

تعیین ضریب اصلاح اثرات مقیاس در آزمایش مقاومت مدل شناور

مجید کریمی‌راد (دانشجوی کارشناسی ارشد)
مهدی عسکری (دانشجوی کارشناسی ارشد)
محمدسعید سیف (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

در حوضچه‌های کشتش^۱ کوچک به دلیل محدودیت ابعادی حوضچه و به تبع آن مدل، آزمایش‌ها بیشتر در اعداد رینولدز پایین و رژیم جریان آرام^۲ انجام می‌شود. در چنین شرایطی گشتاور جریان کم، و احتمال وقوع جدایش در جریان زیاد است. همین مسئله باعث تفاوت بیشتر رفتار جریان اطراف مدل با کشتی واقعی و افزایش اثر مقیاس^۳ می‌شود. برای تصحیح نتایج در تمامی حوضچه‌های کشتش از ضریب اصلاح اثر مقیاس استفاده می‌شود.

نوشتار حاضر نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده روی مدل یک شناور فرآورده‌بر^۴ ۳۵۰۰۰ تنی است. آزمایش‌ها بدون مغشوش‌کننده^۵ جریان و با مغشوش‌کننده انجام شده و ضریب اصلاح مقیاس برای این دو حالت به دست آمده است. در حالت اول این ضریب به صورت خطی، و در حالت دوم به صورت غیرخطی نسبت به عدد فرود تغییر کرده است.

فهرست علائم

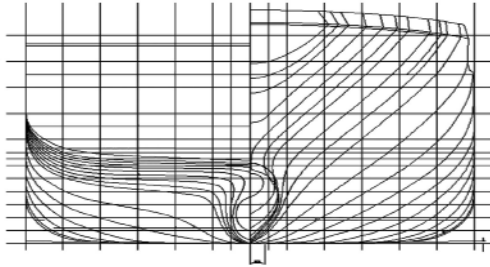
C_w : ضریب مقاومت موج‌سازی
Fn : عدد فرود (سرعت بی‌بعد)
R : نیروی مقاومت هیدرودینامیکی
C_V : ضریب مقاومت ویسکوز کل
S : مساحت خیس شده شناور
CT : ضریب نیروی مقاومت کل
A_{VT} : مساحت عرضی تصویرشده‌ی بالای سطح آب‌خور
L_{WL} : طول صفحه‌ی آب‌خور
C_{FO} : ضریب مقاومت اصطکاکی صفحه‌دوبعدی
S_{BK} : مساحت سطح بیلج کیل
ρ : چگالی آب
V : سرعت حرکت
C_T : ضریب نیروی مقاومت باقی‌مانده
Re : عدد رینولدز
R_F : نیروی مقاومت اصطکاکی
C_{AA} : ضریب مقاومت هوا

مطمئن‌ترین راه تخمین مقاومت شناور مطرح است. با این حال، این روش نیز پیچیدگی‌های خاص خود را دارد؛ مثلاً عدم برقراری تشابه کامل دینامیکی بین مدل و نمونه‌ی اصلی سبب بروز خطا در تخمین مقاومت هیدرودینامیکی شناور می‌شود. پدیده‌هایی مانند اثر دیواره‌ها^۶ اثر مقیاس و رفتارها و اثرات موضعی هیدرودینامیکی نیز بر دقت نتایج آزمایش تأثیرگذارند^[۱]، که این عدم تشابه در حوضچه‌های کوچک مشهودتر است.^[۲] با توجه به ابعاد مدل در حوضچه‌های کوچک، اختلاف شدیدی میان عدد رینولدز شناور اصلی و مدل ایجاد می‌شود که این مسئله به معنی اختلاف میان جریان اطراف مدل و شناور است. به منظور از بین بردن خطا در بسط نتایج از مدل به شناور باید از مغشوش‌کننده‌ی جریان استفاده کنیم.^[۳]

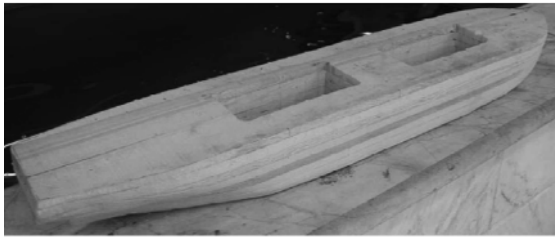
مولند در سال ۱۹۹۶ از تعدادی میخ با قطر ۳/۲ میلی‌متر برای مغشوش‌سازی جریان استفاده کرد.^[۴] همچنین ون والر و یاماگوچی در سال ۱۹۹۳ تحقیقات گسترده‌ی پیرامون اثرات استفاده از مغشوش‌کننده‌ی جریان بر آزمایش‌ها و مقاومت هیدروفویل انجام داده‌اند.^[۵] به علاوه، در سال ۱۹۷۴ تحقیقات اولیه‌ی پیرامون اندازه‌ی مغشوش‌کننده‌ی سیمی و در سال ۱۹۷۵ تحقیقاتی در خصوص نوار مغشوش‌کننده انجام شده است.^[۳]

در حوضچه‌های صنعتی با توجه به اطلاعات حاصل از کشتی‌های ساخته شده، ضرایب تصحیح خطاهای آزمایش قابل دست‌یابی‌اند. در نوشتار حاضر با استفاده از نتایج آزمون کشتش مدل در حوضچه‌ی SSPA سوئد و مبنای قرار دادن نتایج حاصله از این آزمایش‌ها، و نیز

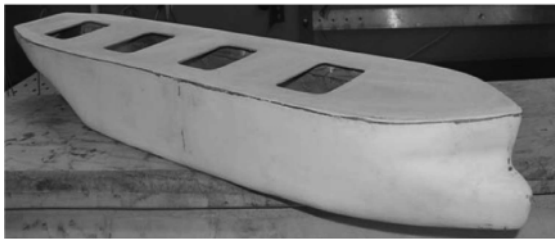
۱. مقدمه
به‌رغم گذشت چندین دهه از ابداع و گسترش روش‌های عددی در تخمین مقاومت هیدرودینامیکی شناورها، آزمایش مدل کماکان به‌عنوان



شکل ۱. نمودار خطوط بدنه‌ی شناور فرآورده‌بر مشابه.



شکل ۲. مدل چوبی ساخته شده پس از پرداخت نهایی.



شکل ۳. مدل فایبرگلاس ساخته شده از روی مدل چوبی.

۴. آزمایش مدل

حوضچه‌ی کشش در آزمایشگاه مهندسی دریای دانشگاه صنعتی شریف دارای ابعاد $23.5 \times 2.5 \times 1.2$ متر است. آب درون حوض آب معمولی با چگالی حدود 1000 kg/m^3 ، و سیستم کشش از نوع کابل و قرقره^{۱۱}، و سرعت پیشینه‌ی کشش 3.2 m/s است. طول جابه‌جایی مدل برحسب زمان در نرم‌افزار دستگاه ثبت می‌شود و نمودار نیرو برحسب موقعیت در سرعت‌های کشش مختلف رسم می‌شود. مدل نیز تقریباً در محدوده‌ی سرعت 0.35 m/s تا 0.65 m/s آزمایش شده است.

بهبتر است هنگام آزمایش سعی شود تا از بروز اثر دیواره‌ها و کف اجتناب شود.^[۶] برای این منظور باید نسبت سطح مقطع میانی مدل به سطح مقطع حوضچه کم‌تر از ۱ درصد باشد که البته به پیشنهاد ITTC بهتر است کم‌تر از 0.4% درصد باشد.^[۵] برای مدل آزمایش شده این نسبت حدود 0.3% درصد است. البته استفاده از مدل کوچک سبب بروز خطای بیشتر به دلیل اثرات مقیاس بیشتر می‌شود.^[۷] در صورت انتخاب مدل بزرگ‌تر، علاوه بر برقراری بهتر تشابه، به دلیل بزرگ‌تر شدن

مقایسه‌ی نتایج آزمون مدل در حوضچه‌ی آزمایشگاه مهندسی دریای دانشگاه صنعتی شریف ضرایب اصلاح مقاومت حوضچه‌ی دانشگاه شریف به دست آمده است. در قسمت‌های بعد به تشریح روش ساخت مدل، آزمون کشش در حوضچه و روش‌های محاسبه‌ی مقاومت پرداخته شده، و سپس با مقایسه‌ی نتایج حاصله و اطلاعات موجود از SSPA روش‌هایی برای اصلاح و بهبود نتایج ارائه شده است.

۲. مشخصات شناور

مدل آزمایش شده مربوط به شناوری جابه‌جایی^۷ از نوع فرآورده‌بر به طول ۱ متر و با مقیاس ۱۷۶ است که مشخصات شناور اصلی^۸ در جدول ۱ ارائه شده است.

۳. ساخت مدل

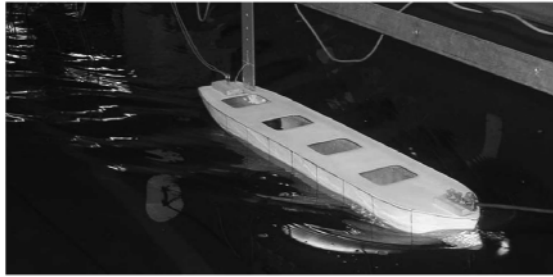
با توجه به متفاوت بودن مواد به‌کار رفته در ساخت مدل و شناور اصلی، برقراری تشابه هندسی کامل بین مدل و شناور اصلی امکان‌پذیر نیست. مواد قابل استفاده برای ساخت مدل عبارت‌اند از چوب، فایبرگلاس، فوم، یونولیت و مواد بسیاری مانند پلی‌یورتان، که در این میان استفاده از چوب به دلیل سادگی کار با آن برای ساخت نمونه‌ی اولیه انتخاب شده است. با توجه به پیچیدگی‌های شکل بدنه‌ی شناور مذکور، به‌ویژه در دو انتهای شناور، برای راحتی ساخت مدل، نقشه‌ی بدنه در فاصله‌ی کف شناور تا خط آب‌خور طراحی به پنج قسمت مساوی تقسیم شده است. به دلیل مسائل تجاری و امنیتی امکان ارائه‌ی خطوط بدنه‌ی اصلی وجود ندارد، و از این رو خطوط بدنه‌ی شناوری مشابه در شکل ۱ آورده شده است.

سپس نقشه‌های صفحات آب‌خور در فواصل یاد شده به دست آمده و بر روی لایه‌های چوب به ضخامت ۱ سانتی‌متر رسم و برش داده شده است. صفحات برش‌خورده‌ی چوب را روی هم چسبانده، سنباده‌کاری و پرداخت نهایی می‌شود (شکل ۲).

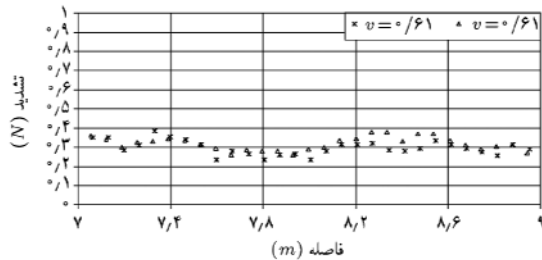
با توجه به امکان نفوذ آب به داخل مدل چوبی، مدل فایبرگلاس از روی مدل چوبی تهیه شده (شکل ۳) و آزمایش‌های اصلی روی این مدل انجام شده است.

جدول ۱. مشخصات شناور فرآورده‌بر ۳۵۰۰ تنی.

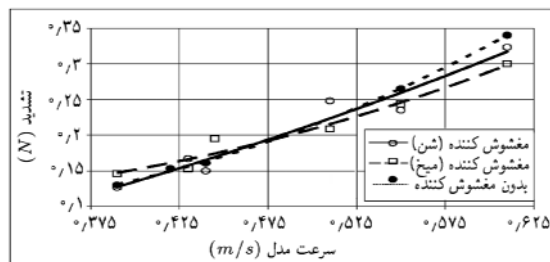
طول	۱۷۶m
عرض	۳۱m
آب‌خور	۹m
ضریب ظرافت ^۹ بدنه	0.18025
سطح خیس شده	$7119m^2$
مساحت بیابج کیل ^{۱۰}	$64.3m^2$
مساحت عرضی تصویر شده بالای خط آب‌خور	$552.2m^2$



شکل ۵. کشش مدل در حوضچه با سرعت 0.61 m/s .



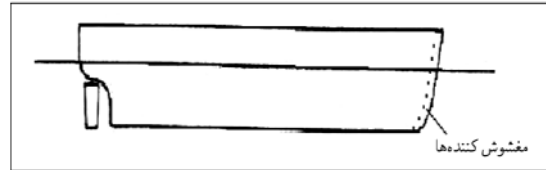
شکل ۶. نتایج آزمون کشش مدل در سرعت 0.61 m/s .



شکل ۷. مقایسه‌ی مقاومت مدل.

این کاربرد براساس پیشنهاد ITTC نبوده بلکه در بررسی‌های اولیه مورد استفاده واقع شده است و نتایج آن در تخمین مقاومت هیدرودینامیکی شناور کاربرد زیادی نداشته است. از میخ کوچک به‌عنوان مغشوش‌کننده، طبق پیشنهاد ITTC استفاده شده که نتایج آن نوسانات کم‌تری دارد.

نوسانات مشاهده شده هنگام استفاده از میخ کوچک مربوط به زمانی است که اعداد رینولدز آن کم‌تر از اعداد رینولدز بحرانی (سرعت 0.475 m/s) است که علت این نوسانات، قوی‌تر بودن اثر اغتشاشات وارده نسبت به اثر لزجت سیال است؛ در حالی که از مغشوش‌کننده استفاده نشده نوسان قابل توجهی در نمودار مقاومت مدل مشاهده نمی‌شود. مقدار مقاومت هیدرودینامیکی در حالت بدون مغشوش‌کننده برای اعداد رینولدز کم‌تر از اعداد رینولدز بحرانی از حالت مغشوش‌کننده میخ کوچک است و در اعداد رینولدز بالا بیشتر است، زیرا با استفاده از مغشوش‌کننده جدایش در جریان به تعویق می‌افتد.



شکل ۴. محل نصب مغشوش‌کننده‌ی جریان [۷].

نیروهای اندازه‌گیری شده توسط حسگرها دقت اندازه‌گیری نیروها نیز بالاتر می‌رود. با بزرگ‌تر شدن ابعاد به دلیل بروز اثر دیواره‌ها و کف خطای تخمین نیروهای هیدرودینامیکی نیز افزایش می‌یابد. [۸]

چنان‌که مشخص است جریان اطراف شناور اصلی کاملاً مغشوش است چراکه عدد رینولدز آن در سرعت ۱۶ گره حدود $10^9 \times 1/17$ است؛ مقدار عدد رینولدز مدل بسیار بالاتر از عدد رینولدز بحرانی است. لذا برای ایجاد تشابه جریان در اطراف مدل و در اطراف شناور اصلی، باید جریان اطراف مدل مغشوش شود. [۹] راه حل پیشنهادی این است که علاوه بر بیشتر بودن عدد رینولدز مدل، از عدد رینولدز بحرانی — با انتخاب طول مدل بزرگ‌تر — از مغشوش‌کننده‌های جریان استفاده شود. یکی از روش‌های پیشنهادی ITTC برای ایجاد اغتشاش استفاده از یک میخ کوچک در جلوی شناور و در فاصله‌ی حدود ۵ درصد طول مدل از جلو شناور است (شکل ۴). [۱۰]

۵. بررسی نتایج آزمایش

در این بخش نتایج مربوط به آزمایش‌های کشش مدل برای هر یک از حالت‌های مدل بدون اغتشاش‌ساز و مدل با استفاده از اغتشاش‌ساز ارائه می‌شود. باید یادآور شویم که نتایج حاصل از آزمایش کشش مدل در حوضچه‌ی کشش در سرعت‌های مناسب چندین بار برای هر سرعت تکرار شده است. در شکل ۵ تصویری از آزمایش کشش مدل در حوضچه‌ی دانشگاه صنعتی شریف مشاهده می‌شود.

برای بررسی دقت کارکرد دستگاه و سیستم اندازه‌گیری، تکرارپذیری آزمایش ارزیابی شده است، که نتایج مربوط به چند آزمایش با سرعت مساوی در شکل ۶ قابل مشاهده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود تکرارپذیری نتایج قابل قبول است.

با انجام آزمایش در سرعت‌های مختلف منحنی مقاومت مدل شناور برحسب سرعت قابل رسم خواهد بود. در شکل ۷ نتایج حالت‌های بدون مغشوش‌کننده، مغشوش‌کننده‌ی میخ کوچک و مغشوش‌کننده‌ی شن رسم شده است.

چنان‌که در شکل ۷ دیده می‌شود، در صورت استفاده از شن‌ها افزایش بیش اندازه‌ی قطر موجب تغییر شدید رژیم جریان اطراف مدل شده است که باعث ایجاد نوسان‌ها و رفتار غیر قابل پیش‌بینی در نمودار مقاومت هیدرودینامیکی، برحسب سرعت می‌شود. البته

۶. تخمین مقاومت کشتی

در راستای تعیین ضریب فرم برای شناورهای معمولی از روش پروهاسکا استفاده می‌شود. [۷] به دلیل نادقیق بودن محاسبه‌ی مقاومت در سرعت‌های پایین، پیشنهاد می‌شود که فقط از نتایج مقاومت مربوط به اعداد فرود در بازه $0.12 - 0.2$ برای تعیین ضریب فرم استفاده شود. [۱۱] بر این اساس برای تعیین اثرات فرم بدنه بر مقاومت گران‌رو، و به عبارتی برای تخمین ضریب فرم سه‌بعدی با استفاده از نتایج دوبعدی، از ضریب K استفاده می‌شود: [۱۲]

$$K = \frac{C_V - C_{FO}}{C_{FO}} \quad (۹)$$

برای محاسبه‌ی C_{FO} از رابطه‌ی ۱۰ استفاده می‌شود: [۱۲]

$$C_{FO} = \frac{0.066}{(\log_{10} R_n - 2.03)^2} \quad (۱۰)$$

واضح است که جریان اطراف کشتی سه‌بعدی است اما با توجه به رژیم جریان و نیز کوچک بودن ضخامت لایه‌ی مرزی تشکیل شده بر روی بدنه نسبت به انحنای بدنه، می‌توان چنین فرض کرد که جریان به صورت محلی دوبعدی بوده و تقریب صفحه صاف نتایج اولیه‌ی مناسبی در بر خواهد داشت. سپس با استفاده از آزمایش مدل، اثرات سه‌بعدی بودن جریان اطراف شناور با معرفی ضریب فرم و تعیین آن در نظر گرفته می‌شود. [۳]

هنگامی که هیچ جدایشی رخ ندهد می‌توان ضریب مقاومت کل را چنین تعریف کرد: [۱۲]

$$C_T = C_W + (1 + K)C_{FO} \quad (۱۱)$$

در نتیجه‌ی تقسیم دو طرف رابطه‌ی ۱۱ به C_{FO} ، رابطه‌ی ۱۲ حاصل می‌شود:

$$\frac{C_T}{C_{FO}} = (1 + K) + \frac{\alpha \cdot Fn^2}{C_{FO}} \quad (۱۲)$$

که در آن $C_W = \alpha \cdot Fn^2$ فرض شده است.

با رسم خط فوق ضریب فرم $(1 + K)$ محاسبه می‌شود. $1 + K$ ارتفاع از مبدأ خط و α شیب خط است (شکل ۸). به کمک روش فوق و نتایج آزمایش، نمودار مقاومت کشتی بر حسب سرعت در حالت استفاده از مغشوش‌کننده و نیز بدون استفاده از آن به دست می‌آید. در این محاسبات مقادیر ارائه شده در جدول ۲ برای ضرایب زبری، مقاومت هوا و فرم در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. مقادیر ضرایب زبری، مقاومت هوا و فرم.

C_A	3.65×10^{-4}
C_{AA}	7.757×10^{-5}
K	۰٫۲۲

از آنجا که تشابه همزمان اعداد ریتولدز و فرود در آزمایش مدل کشتی امکان‌پذیر نیست، در تعیین مقاومت کشتی پیچیدگی‌های مختلفی وجود خواهد داشت. در این قسمت برای انجام محاسبات مقاومت شناور از روش ITTC78 استفاده شده است. [۹] براساس این روش ضریب مقاومت کل شناور به صورت رابطه‌ی ۱ نشان داده می‌شود: [۱۲]

$$C_{TS} = (1 + K)C_{FS} + C_R + C_A + C_{AA} \quad (۱)$$

که در آن C_{TS} عبارت است از:

$$C_{TS} = \frac{R_{TS}}{\frac{1}{4} \rho S v^2} \quad (۲)$$

K : ضریب فرم است که از آزمایش مقاومت در حوضچه محاسبه می‌شود.

C_{FS} : ضریب مقاومت اصطکاکی شناور است که از روش ITTC57 به دست می‌آید و عبارت است از: [۱۲]

$$C_{FS} = \frac{0.075}{(\log_{10} R_n - 2)^2} \quad (۳)$$

C_R : ضریب مقاومت باقی‌مانده است که از مقاومت کل و مقاومت اصطکاکی مدل در آزمایش حوضچه‌ی کشش به دست می‌آید.

$$C_R = C_{TM} - (1 + K)C_{FM} \quad (۴)$$

و در آن C_{FM} ضریب مقاومت اصطکاکی مدل است که از روش ITTC57 به دست می‌آید:

$$C_{FM} = \frac{0.075}{(\log_{10} R_n - 2)^2} \quad (۵)$$

C_A : ضریب تصحیح برای اختلاف زبری و شرایط سطح مدل و کشتی واقعی است: [۹]

$$C_A = \left[1.05 \left(\frac{k_s}{L_{WL}} \right)^{\frac{1}{2}} - 0.64 \right] \times 10^{-2} \quad (۶)$$

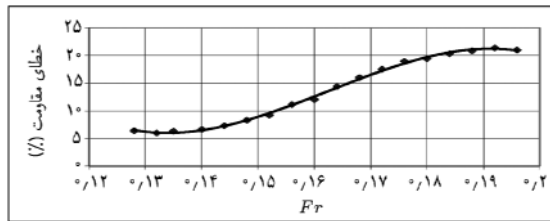
و در آن k_s مقدار متوسط زبری بدنه است که به صورت متوسط $10^{-6} m \times 150$ در نظر گرفته می‌شود.

C_{AA} : ضریب در نظر گرفته شده برای مقاومت ناشی از جریان هوا است که به صورت تقریبی عبارت است از:

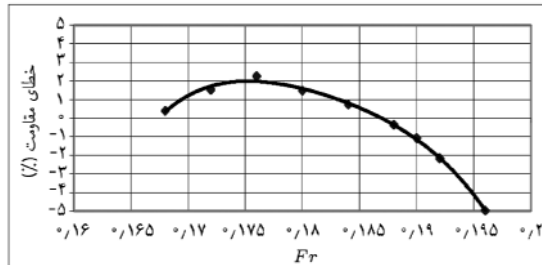
$$C_{AA} = 0.001 \left(\frac{A_{VT}}{S} \right) \quad (۷)$$

اگر شناور دارای بیلیج کیل باشد ضریب مقاومت کل طبق رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود: [۱۱]

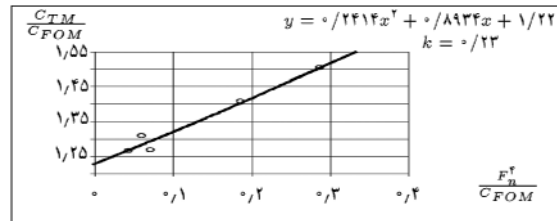
$$C_{TS} = \frac{S + S_{BK}}{S} \left[(1 + K)C_{FS} + C_A \right] + C_R + C_{AA} \quad (۸)$$



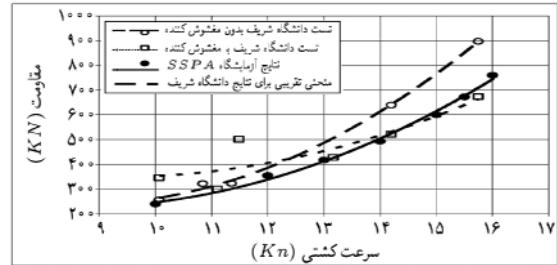
شکل ۱۰. درصد اختلاف مقاومت کل شناور.



شکل ۱۱. درصد اختلاف ضریب مقاومت کل شناور.



شکل ۸. روش پروهاسکا برای تعیین ضریب فرم بدنه.



شکل ۹. مقاومت بدست آمده برای شناور براساس آزمایش‌های مختلف.

آزمایشگاه‌ها ضریب اصلاح مقاومت مربوط به حوضچه‌ی خود را براساس شرایط و نوع شناورها، و نیز مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده با وضعیت کشتی واقعی مشخص می‌کنند. از آنجا که برای حوضچه‌ی کشتی آزمایشگاه دریا در دانشگاه شریف تاکنون چنین کاری انجام نشده است، در این تحقیق با توجه به وجود نتایج دقیق آزمایش مدل در حوضچه SSPA سوئد و نتایج به‌دست آمده در حوضچه‌ی دانشگاه شریف سعی می‌شود این ضریب اصلاح به‌دست آید. اختلاف مقاومت کل شناور برای حالت‌های استفاده از مغشوش‌کننده‌ی جریان و عدم استفاده از آن و مقاومت کل حاصله از نتایج SSPA در شکل ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده است.

چنان که ملاحظه می‌شود در حالتی که از مغشوش‌کننده استفاده نشده اختلاف مقاومت به‌دست آمده در دانشگاه با مرجع SSPA مقادیر قابل توجهی (در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد) دارد ولی در حالتی که از مغشوش‌کننده استفاده شده است و رینولدز جریان بیشتر از رینولدز بحرانی (5×10^5) است (معادل عدد فرود بزرگ‌تر از ۰/۱۶) اختلاف فوق بسیار جزئی و در سرعت طراحی شناور فوق که معادل عدد فرود ۰/۱۹ است، ۱ درصد است. در سرعت‌های کم‌تر، یعنی در رینولدز کم‌تر از رینولدز بحرانی، نوسانات در مقاومت مدل زیاد است و امکان استفاده از نتایج وجود ندارد. با توجه به تغییرات اختلاف فوق می‌توان از آن به‌عنوان یک ضریب اصلاح در سرعت‌های مختلف برای شناورهای مشابه استفاده کرد. برای این منظور می‌توان پس از محاسبه‌ی مقاومت کشتی براساس نتایج آزمایشگاه، مقدار تصحیحات به‌دست آمده در شکل ۱۱ را در آن اعمال کرد. به‌دلیل محدودیت ابعادی در حوضچه‌ی کشتی دانشگاه صنعتی شریف، رژیم جریان اطراف مدل

در شکل ۹ نمودار مقایسه‌ی مقاومت شناور برای نتایج حاصله از آزمایش کشش در حوضچه کشش SSPA در سوئد، نتایج حاصله از آزمایش کشش در حوضچه‌ی دانشگاه شریف (بدون استفاده مغشوش‌کننده)، و نتایج حاصل از آزمایش کشش در حوضچه دانشگاه شریف با استفاده از مغشوش‌کننده‌ی جریان نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۹ می‌توان چنین عنوان کرد که در سرعت‌های بالا، با استفاده از مغشوش‌کننده جریان نتایج خوبی به‌دست آمده است و اختلاف مقاومت در سرعت طراحی شناور (۱۵ گره دریایی) بین نتایج SSPA و نتایج آزمایشگاه دانشگاه شریف بسیار کوچک و کم‌تر از ۱٪ است. در شکل ۹ نوسانات مقاومت هیدرودینامیکی برای حالت مغشوش‌کننده‌ی میخ کوچک نسبت به حالت مشابه در شکل ۷ بیشتر است، چرا که نوسانات مربوط به C_W است و سهم ضریب C_W در C_T برای کشتی بیشتر از مدل است. [۷، ۲]

۷. تعیین ضریب اصلاح

به‌دلیل اثرات مقیاس، خطاهای ناشی از آزمایش (خطاهای اندازه‌گیری دستگاه) و کلیه‌ی پدیده‌های موضعی هیدرودینامیکی که در آزمایش مدل تأثیرگذارند، تعیین مقاومت شناور با استفاده از آزمایش مدل در حوضچه‌های کشش کوچک خطاهایی دارد که می‌توان آن‌ها را با استفاده از یک ضریب اصلاح کرد. در این تحقیق سعی شده است با داشتن مقاومت مدل و محاسبه‌ی مقاومت توسط روش ITTC78 در حوضچه‌ی کشش، و در نهایت مقایسه‌ی این مقاومت با نتایج آزمایشگاه‌های بزرگ‌تر (SSPA) ضریب اصلاح را برای حوضچه‌ی موجود به‌دست آورد. این موضوع در دنیا نیز متداول است و اکثر

مقاوم شناور نوسان وجود دارد، در سرعت‌های بالاتر تغییرات نیروی مقاوم منظم‌تر است. در صورتی‌که آزمایش مدل بدون استفاده از مغشوش‌کننده‌ی جریان انجام شود می‌توان درصد خطای ناشی از آن را به صورت تابعی تقریباً خطی در نظر گرفت و آزمایش را در محدوده‌ی وسیع‌تر انجام داد. در صورت استفاده از مغشوش‌کننده‌ی جریان در محدوده‌ی سرعت‌های پایین به دلیل ناپایداری ایجاد شده نمی‌توان از نتایج استفاده کرد ولی در محدوده‌ی سرعت‌های بالا ($Fr > 0.15$) و $Re > 5 \times 10^5$) نتایج حاصله نشان می‌دهد که دقت آزمایش قابل قبول است و خطای آن نسبت به نتایج آزمایشگاه صنعتی SSPA سوئد بسیار کم و حداکثر تا ۵ درصد مشاهده شده است که با توجه به نتایج تحقیق حاصل می‌توان در آزمایش‌های بعدی نتایج را اصلاح کرد.

برای شناورهای جابه‌جایی در سرعت‌های پایین، کاملاً آرام است و در محدوده‌ی کاری این شناورها نیز قسمت عمده‌ی از جریان روی بدنه آرام باقی می‌ماند. استفاده از مغشوش‌کننده‌های جریان در چنین رژیم‌های جریان دسوار و حساس است، زیرا اغتشاش ایجاد شده ممکن است به صورت ناپایداری ظاهر شود و جدایش در حالت آرام زودتر اتفاق افتد که به معنی افزایش مؤلفه‌ی فشار لزجی^{۱۲} مقاومت هیدرودینامیکی است.

۸. نتیجه‌گیری

نتایج ارائه شده در این نوشتار نشان می‌دهد که در صورت استفاده از مغشوش‌کننده جریان؛ تغییرات نیروی مقاومت هیدرودینامیکی مدل منظم‌تر است. در این حالت اگرچه در سرعت‌های پایین در نیروی

پانویس

1. towing tanks
2. laminar
3. scale effect
4. product carrier
5. turbulence simulator
6. Blockage effect
7. displacement
8. prototype
9. block coefficient
10. bilge kell
11. pulley
12. viscous pressure

منابع

1. Klaka, K. Penrose, J.D. Horsley, R.R. Renilson, M.R. "Hydrodynamic tests on a fixed plate in uniform flow", *Experimental thermal and Fluid science*, **30**, pp. 131-139 (2005).
2. Carlton, J. S. "Marine propellers and propulsion", Butterworth-Heinemann Ltd. Ch.12 (1994).
3. ODD M. FALTINSEN, "Hydrodynamics of high-speed marine vehicles", CAMBRIDGE University Press, Printed in USA, Ch.2 (2005).
4. Molland, A. F., Couser, P. R., "Resistance experiments on a systematic series of high speed displacement catamaran hull forms: Variation on

- length-displacement ratio and breadth-draught ratio", *Trans. RINA*, **138** pt A, pp. 55-72 (1996).
5. Walree, F. van, Yamaguchi, K., "Hydrofoil research: model tests and computations", In proc. FAST'93, ed. K. Sugai, H. Miyata, S. Kubo, H. Yamato, Tokyo: The Society of Naval Architects of Japan, **1**, pp. 791-806 (1993).
6. V. Bertram, "Practical ship hydrodynamics", Butterworth-Heinemann Ltd., Ch.3 (2000).
7. Steen, S. Rambech, H.J. Zhao, R. Minsaas, K.J. "Resistance prediction for fast displacement catamarans", FAST (1999).
8. Lewis, E.V. "Principles of naval architecture", 2nd edition, **2**, Ch.5 (1998).
9. Rawson K.J. & Tupper, E.C. "Basic Ship Theory", 3rd edition, England, Longman Scientific & Technical (1988).
10. "22nd international towing tank conference proceedings", Seoul, Korea & Shanghai, China, September 5-11 (1999).
11. Harvald, SV.AA. "Resistance and propulsion of ships", John Wiley & Sons, Denmark (1983).
12. Prasanta Sahoo, "Ship resistance and propulsion lecture note", AMC (2005).