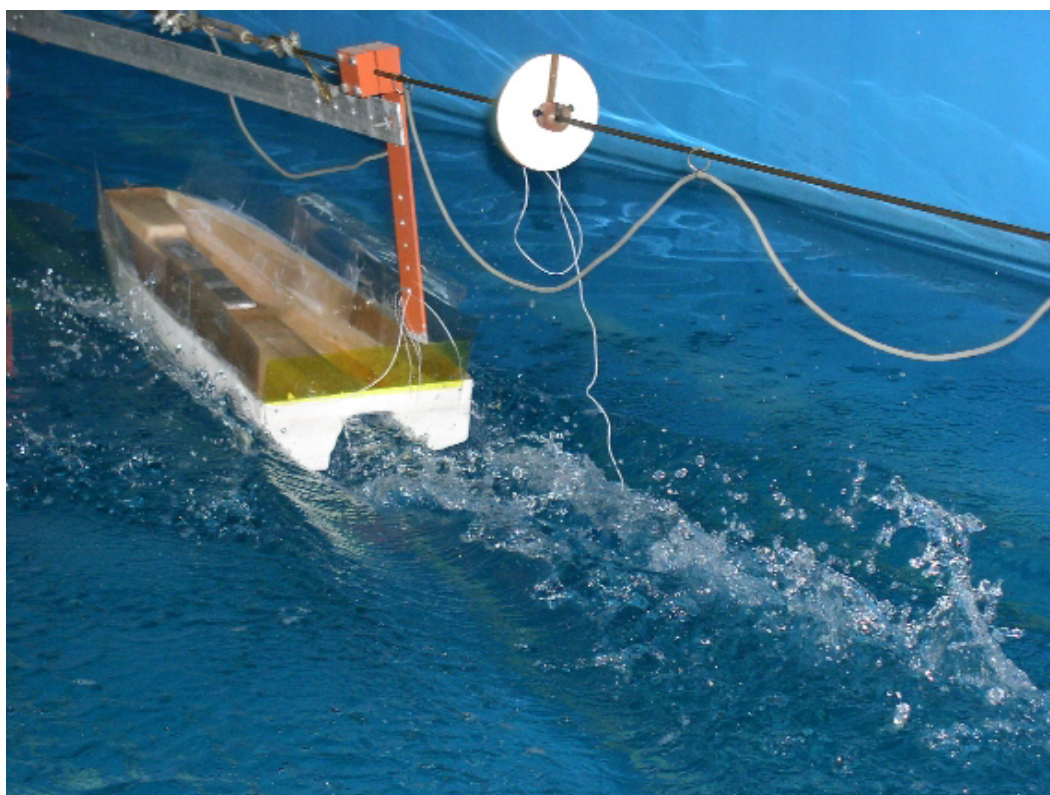
شکل ۸- نمونه داده‌های ثبت شده از آزمایش مدل هیسوکت با آرایش پشت سرهم، مربوط به نیروی مقاومت کل برحسب مسافت آزمایش، در سرعت‌های مختلف برای نمایش تکرارپذیری آزمایشها



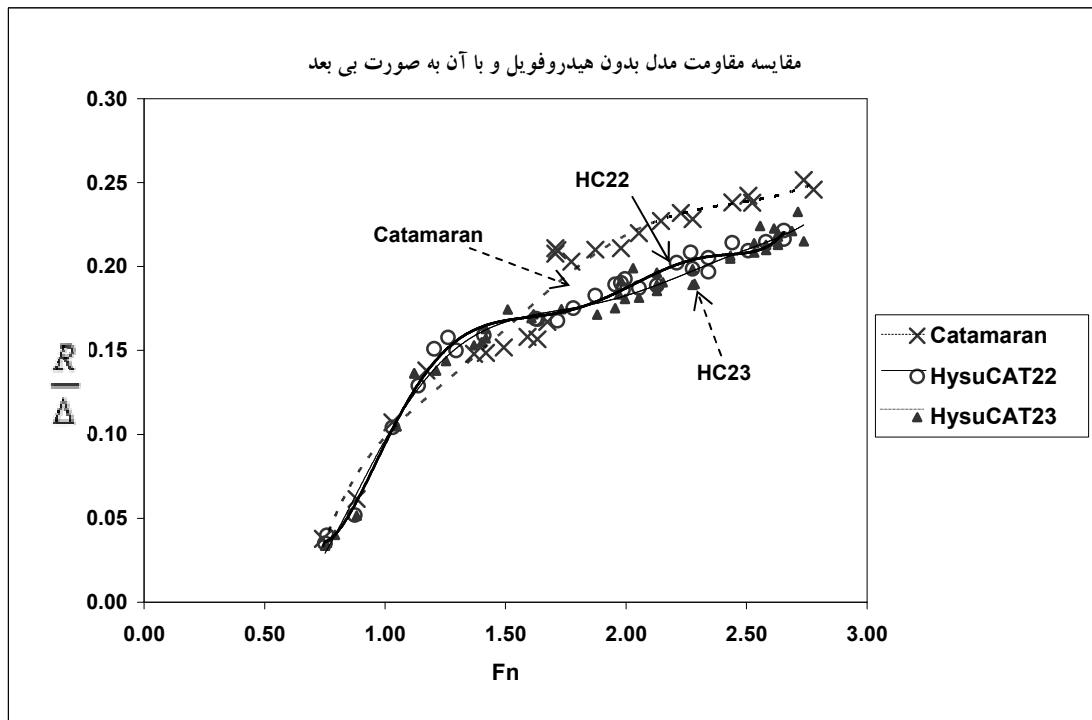
شکل ۹- نمونه داده‌های ثبت شده از آزمایش مدل هیسوکت با آرایش تک هیدروفوبیلی، مربوط به نیروی مقاومت کل برحسب مسافت آزمایش، در سرعت‌های مختلف برای نمایش تکرارپذیری آزمایشها



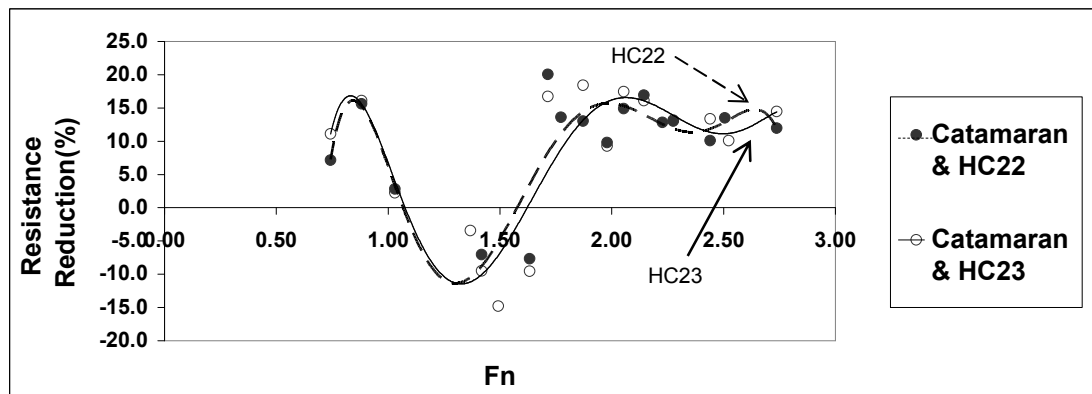
شکل ۱۰- مدل هیسوکت در حال آزمایش با سرعت  $3,2 \text{ m/s}$



شکل ۱۱- مدل هیسوکت در حال آزمایش با سرعت حدود  $3,0 \text{ m/s}$



شکل ۱۲- مقایسه نتایج آزمایش مدل با هیدروفویل و بدون هیدروفویل برای آرایش پشت سرهم



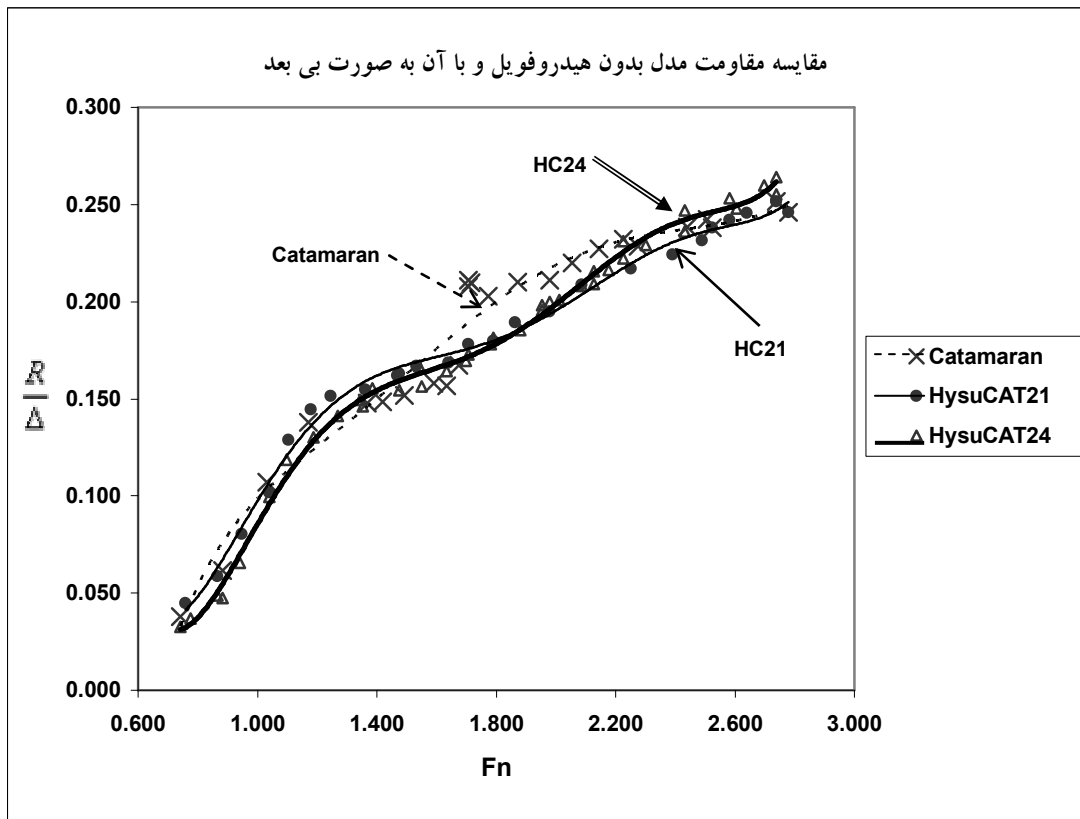
شکل ۱۳- مقایسه درصد کاهش نیروی مقاومت برای آرایش پشت سرهم

در حالت آرایش تک هیدروفویل هم رفتاری مشابه دیده می‌شود که ناشی از جانمایی نامناسب هیدروفویل نسبت به موقعیت طولی مرکز ثقل (LCG) است، شکل (۱۶) و (۱۷).

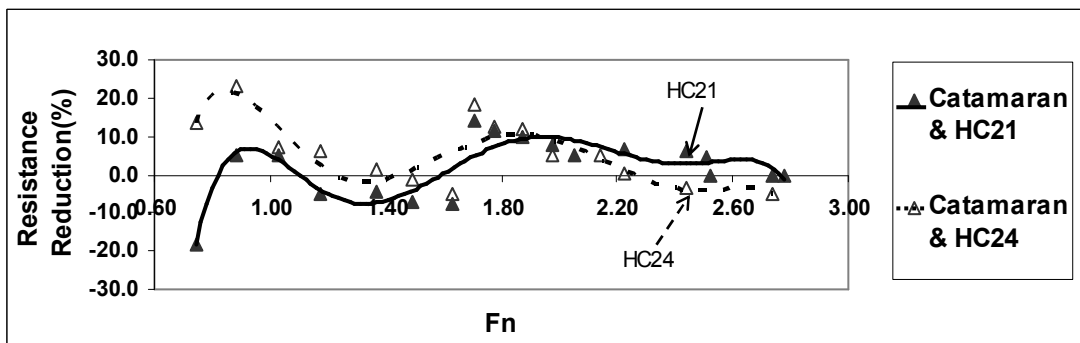
#### ۶- کارهای مشابه

از آنجا که هنوز در ایران نمونه واقعی شناورهای هیسوکت ساخته نشده است و کار مشابهی نیز به صورت آزمایشگاهی

همچنین حجم درون آب شناور است که تأثیر مستقیم بر مقاومت موج‌ساز دارد. یعنی کاهش پسای اصطکاکی و موج‌ساز از افزایش نیروی مقاومت به دلیل وجود هیدروفویل بیشتر شده است. در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) با تغییر موقعیت هیدروفویلها ملاحظه می‌شود که پس از مقداری کاهش در نیروی مقاومت هیدرودینامیکی، دوباره افزایش در مقدار نیرو رخ می‌دهد که ناشی از جانمایی نامناسب هیدروفویل نسبت به مرکز ثقل است.



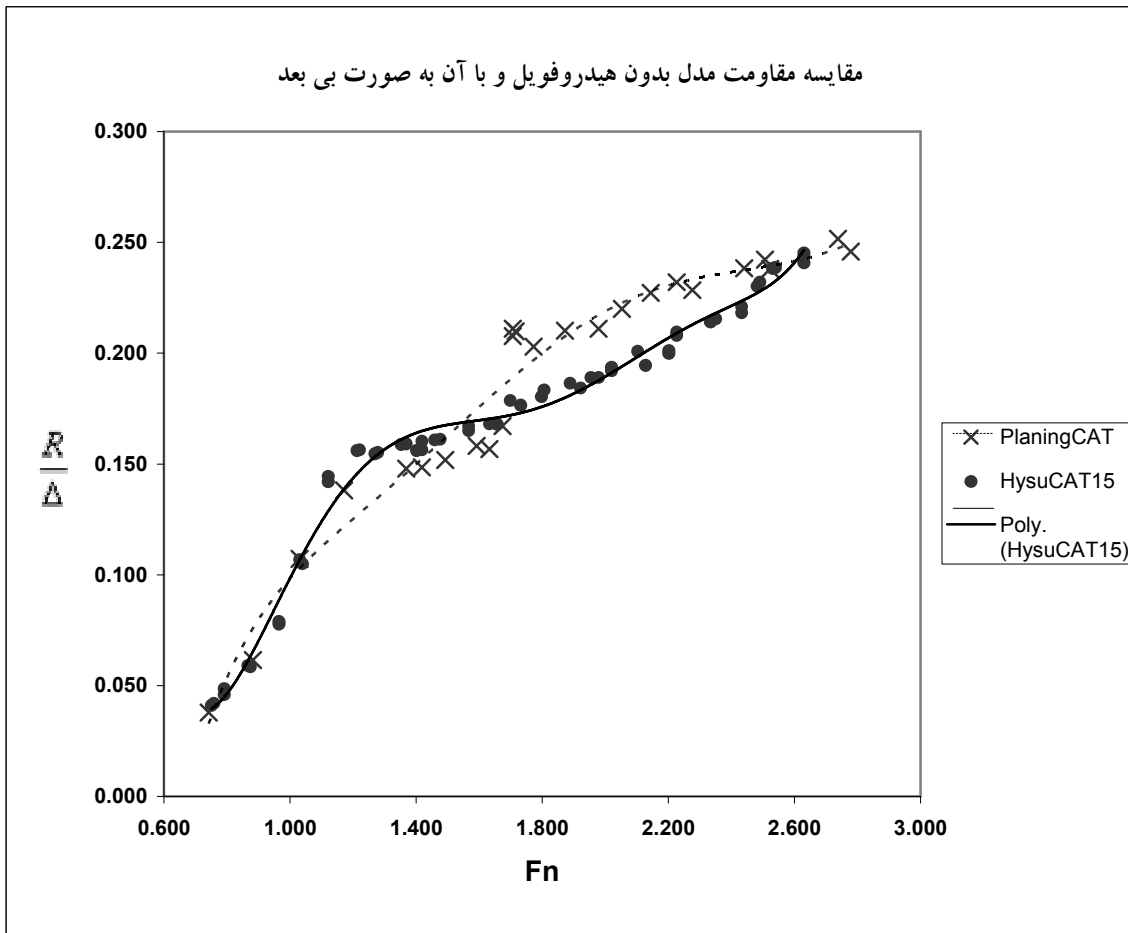
شکل ۱۴- مقایسه نتایج آزمایش مدل با هیدروفویل و بدون هیدروفویل برای آرایش پشت سرهم در حالت نامناسب



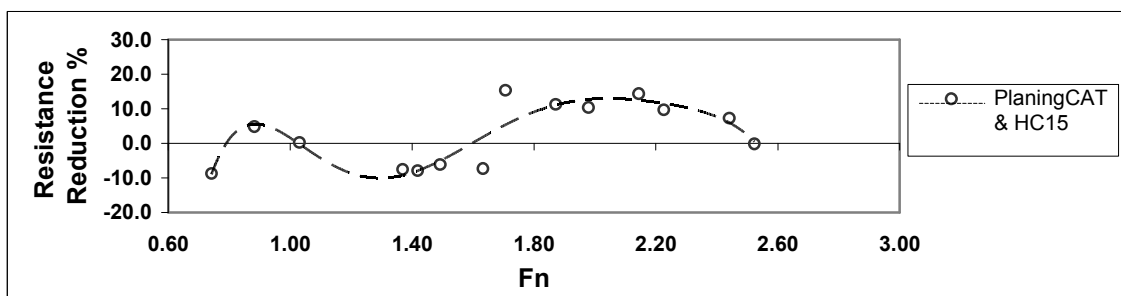
شکل ۱۵- مقایسه درصد کاهش نیروی مقاومت برای آرایش پشت سرهم در حالت نامناسب

در [۸] نسبت طول به عرض تک بدنه مدل آورده شده است، که به کمک نمودار ارائه شده در همانجا، نتایج برای مدلی با نسبت ابعاد نزدیک به مدل آزمایش شده درون یابی شده است (نسبت طول به عرض مدل مرجع [۸] برابر ۹ و این نسبت برای مدل آزمایش شده حدود ۸/۱ است). همان گونه که در نمودار شکل (۱۸) ملاحظه می شود، در مدل دارای یک هیدروفویل، نسبت به مدل اصلی نیروی مقاوم

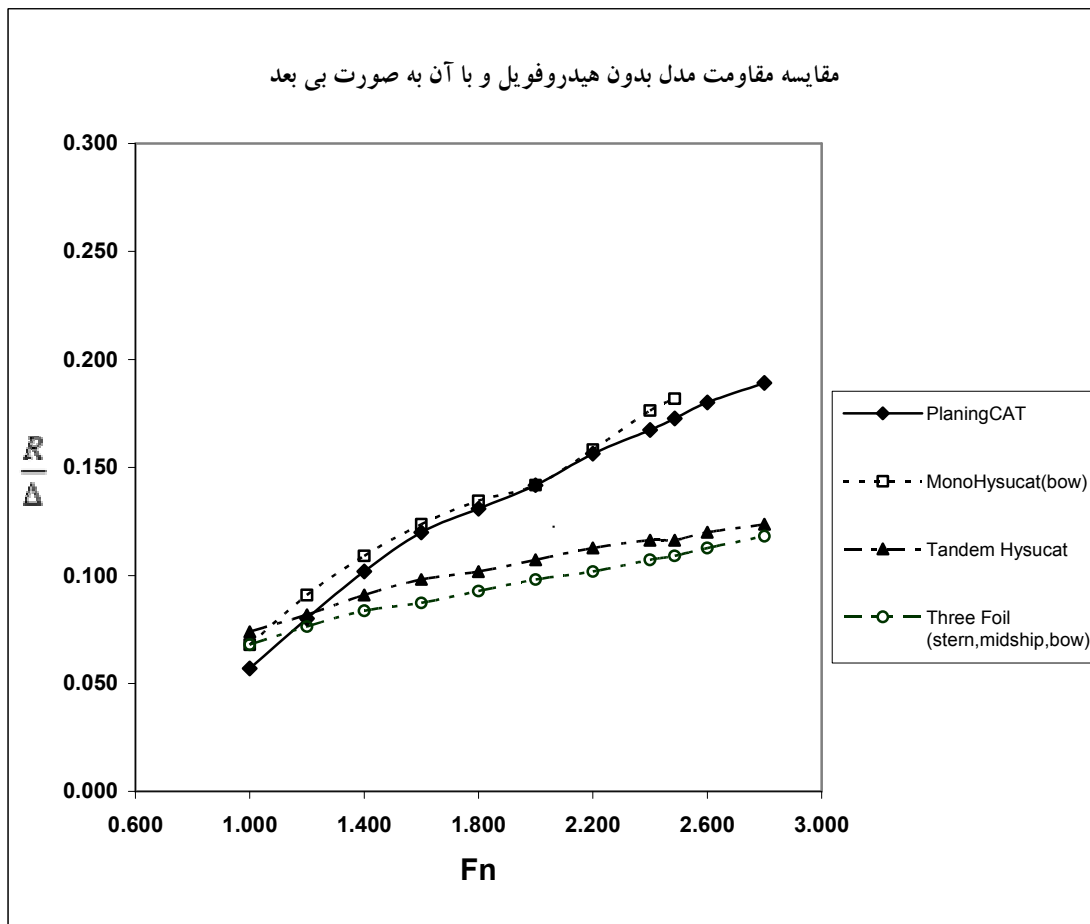
انجام نشده، نتایج به دست آمده با نتایج آزمایش مدل ارائه شده در مراجع [۳] و [۸] مقایسه شده است. آزمایشها برای دو مدل کاتاماران پروازی صورت گرفته که نتایج مدل ارائه شده در [۳] برای کاتاماران دارای یک، دو و سه هیدروفویل، شکل‌های (۱۸) و (۱۹) و قسمتی از نتایج ارائه شده در [۸] برای کاتاماران دارای یک و دو هیدروفویل، شکل‌های (۲۰) تا (۲۳) بوده است. البته ابعاد اصلی و خطوط بدنه مدل، در [۳] آورده نشده، ولی



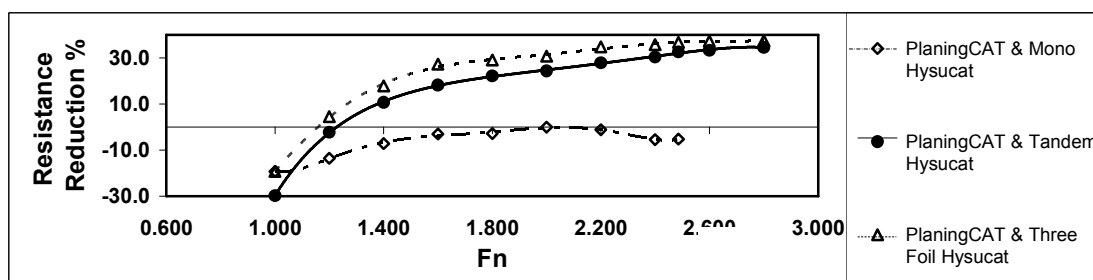
شکل ۱۶- مقایسه نتایج آزمایش مدل با هیدروفویل و بدون هیدروفویل برای آرایش تک هیدروفویل



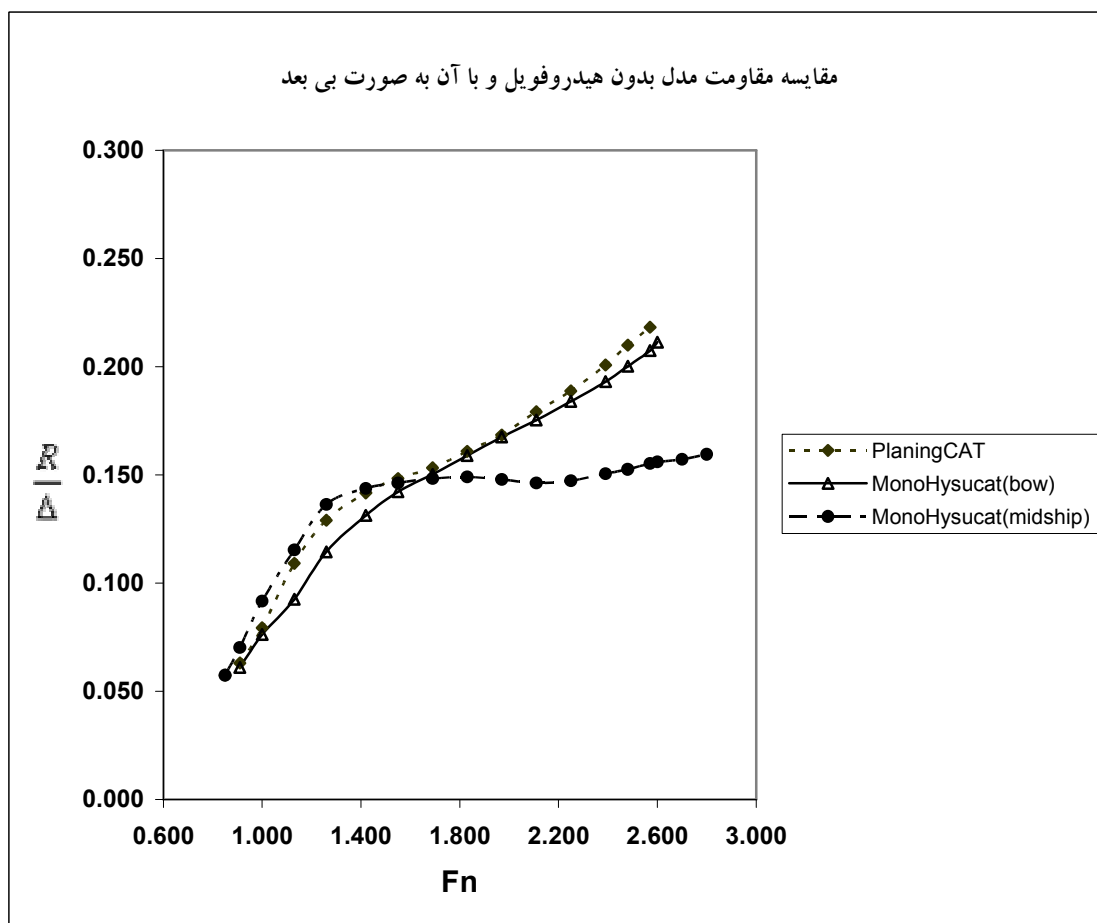
شکل ۱۷- مقایسه درصد کاهش نیروی مقاومت برای آرایش تک هیدروفویل



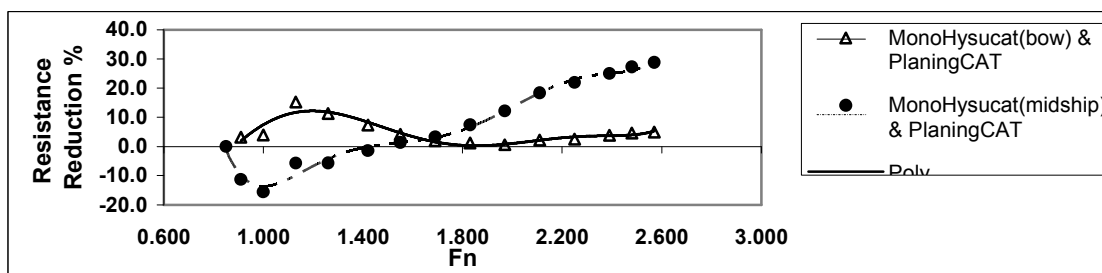
شکل ۱۸- مقایسه نتایج آزمایش مدل بدون هیدروفویل و با هیدروفویل برای آرایشهای تک، دو (Tandem) و سه عددی [۳]



شکل ۱۹- مقایسه درصد کاهش نیروی مقاومت برای آرایش تک، دو (Tandem) و سه هیدروفویلی [۳]

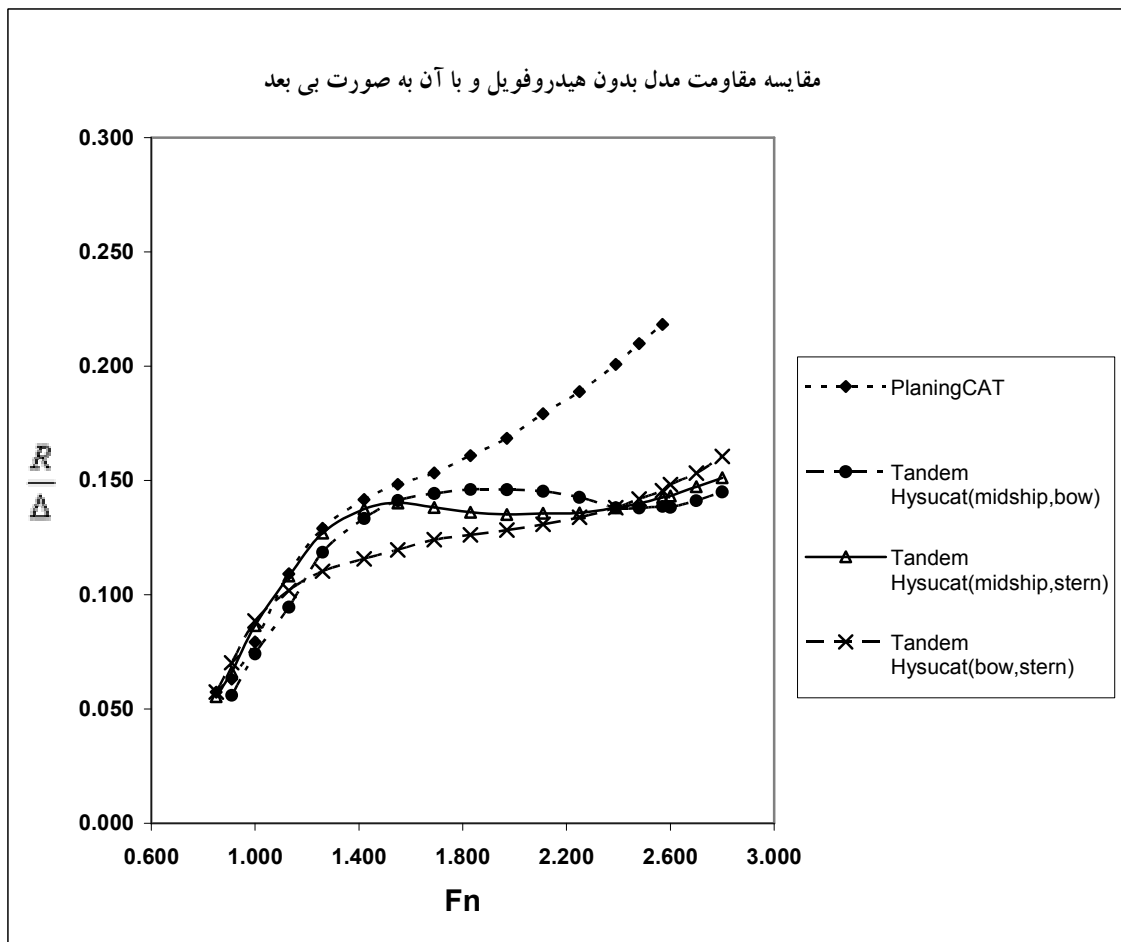


شکل ۲۰- مقایسه نتایج آزمایش مدل بدون هیدروفویل و با هیدروفویل برای آرایشهای تک هیدروفویلی؛ هیدروفویلها در دو محل، جلو و میانه مدل قرار داده شده‌اند [۸]

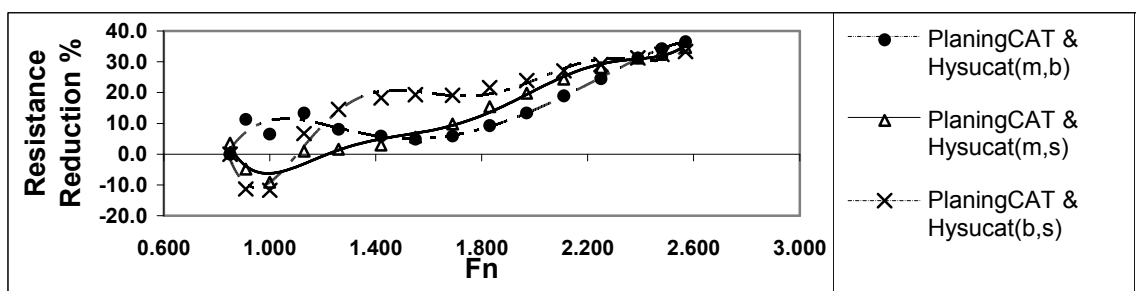


شکل ۲۱- مقایسه درصد کاهش نیروی مقاومت برای آرایشهای تک هیدروفویلی [۸]





شکل ۲۲- مقایسه نتایج آزمایش مدل بدون هیدروفویل و با هیدروفویل برای آرایشهای دو هیدروفویلی؛ هیدروفویلها با سه جانمایی مختلف میانه- جلو، انتها- میانه، انتها- جلو استفاده شده‌اند [۸]



شکل ۲۳- مقایسه درصد کاهش نیروی مقاومت برای آرایشهای دو هیدروفویلی [۸]

حالت کلی مزایای استفاده از هیدروفویل را می‌توان به صورت خلاصه در زیر ذکر کرد:

- افزایش سرعت بدون نیاز به افزایش قدرت موتور
- کاهش مصرف سوخت در صورت ثابت نگه داشتن سرعت طراحی

- افزایش شعاع عملیاتی  
البته کاهش مقاومت هیدرودینامیکی همان گونه که ملاحظه شد، بستگی مستقیم به سرعت کارکرد شناور و جانمایی هیدروفویلها دارد. به عبارت دیگر در صورت تعیین موقعیت نامناسب هیدروفویلها ممکن است حتی افزایش مقاومت شناور نیز رخ دهد.

### قدردانی

تهیه کنندگان مقاله از تمامی همکارانی که در انجام آزمایشها و تدوین مقاله همکاری داشته‌اند تشکر خود را ابراز می‌دارند. به ویژه از مهندسان محترم جعفریان، فاضل، قلی پور، مارامایی، خادمی، جهانبخش و توکلی که در ساخت، تهیه نقشه خطوط بدنه، ویرایش عکسها و ساخت مدل کاتاماران و هیدروفویلها، همکاری داشته‌اند قدردانی می‌شود.

هیدرودینامیکی افزایش یافته است، که احتمالاً به دلیل جانمایی نامناسب آن یعنی قرار دادن هیدروفویل نزدیک جلو<sup>۱۱</sup> بوده است.

### ۷- نتیجه گیری

همان گونه در نتایج ارائه شده در بخشهای ۵ و ۶ ملاحظه می‌شود پس از رسیدن شناور به سرعت hump یعنی سرعتی که مولفه موج‌ساز مقاومت هیدرودینامیکی به بیشترین مقدار خود رسیده، کاهش موثر در مقاومت هیدرودینامیکی شروع شده است که به دلیل افزایش نیروی برای هیدروفویل، با به عبارت درستتر افزایش نسبت نیروی برا به پسای آن، یعنی بالارفتن بازده هیدرودینامیکی هیدروفویل‌ها و در نتیجه بازده هیدرودینامیکی کل شناور است، شکل‌های (۱۲ و ۱۳) و (۱۸ تا ۲۳). البته در حالاتی که زاویه حمله هیدروفویل زیاد بوده یا جانمایی نامناسبی استفاده شده است، بازده هیدرودینامیکی کاهش یافته یا به صورت نوسانی تغییر کرده، یعنی گاهی کاهش و گاهی افزایش یافته است، شکل‌های (۱۴) تا (۲۱).  
با توجه به آزمایشهای صورت گرفته ملاحظه می‌شود که به‌کارگیری مناسب هیدروفویل در کاتاماران موجب بهبود بازده آن می‌شود. به عبارت دیگر نسبت نیروی مقاومت هیدرودینامیکی کل به نیروی وزن شناور کاهش می‌یابد. در

### واژه‌نامه

1. Hybrid
2. Hysucat
3. Tandem
4. Canard
5. Trim
6. Hoppe
7. Van Walree
8. Takeoff
9. Trailing Vortex
10. Towing Tank
11. bow

### مراجع

1. Hoppe K.G., "Optimization of Hydrofoil-Supported Planing Catamarans," University of Stellenbosch, Department of Mechanical Engineering, FAST'95.
2. Hoppe, K. G., "Benefits of Hydrofoil Assistance," University Stellenbosch 1993,
3. Migeotte, G., and Hoppe K. G., "Developments in Hydrofoil Assistance for Semi-Displacement Catamarans," University of Stellenbosch, Division of <http://www.sun.ac.za/kie/unistel/technologies/foiltech.htm>

- Fluid Mechanics, Department of Mechanical Engineering, 1999.
4. Hoppe, K. G., "Recent Applications of Hydrofoil-Supported-Catamarans," <http://www.hydrofoildesign.com/media/Publications/Publication1/publication1Web.htm> , 2001.
  5. Hoppe, K. G., "The Hysucat Development," University of Stellenbosch, Dep. of Mechanical Engineering, Report 1989.
  6. Walree, Van, F. "Computational Methods for Hydrofoil Craft in Steady and Unsteady Flow," Technische Universiteit Delft, Ph.D. Thesis, 1999.
  7. Rawson K. J. and Tupper, E. C., *Basic Ship Theory*, 3rd Edition, Volume2, 1983.
  8. Aframeev, E. A., "Seaworthy, High-Speed, Small-Displacement Craft for the Coastal Fleet," Krylor Shipbuilding Research Institute, St Petersburg, Russia, 1994.
  9. White, Frank, M., "*Fluid Mechanics*," New York, McGraw-Hill, 1979.
  10. Faltinson, O.M., "Sea Loads on High Speed Marine Vehicles," Faculty of Marine Technology – NTNU – Norway, 2000.