

مطالعه تجربی کاهش نیروی پسای هیدرودینامیکی یک شناور کاتاماران به روش تزریق حباب

علیرضا بینش^{۱*}، مصطفی منفرد مسقانی^۲

binesh@mut.ac.ir

^{۱*} نویسنده مسئول، استادیار، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

mmonfared@mut.ac.ir

^۲ مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۹۸/۴/۹

تاریخ دریافت: ۹۸/۱/۲۷

چکیده

افزایش سرعت و برد سامانه‌های هیدرودینامیکی که در نهایت به افزایش عملکرد می‌انجامد، از اهداف بسیار مهم در طراحی به شمار می‌آید. از طرفی لازمه این افزایش، کاهش نیروی پسای هیدرودینامیکی است. یکی از روش‌های فعال برای کاهش نیروی پسای هیدرودینامیکی، تزریق حباب روی سطح وسیله است. این روش بازده بسیار بالایی دارد، در مقایسه با سایر روش‌ها، مسئله آلودگی محیط‌زیست نداشته و به راحتی روی سامانه‌های هیدرودینامیکی معمول نیز قابل اجراست. هدف اصلی در این پژوهش، مطالعه تجربی به کارگیری روش تزریق حباب به منظور کاهش نیروی پسای هیدرودینامیکی یک شناور سطحی و مشخص نمودن معیارهای تأثیرگذار در عملکرد این روش است. در ابتدا یک مدل ۱ به ۲۵ از شناور کاتاماران به طول ۷۰ سانتی‌متر از جنس پلکسی‌گلاس و با استفاده از تکنیک برش لیزر، ساخته شده، سپس تزریق کننده‌های حباب طراحی شده و به همراه تجهیزات لازم مربوط به سنجش نرخ هوای تزریقی در سه موقعیت مکانی مختلف در نواحی سینه، میانی و پاشنه در ناحیه کف بدنه نصب شده است. تست‌های مربوط به اندازه‌گیری مقاومت شناور، در حوضچه کشش و با استفاده از امکانات آزمایشگاهی مانند اربا به کشش برای دو مدل شناور کاتاماران همراه با سامانه تزریق حباب و بدون سامانه تزریق حباب در محدوده عدد فرود ۰/۴۴ تا ۱/۴۸ انجام شده است، در نهایت تأثیر تزریق هوا بر میزان کاهش مقاومت شناور در اعداد فرود مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایشگاهی بیانگر این موضوع است که روش تزریق حباب در گستره اعداد فرود تست شده به کاهش نیروی پسای هیدرودینامیکی وارد بر مدل شناور کاتاماران منجر شده است. از طرفی با افزایش عدد فرود میزان قابلیت روش تزریق حباب در کاهش نیروی پسای مدل کاهش یافته و از ۲۱/۱۵ درصد در عدد فرود ۰/۵۴ به ۱۱/۸ درصد در عدد فرود ۱/۲۵ رسیده است.

واژه‌های کلیدی: کاهش پسای هیدرودینامیکی، شناور کاتاماران، تزریق حباب، حوضچه کشش.

۱. مقدمه

اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها با قابلیت کشتیرانی، دریاها و رودها نزدیک به ۷۲ درصد سطح زمین را می‌پوشانند. این راه‌های آبی از دیدگاه تجارت داخلی و بین‌المللی، برقراری ارتباط و حفظ امنیت مرزهای آبی اهمیت زیادی دارند. شناورها به‌عنوان ارکان اصلی حرکات روی آب همواره مورد توجه متخصصان این زمینه بوده‌اند.

با توجه به اهداف گوناگون و نیازهای متفاوتی که در حرکت روی آب وجود دارد، انواع متفاوتی از شناورها طراحی و ساخته شده‌اند. علاوه بر این تلاش‌های زیادی برای به دست آوردن راندمان عملکردی مناسب در شناورها انجام گرفته است و همچنان با عنوان بهینه‌سازی ادامه دارد. برای رسیدن به این منظور از روش‌های گوناگون، مانند روش‌های تحلیل‌های تئوری، تحلیل آماری، روش‌های تجربی و آزمایشگاهی و روش‌های عددی استفاده می‌شود. در این راستا پیش‌بینی و تخمین مقاومت شناور به‌منظور برنامه‌ریزی عملیاتی شناور و بهره‌گیری مناسب از شناورها همواره مورد توجه دانشمندان و صاحب‌نظران بوده است. هزینه‌های مربوط به سوخت یکی از بخش‌های مهم در بودجه سالانه شناورها محسوب می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهند مصرف سوخت شناورهای بزرگ به‌طور متوسط بین ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ لیتر در ساعت است و این آمار بدین معناست که کشتی‌ها در طی تنها ۱ ساعت، میزان سوخت به‌مراتب بیشتری در مقایسه با مصرف سالانه یک خانواده به‌منظور گرمایش مصرف می‌کنند. با توجه به این نکته، یک کاهش اندک در میزان مصرف سوخت (حتی چند درصد) به معنای صرفه‌جویی سالانه عظیم در انرژی مصرفی شناورها خواهد بود.

علی‌رغم موارد گفته‌شده در طی سال‌های اخیر، دانشمندان با بررسی بخش مهم دیگری از نیروی پسای کل که در حقیقت همان بخش نیروی پسای اصطکاکی است، گام‌های مؤثری برداشته‌اند تا با کاهش هم‌زمان نیروی پسای اصطکاکی و همچنین استفاده از فرم بدنه بهینه مقاومت حرکتی شناورها را تا حد زیادی کاهش دهند. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، سهم نیروی پسای اصطکاکی از نیروی پسای کل در کشتی‌ها

با سرعت بالا در حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد و برای کشتی‌ها با سرعت‌های پایین در محدوده ۷۰ تا ۸۰ درصد قرار دارد [۱].

تزریق هوا عبارتی کلی است که به استفاده از هوا برای کاهش نیروی پسای هیدرودینامیکی اطلاق می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده این روش در حدود ۵ تا ۲۰ درصد باعث ذخیره‌سازی انرژی و در نهایت جلوگیری از انتشار سوخت می‌شود. کاهش نیروی پسای هیدرودینامیکی کل بدین معناست که قدرت موردنیاز برای رانش با در نظر گرفتن انرژی لازم در تأمین هوا و مقایسه با حالت معمول بسیار کمتر است؛ بنابراین این روش تأثیر قابل توجهی بر مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی دارد. کاهش نیروی پسای اصطکاکی با تزریق هوا روی یک جسم جامد یکی از روش‌های کارآمد بوده و اغلب به سه طریق روش تزریق حباب، روش فیلم هوا و روش حفره هوا انجام می‌شود [۲].

در روش تزریق حباب، حباب‌های بسیار کوچک به درون لایه مرزی تزریق می‌شود. در شرایطی که اندازه حباب‌ها در مقیاسه با ضخامت لایه مرزی خیلی کوچک باشد، به اصطلاح این روش را کاهش نیروی پسای اصطکاکی با میکرو حباب می‌نامند. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، این روش با اصلاح لزجت مؤثر، تغییر دانسیته، تصحیح‌های آشفتگی یا تغییر در انتقال مومنتوم آشفته، سبب کاهش نیروی پسای اصطکاکی می‌شود. آزمایش‌ها نشان داده است که نرخ کاهش نیروی پسای اصطکاکی به‌خوبی با کسر تمرکز حباب‌ها ارتباط دارد. از عوامل مهم دیگر اندازه حباب‌هاست. قطر میکرو حباب‌ها بر مسیر حرکت حباب‌ها و در نتیجه تمرکز و مکان آن‌ها در لایه مرزی تأثیر می‌گذارد. مهم‌ترین خصوصیت اندازه حباب‌ها، قطر آن‌ها در مقایسه با ابعاد لایه مرزی است. آزمایش‌ها حاکی از آن است که اندازه حباب‌ها (۵۰۰ تا ۱۲۰۰ میکرومتر) باید یک مرتبه مقداری از ضخامت زیر لایه مرزی (حدود ۱۰ میکرومتر) بزرگ‌تر و یک مرتبه مقداری از ضخامت لایه مرزی، (۱۰ میلی‌متر) کوچک‌تر باشد [۳].

در روش فیلم هوا، هوا به‌وسیله سوراخ‌ها یا محیط متخلخلی تزریق می‌شود و با رنگ‌های بسیار دافع آب، نزدیک سطح

الکترولیز تولید شده بودند. در این تحقیق طول جسم مورد آزمایش حدود 3ft بوده و با سرعت 8.5 ft/s در یک تانک آب کشیده شده است. نتایج بیانگر این موضوع بود که حباب‌های هیدروژن سبب کاهش پسای اصطکاکی شده‌اند و این کاهش در رینولدزهای پایین محسوس‌تر بوده است.

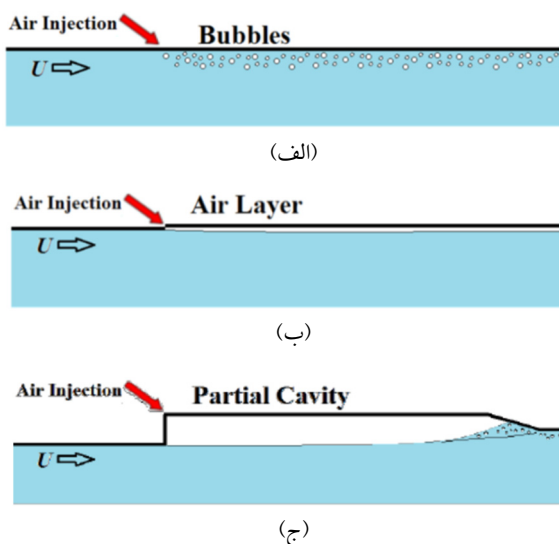
بگدویچ^۳ در سال ۱۹۷۷، ماداوان در سال ۱۹۸۴ و پال^۴ در سال ۱۹۸۸، اثر میکرو حباب‌ها بر کاهش نیروی پسا در جریان آشفته روی صفحه تخت بررسی نمودند [۵]. گوین^۵ در سال ۱۹۹۶، تاکاهاشی^۶ در سال ۱۹۹۷ و کوداما^۷ در سال ۲۰۰۰ پدیده کاهش نیروی پسا به وسیله میکرو حباب‌ها را برای جریان کاملاً توسعه یافته در جریان کانال مورد مطالعه و بررسی قرار دادند [۵]. بر اساس گزارش‌های محققان، میزان کاهش نیروی پسا با تزریق میکرو حباب‌ها و مقدار کسر حجمی حباب‌ها رابطه مستقیم دارد و کاهش اصطکاک حتی تا میزان حداکثر ۸۰ درصد نیز گزارش شده است.

ماداوان در سال ۱۹۸۵، بگدویچ و مرکل^۸ در سال ۱۹۸۶، تاکوناگا^۹ در سال ۱۹۸۶، کاتو^{۱۰} در سال ۱۹۹۴ و واتانابه^{۱۱} در سال ۱۹۹۸ در زمینه اثر میکرو حباب‌ها بر کاهش نیروی پسا کارهای تجربی انجام داده‌اند [۶]. نتایج نشان دادند که مقدار کاهش نیروی پسای اصطکاکی ارتباط قوی با مقدار ماکزیمم کسر حجمی هوای تزریق شده دارد. گوین در سال ۱۹۹۶ نشان داد که کسر حجمی هوای تزریق شده در نزدیک دیوار نسبت به نقاط دورتر در داخل لایه مرزی تأثیر بیشتر در کاهش اصطکاک دارد [۳].

اندازه حباب‌ها نیز یکی از عوامل مهم در کاهش پسای اصطکاکی است. حباب‌های با قطر میلی متری، پسای اصطکاکی را به خاطر آشفتگی ناشی از گردابه‌هایی که از حرکت حباب‌ها تشکیل می‌شود، افزایش می‌دهد. حتی زمانی که حباب‌ها از میان یک صفحه متخلخل به داخل سیال تزریق می‌شوند، اندازه این حباب‌ها به وسیله سرعت جریان اصلی و مقدار هوای تزریق شده تعیین می‌شود نه با اندازه سوراخ‌های صفحه متخلخل. این نتیجه را منگ^{۱۲} و آلمن^{۱۳} در سال ۱۹۸۹ به دست آوردند. کاتو در سال ۱۹۹۸ نشان داد که برای تزریق حباب، یک مقطع محدب دوعبده با سوراخ‌های تزریقی که

نگه داشته می‌شود. از مهم‌ترین این رنگ‌ها، رنگ‌های بر پایه سیلیکون، که آب‌گریزند، است. نرخ هوای مناسب و مکان مناسب دمش هوا باعث تشکیل یک فیلم هوا روی سطح و در نهایت کاهش نیروی پسای اصطکاکی می‌شود.

کاهش نیروی پسای اصطکاکی با پر کردن یک فرورفتگی در زیر بدنه شناور، با گاز را به اصطلاح کاهش نیروی پسای اصطکاکی با حفره هوا می‌نامند. در این روش با ایجاد یک پله رو به عقب در قسمت انتهایی بالادست تورفتگی و یک شیب تدریجی به سمت پایین در قسمت پایین دست، یک تورفتگی با قابلیت محبوس کردن گاز ایجاد می‌شود. در این روش به منظور جلوگیری از تلفات گاز، می‌بایست گاز را به‌طور پیوسته تزریق نمود. هر چند که با طراحی یک حفره گاز مناسب، می‌توان تلفات گاز را به حداقل رساند [۴].



شکل ۱. نمای شماتیک از روش‌های تزریق هوا [۲] الف: روش تزریق حباب، ب: روش فیلم هوا، ج: روش حفره هوا

در این پژوهش روش تزریق میکرو حباب‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. پژوهش‌های اصلی انجام شده در این حوزه اغلب به صورت تجربی است. برای اولین بار در سال ۱۹۷۳ پدیده کاهش نیروی پسا توسط مک کرومیک^۱ و باتاچاریا^۲ مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت [۳]. آن‌ها نیروی پسای هیدرودینامیکی یک جسم کاملاً غوطه‌ور و در حال چرخش که با حباب‌های هیدروژن پوشیده شده بود را محاسبه کردند. حباب‌های ایجاد شده در این آزمایش با استفاده از روش

درصد کاهش یافته است [۱۰].

در تحقیق انجام شده توسط هائو^{۱۷} و همکارانش در سال ۲۰۱۹، روش تزریق حباب برای کاهش نیروی پسای وارد بر یک مدل کشتی بزرگ و با سرعت پایین در حوضچه کشتی مورد ارزیابی قرار داده شد. بر اساس بررسی صورت گرفته، نیروی پسای وارد بر مدل در سرعت طراحی وسیله به میزان ۱۹/۵ درصد کاهش یافت. همچنین در تست‌های خودپیشران مدل، توان موردنیاز مدل به میزان ۲۶/۴۲ درصد کاهش یافته است و بر اساس بررسی انجام شده در نمونه واقعی، این میزان کاهش در توان مصرفی به مقدار ۱۵/۰۳ درصد بوده است. [۱۱].

هدف اصلی در این پژوهش ارزیابی قابلیت روش تزریق حباب در کاهش نیروی پسای هیدرودینامیکی یک مدل شناور کاتاماران با مقیاس ۱ به ۲۵ نسبت به نمونه واقعی است. مدل و سامانه تزریق حباب طراحی، ساخته شده و تست‌های آزمایشگاهی در آزمایشگاه کانال آب دانشگاه صنعتی مالک اشتر انجام شده است.

۲. تئوری

در این بخش از پژوهش، نظریه‌های مختلف در مورد نحوه عملکرد و مکانیزم کاهش نیروی پسای با روش تزریق حباب بررسی شد.

۲-۱. نظریه تأثیر حباب‌ها روی لزجت و دانسیته

حضور میکرو حباب در سیالی مانند آب، مسئله‌ای از نوع جریان‌های دوفازی است. در جریان دوفازی، خواص و رفتار جریان در مقایسه با رفتار هر یک از فازها به طور مستقل، می‌تواند بسیار متفاوت باشد. این تغییر مشخصات (نسبت به مشخصه‌های هر یک از فازها) در جریان دو فاز در نگاه اول ناشی از تغییرات مشخصه‌های مخلوط موجود است. به عنوان نمونه؛ می‌توان تغییر دانسیته و لزجت را به عنوان شاخص‌ترین تغییرات در جریان دوفاز در مقایسه با هر یک از این دو خاصیت در جریان تک فاز مطرح نمود؛ بنابراین تزریق میکرو حباب به درون جریان سیال و به ویژه تزریق آن در نزدیکی دیواره، سبب تغییر دانسیته و لزجت مخلوط و

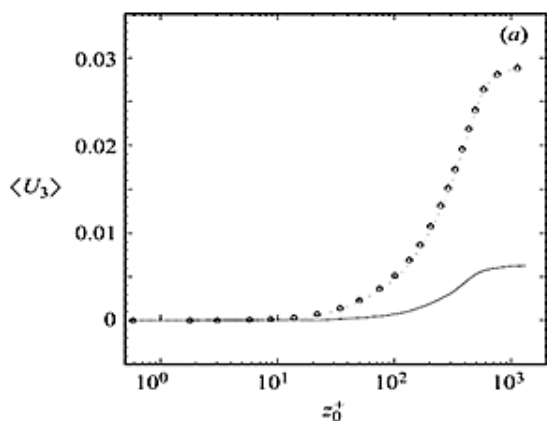
در بالای جریان قرار دارند، بر افزایش توانایی میکرو حباب‌ها تأثیر زیادی دارد، نشان داد که تأثیر میکرو حباب‌ها در پایین دست جریان کاهش می‌یابد. توزیع پسای اصطکاک موضعی در مسیر جریان توسط واتانابه در سال ۱۹۹۸ و کداما در سال ۱۹۹۹ روی یک صفحه بسیار تخت محاسبه شده است. واتانابه آزمایش را با دو صفحه به طول‌های ۲۰ متر و ۴۰ متر، عرض ۰/۶ متر، در عمق ۰/۲ متر در سرعت ۷ متر بر ثانیه انجام داد. در حالی که آزمایش را با صفحه‌ای به طول کمی بیشتر از ۵۰ متر و عرض ۱ متر و سرعت ۵ متر بر ثانیه انجام داد [۶].

ماداوان نشان داد که اثر کاهش نیروی پسا در پایین دست جریان تا حدود ۶۰ تا ۷۰ برابر ضخامت لایه مرزی حفظ می‌شود. همچنین تأثیر جهت صفحه به وسیله ماداوان در سال ۱۹۸۵ و کاتو در سال ۱۹۹۴ مورد مطالعه قرار گرفت. هر دو آزمایش نشان دادند که صفحه در وضعیت بالا (تزریق به زیر صفحه) تأثیر بیشتری نسبت به صفحه در زیر (تزریق به بالای صفحه) دارد، علت این نتیجه نیروی شناوری است که باعث می‌شود حباب‌ها در زیر صفحه قرار گرفته و در کاهش پسای اصطکاک تأثیر بیشتری داشته باشند [۶ و ۷].

در سال ۲۰۱۲، روش ترکیبی تزریق حباب و حفره هوا برای کاهش توان مصرفی موردنیاز یک کشتی معمولی توسط ماکیهاراجو^{۱۴} و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که حداکثر کاهش توان مصرفی به میزان ۲۰ درصد بوده است [۸]. پژوهش صورت گرفته توسط جانگ^{۱۵} و همکارانش در سال ۲۰۱۴ در حوضچه کشتی و روی یک مدل کشتی ترابری نشان داد که توان مصرفی در نمونه واقعی یک کشتی ترابری، بدون در نظر گرفتن توان موردنیاز برای تزریق حباب، به میزان ۵ تا ۶ درصد کاهش یافته است [۹].

ژانگ^{۱۶} و همکارانش در سال ۲۰۱۸، با استفاده از یک سامانه تزریق حباب پیشرفته، تأثیر روش تزریق حباب در کاهش یک هیدروفویل را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق اثر محل تزریق حباب و عمق قرارگیری هیدروفویل بر کارایی روش تزریق حباب مطالعه شد. بر اساس نتایج به دست آمده، در شرایط بهینه، نیروی پسای وارد بر هیدروفویل، ۶۲/۸۵

کاهش یافته است.



شکل ۲: افزایش سرعت عمود بر دیوار در حالت جریان شامل حباب نسبت به حالت بدون حباب (خط توپر برای حالت بدون حباب است) [۱۲]

۳. مراحل ساخت مدل

در این بخش از پژوهش، شیوه انتخاب ابعاد مدل، جنس مدل، طراحی فرم بدنه، ساخت مدل و در نهایت ساخت و نصب سامانه تزریق حباب به تفکیک تشریح شده است.

۳-۱. ابعاد مدل

امروزه با پیشرفت قابل توجه روش‌های عددی، به کارگیری روش‌های تجربی اهمیت بسزایی در بررسی رفتار شناورها دارد. این روش بر پایه تشابه ابعادی برقرار بوده و با در نظر گرفتن این شرایط می‌توان نتایج حاصل از تست مدل را با دقت بالایی بر شناور واقعی مورد بررسی قرارداد. در ادامه پارامترهای مهم برای ساخت و تست تجربی مدل ارائه شده است.

شناورهای کاتاماران شناورهایی هستند که از دو بدنه مجزا و متقارن نسبت به یکدیگر طراحی و ساخته شده‌اند. این دو بدنه با یک پل میانی به هم وصل می‌شوند؛ این پل نقش عرشه را ایفا می‌کند. عرشه این شناورها نسبت به شناورهای تک بدنه هم حجم، بزرگ‌تر است و مزیت‌هایی نسبت به تک بدنه‌ها دارد که شامل پایداری بیشتر در امواج، سرعت بالاتر، ایمنی بیشتر، قابلیت مانور و دریامانی بالاتر است. استفاده از این نوع شناورها و بهبود فرم بدنه آن‌ها در دو دهه اخیر مورد توجه طراحان و سازندگان قرار گرفته است.

در نتیجه تغییر رفتار ماده در مقایسه با شرایط تک فاز می‌شود.

در یکی از ساده‌ترین مدل‌های ارائه شده، کاهش نیروی پسای دو عامل ارتباط داده شده است. یکی تأثیر روی دانسیته مؤثر و کاهش آن و دیگری اصلاح آشفتگی که این نظریه با نتایج تجربی نیز هم‌خوانی خوبی داشته است. شرح گفته شده به این ترتیب است که حضور فاز گاز در مایع سبب تغییر دانسیته و در نتیجه شکل‌گیری دانسیته مؤثر جدیدی در جریان می‌شود که در اثر کاهش آن، در مقایسه با حالت تک فاز مایع، میزان پسای اصطکاکی کاسته می‌شود، از طرفی افزایش لزجت مؤثر باعث می‌شود، در بخشی از نواحی نزدیک به دیواره، جریان شبه لایه‌ای آرامی شکل گیرد که سبب به تعویق افتادن شرایط آشفتگی جریان یا تشکیل تنش‌های برشی زیاد در اثر شیب زیاد گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره می‌شود.

۲-۲. نظریه تأثیر حباب‌ها روی ساختارهای چرخشی طولی در راستای جریان

این نظریه که بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌هایی عددی انجام شده حاصل شده است بیان می‌کند که حضور حباب با ایجاد یک دیورژانس مثبت محلی در سرعت سیال ($\nabla \cdot U > 0$)، سرعت متوسط مثبتی را به صورت عمود و به سمت خارج از دیوار ایجاد می‌کند و در نتیجه سرعت متوسط در جهت جریان کاسته شده و ساختارهای چرخشی طولی در راستای جریان، از دیوار فاصله گرفته و جابه‌جا می‌شوند. این جابه‌جایی ناشی از سرعت عمود بر دیواره است؛ در حالتی که جریان همراه با میکرو حباب باشد، این سرعت افزایش می‌یابد. این موضوع در شکل دو نشان داده شده است.

جابه‌جایی ساختارهای چرخشی با به کارگیری پدیده جاروب کردن، سبب افزایش فاصله خالی نسبت به دیوار می‌شود و سرعت جهت جریان در این نواحی کاهش می‌یابد و باعث جابه‌جا شدن محل ماکزیمم تولید تنش رینولدز به محلی دور از دیواره می‌شود، این ناحیه گرادیان سرعت میانگین کمتری دارد (به عبارت دیگر تنش برشی کمتری دارد). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نرخ تولید انرژی جنبشی آشفتگی

نکته باید اذعان کرد که تشابه هندسی برای این مدل نسبت (۲۵ به ۱) در نظر گرفته خواهد شد. علت انتخاب نسبت (۲۵ به ۱) بدین دلیل است که وزن مدل‌های ساخته شده نباید از وزن محاسبه شده بیشتر باشد. در نتیجه با مقیاس در نظر گرفته شده و فرمول‌های گفته شده، ابعاد، سرعت و وزن جابه‌جایی مدل به دست می‌آید (جدول ۱).

۲-۳. جنس مدل

به منظور ساخت مدل از مواد مختلفی از قبیل فایبر گلاس، چوب و پلکسی گلاس^{۱۸} استفاده می‌شود. در این پروژه از ماده پلکسی گلاس به منظور ساخت مدل استفاده شده است. استفاده از این ماده در ساخت مدل نه تنها باعث سبک‌تر شدن مدل می‌شود بلکه به راحتی می‌توان آرایش حباب‌ها را در اطراف بدنه مشاهده نمود. پلکسی گلاس نوعی پلاستیک است که ظاهری بسیار شفاف و شیشه‌شیشه دارد. جنس پلکسی گلاس از نوعی پلیمر به نام پلی‌کربنات شفاف است. مدل ساخته شده در زیر ارباب کشش قرار داده و طوری کشیده می‌شود که نسبت به حرکات هیو و پیچ مقید باشد. در ضمن مدل طوری بالاست می‌شود که به آبخور و تریمر مورد نظر برسد. با توجه به شرایط مورد نیاز برای اجرای تست، در این پژوهش دو مدل با خصوصیات ابعادی مشابه طراحی و ساخته شدند. در واقع یک مدل دارای تجهیزات مربوط به تزریق هوا و دیگری به صورت ساده ساخته شده تا بدین صورت بتوان در دو حالت تزریق هوا و حالت معمول شناور، پسای اصطکاکی را مورد بررسی قرار داد.

به طور معمول پلکسی گلاس با ضخامت‌های مختلف (بین ۱ تا ۳۰ میلی‌متر) در بازار موجود است و ضخامت‌های بالای ۳۰ میلی‌متر نیز با کمی جستجو قابل دسترس خواهند بود. از خواص این ماده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ مقاومت بسیار بالا: پلکسی گلاس در برابر ضربه بیش از یازده برابر شیشه با ضخامت یکسان، مقاومت دارد؛
- ✓ خاصیت فرم‌دهی در دو حالت گرم و سرد: به دلیل خاصیت فرم‌دهی در دو حالت سرد و گرم، پلکسی گلاس از قابلیت انعطاف خوبی برخوردار است.

در بررسی‌های هیدرودینامیکی شناورها، اعداد بدون بعد و ضرائب مختلفی استفاده می‌شوند که هیچ‌یک از آن‌ها به تنهایی برای همه حالت‌ها و شرایط مناسب نیستند. برخی از این تعریف عبارت‌اند از:

$$F_{nV} = \sqrt{\frac{V}{g \cdot \nabla^{1/3}}} \quad \text{عدد فرود حجمی:}$$

$$F_B = C_v = \frac{V}{\sqrt{g \cdot b}} \quad \text{عدد فرود عرضی:}$$

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad \text{عدد فرود طولی:}$$

عدد فرود حجمی به حجم جابه‌جایی، عدد فرود عرضی و طولی به ترتیب به عرض و طول خیس شده شناور وابسته‌اند. طبق تجربه در سرعت‌های بالا، عدد فرود عرضی، برای بررسی پدیده‌های هیدرودینامیکی مناسب‌تر است زیرا در سرعت‌های بالا قسمت جلوی بدنه با آب تماس ندارد. عدد فرود حجمی برای وقتی که طول خیس شده بدنه با سرعت تغییر می‌کند به کار می‌رود و در نهایت عدد فرود طولی نیز وقتی که طول خیس شده در سرعت‌های مختلف ثابت می‌ماند، مناسب است [۱۳].

جدول ۱. مشخصات ابعاد شناور اصلی و مدل شناور مورد نظر

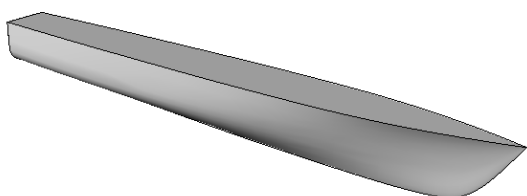
$F_n = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}}$	فرمول محاسبه عدد فرود طولی
۱۶/۵	طول شناور واقعی L_s (متر)
۱/۸۰	عرض شناور واقعی B_s (متر)
۰/۷۸	آبخور شناور واقعی T_s (متر)
۲۵ گره دریایی $V_s = 12/86 m/s$	سرعت شناور واقعی V_s (گره دریایی)
۱۵۱۰۰	وزن جابه‌جایی شناور واقعی Δ_s (کیلوگرم)
$Fr_s = Fr_m$	برابری اعداد فرود مدل و شناور واقعی
۲۵	نسبت تشابه هندسی λ
۰/۷۰۷	طول شناور مدل L_m (متر)
۰/۰۷۲	عرض شناور مدل B_m (متر)
۰/۰۳۱	آبخور شناور مدل T_m (متر)
۲/۵۸	سرعت مدل V_m (متر بر ثانیه)
۱/۸۴	وزن جابجایی مدل Δ_m (کیلوگرم)

بنابراین با توجه به محدودیت‌های موجود در وزن مدل و سرعت مناسب دستگاه کشش برای ثبت نتایج با دقت بالا، به محاسبه ابعاد و سرعت مدل پرداخته شده است. البته به این

۴. بدنه باید طوری طراحی شود که با وجود نصب عرشه روی تک بدنه‌ها، بتوان تجهیزات مربوط به تزریق حباب را در بدنه به راحتی نصب نمود.

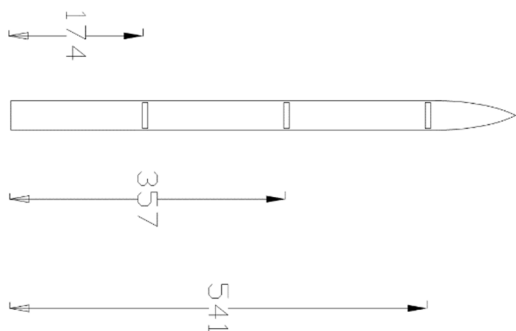
۵. در کف بدنه و در موقعیت‌های طولی مختلف باید محل‌هایی با ابعاد مشخص برای تزریق هوا تعبیه شوند.

برای طراحی و ایجاد نقشه‌های مربوط به فرم بدنه مدل سعی شد تا حد امکان از فرم بدنه ساده‌ای استفاده شود تا بتوان به طور فیزیکی تأثیر پدیده تزریق حباب را بررسی و از نتایج این تحقیق به طور عملی بهره برد. خطوط و فرم بدنه شناور، با در نظر گرفتن پارامترهای موجود از قبیل نصب تزریق کننده حباب‌ها، ابعاد حوضچه و... به فرم ساده و با ناحیه کف تخت بدون شکستگی طراحی شده است. این فرم بدنه تنها در ناحیه سینه دارای فرم دوکی شکل بوده و در ناحیه پاشنه ساده است. فرم اصلی این بدنه در شکل سه نشان داده شده است.



شکل ۳: نمایی از طرح مدل شناور کاتاماران

برای بررسی دقیق تأثیر موقعیت مکانی محل تزریق حباب در نیروی پسای شناور، سه محل در ناحیه کف شناور در موقعیت‌های طولی مختلف طوری طراحی شده‌اند که ابتدا تا حد امکان کل عرض را پوشانند و نواحی سینه، میانی و پاشنه شناور برای بررسی پوشش داده شود (شکل ۴).



شکل ۴: نمایی از موقعیت طولی محل تزریق هوا در کف بدنه

ورق‌های پلکسی گلاس را می‌توان بدون حرارت قوس داد. همچنین برای ایجاد قوس دائمی و فرم‌دهی مختلف می‌توان با روش شکل‌دهی حرارتی اشکال و فرم‌های بسیار متنوعی ایجاد کرد؛

✓ دانسیته: دانسیته پلکسی گلاس حدود ۱/۱۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب نزدیک دانسیته آب (۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) است. در حالی که دانسیته شیشه در حدود ۲/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. از این جهت ورق پلکسی گلاس وزنی حداکثر معادل نصف شیشه هم ضخامت خود دارد؛

✓ محافظ در برابر اشعه ماوراء: پلکسی گلاس خاصیت مقاومت و محافظ در برابر اشعه مخرب ماوراءبنفش (UV) دارد و در بعضی گریدها اشعه UV از ورق گذر نمی‌کند؛

✓ جذب رطوبت پایین: ماده پلکسی گلاس در جذب رطوبت بسیار قوی عمل می‌کند و در نتیجه میزان زردشدگی آن در طول زمان به خصوص در مناطق یا مکان‌های مرطوب بسیار کمتر است [۱۴].

۳-۳. طراحی فرم بدنه شناور کاتاماران

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، برای مطالعه دقیق پارامترهای تأثیرگذار روی پدیده تزریق حباب و پسای هیدرودینامیکی، فرم بدنه‌ای باید طراحی شود که ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

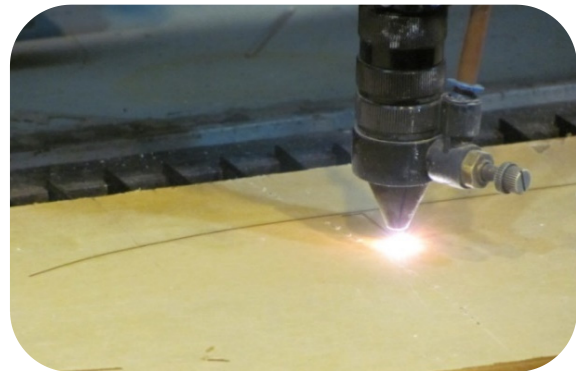
۱. هر کدام از بدنه‌ها ترجیحاً باید نسبت طول به عرض بالایی داشته باشند. در این صورت می‌توان بهینه بودن استفاده از روش تزریق حباب را در شناورهای با بدنه‌های سیلندر شکل بررسی نمود.

۲. طول بدنه را بایستی تا حد امکان بلند در نظر گرفت تا بتوان پایداری حضور حباب‌ها را در راستای خطوط جریان و در مجاورت بدنه مشاهده نمود.

۳. فرم بدنه باید دارای کف مسطح باشد تا بتوان در چندین موقعیت مکانی در طول مدل، تزریق کننده‌ها را نصب نمود.

۴-۳. ساخت مدل

یکی از روش‌های دقیق برش دادن مواد پلکسی گلاس، استفاده از برش لیزری است. یکی از کاربردهای اشعه لیزر استفاده به عنوان وسیله برش است. برشکاری با استفاده از اشعه لیزر از روش‌های نوین صنعت بوده که در دهه‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته و به خاطر کیفیت، سرعت و قابلیت کنترل آن به طور وسیعی از آن استفاده می‌شود. برای ساخت، مدل نقشه‌ها با نرم‌افزار طراحی شده، سپس با استفاده از دستگاه برش قطعات مختلف بریده خواهد شد. این مورد در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. برش و ایجاد انحنا در قطعه با اشعه لیزر

شوند. یادآوری این نکته حائز اهمیت است که به علت وجود خم در ناحیه سینه شناور، ورق‌های تشکیل دهنده دیواره‌های جانبی با عرض ۱/۵ میلی‌متر انتخاب شدند. در واقع با چسباندن ناحیه به ناحیه این ورق‌ها به ورق کف که برای ایجاد استحکام بالاتر با ضخامت ۴ میلی‌متر بریده شده است، می‌توان فرم سینه و خم موجود در آن ناحیه را ایجاد نمود. فرم نهایی مدل در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. نمای نهایی مدل پس از ایجاد فرم انحنا ناحیه سینه

۵-۳. ساخت و نصب سامانه تزریق حباب

برای تزریق حباب در ناحیه کف بدنه حفره‌هایی با ابعاد (۷×۳/۵) میلی‌متر در سه موقعیت مکانی در ناحیه سینه، میانی و انتهایی تعبیه شده‌اند. این ناحیه‌ها در شکل ۷ مشخص است.



شکل ۷. نمای کلی محل‌های تزریق حباب در طول شناور

به منظور ایجاد حباب‌هایی با ابعاد ریز و در حد میکرو باید از یک صفحه منفذدار استفاده نمود تا با تزریق هوا از این صفحه‌ها بتوان حباب‌های هوا را ایجاد نمود. بدین منظور از

ماده چسباننده پلکسی گلاس، کلروفرم است. دو سطح صیقلی محکم به یکدیگر فشرده می‌شوند و کلروفرم با یک قلم‌موی کوچک بین سطوح چکانده می‌شود. پس از یک دقیقه اتصال انجام می‌گیرد. همچنین چسب‌های پایه سیانواکلیت هم می‌توانند مورد استفاده باشند، اما در محل نوعی حالت دوده ایجاد می‌کنند. بهترین گزینه برای چسباندن همان کلروفرم است. برای اینکه در محل چسباندن حباب هوا ایجاد نشود، باید قطعات تا پایان خشک شدن چسب زیر فشار باشند و تکان نخورند. به دلیل وجود مشکلات فراوان در تهیه کلروفرم، در این پژوهش در ساخت مدل از چسب‌های فوری استفاده شد که اگر چه کیفیت بالایی مشابه کلروفرم برای اتصال ندارند اما بهترین گزینه جایگزین هستند زیرا علاوه بر آب‌بندی مناسب، سرعت اتصال قطعات نیز بالاست.

همان‌طور که در این بخش اشاره شد قطعات تشکیل دهنده مدل به صورت مجزا بریده شده و باید به یکدیگر متصل



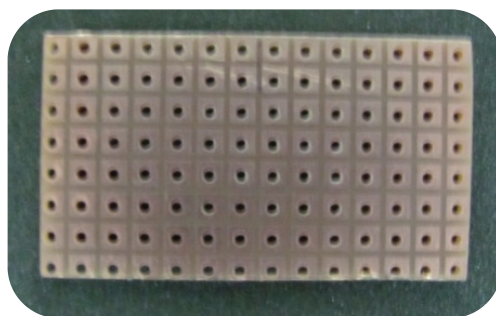
شکل ۱۰. نمایی از محفظه‌های ایجادشده برای تزریق هوا در مدل

برای اتصال مخزن گاز به مدل از یک رگلاتور مخصوص گاز دی‌اکسید کربن استفاده شد که خود دارای ناحیه‌ای برای کنترل دبی تزریق است. برای بهینه‌سازی مصرف از یک شیر برقی استفاده شد تا به صورت بهینه در حالت‌هایی که نیاز به تزریق هوا نیست، بتوان به صورت خودکار تزریق را قطع نمود. بنابراین از اتصالاتی برای شبکه‌بندی و توزیع مناسب هوای تزریقی استفاده شد. در نتیجه هوا پس از عبور از رگلاتور به شیر برقی رسیده و پس از آن با یک شیر پنوماتیک به دو محل تزریق متصل می‌شود (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. نمایی از مدل به همراه سیستم تزریق حباب

صفحه‌هایی مشابه آنچه در شکل ۸ نشان داده شده، استفاده می‌شود. این صفحه‌ها طول و عرض به ترتیب ۳۵ و ۱۶ میلی‌متر دارند. تعداد حفره‌ها در هر کدام از صفحه‌ها ۲۵۲ عدد بوده و قطر هر یک از این حفره‌ها تقریباً برابر ۱ میلی‌متر است. این صفحه‌ها روی محل‌های تزریق نصب شده‌اند تا هوا از آن‌ها عبور کرده و وارد آب شود. در واقع این صفحه‌ها نقش تزریق کننده را ایفا خواهند نمود.



شکل ۸. صفحه‌های تزریق کننده حباب

برای تأمین هوای مورد نیاز برای تزریق در مدل، از کپسول محتوی گاز دی‌اکسید کربن استفاده شده است. این کپرسور با لوله‌های رابطی با قطر ۵ میلی‌متر به مدل اتصال داده شده‌اند (شکل ۹).

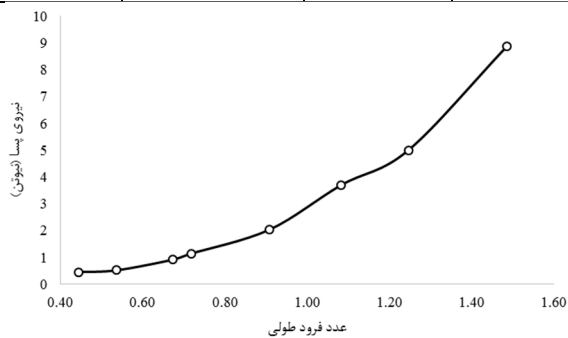


شکل ۹. تجهیزات تزریق حباب

به منظور اتصال منبع به مدل و تزریق حباب، در مدل حفره‌هایی در سه موقعیت طولی، سینه، میانی و پاشنه ایجاد شد و لوله اتصال هوا به یک طرف این اتاقک‌ها نصب شده و طرف دیگر این اتاقک همان صفحه‌های منفذدار تزریق حباب قرار دارد. بدین منظور هوا مستقیماً و با کمترین اتلاف به محل تزریق رسانده می‌شود (شکل ۱۰).

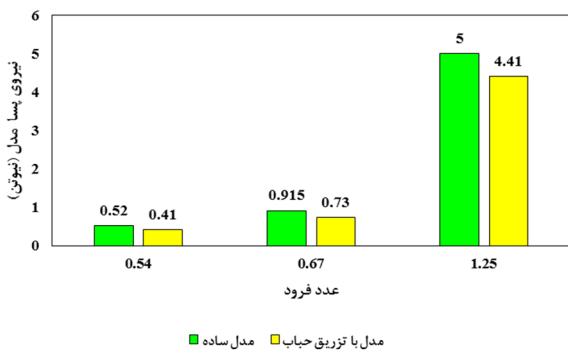
جدول ۲. داده‌های تجربی مربوط به نیروی پسای هیدرودینامیکی مدل شناور کاتاماران در شرایط بدون تزریق حباب

عدم قطعیت	نیروی پسای (نیوتن)	عدد فرود مدل	سرعت مدل (متر بر ثانیه)
±۰/۰۰۲	۰/۴۵۵	۰/۴۴	۱/۱۷
±۰/۰۰۳	۰/۵۲۰	۰/۵۴	۱/۴۱
±۰/۰۰۶	۰/۹۱۵	۰/۶۷	۱/۷۷
±۰/۰۰۸	۱/۱۴۵	۰/۷۲	۱/۸۹
±۰/۰۱۴	۲/۰۳۵	۰/۹۱	۲/۳۹
±۰/۰۲۷	۳/۷۰۰	۱/۰۸	۲/۸۵
±۰/۰۲۸	۵/۰۰۰	۱/۲۵	۳/۲۸
±۰/۰۲۲	۸/۸۷۰	۱/۴۸	۳/۹۱



شکل ۱۳. نیروی پسای وارد بر شناور کاتاماران برحسب عدد فرود طولی در حالت بدون تزریق حباب

برای ارزیابی قابلیت سامانه تزریق حباب بر کاهش میزان نیروی پسای وارد بر مدل شناور، در سه سرعت مختلف شامل سرعت‌های $1/41 \text{ m/s}$ ، $1/77 \text{ m/s}$ و $3/28 \text{ m/s}$ نیروی پسای وارد بر شناور کاتاماران و سامانه تزریق حباب با تست آزمایشگاهی ارزیابی شده است. نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها همراه با عدم قطعیت نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین نتایج موجود در جدول سه به شکل ترسیمی در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است.



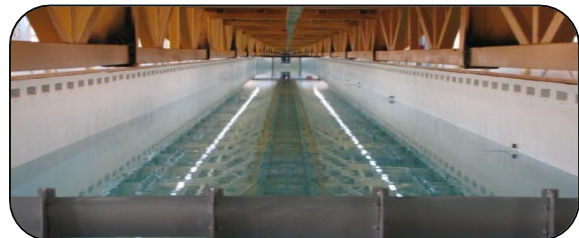
شکل ۱۴. مقایسه داده‌های تجربی مربوط به نیروی پسای هیدرودینامیکی مدل شناور کاتاماران در شرایط همراه تزریق حباب و بدون تزریق حباب

۴. نتایج آزمایشگاهی

مدل باید طبق دستورالعمل پیشنهادی ITTC 7.5-01-01-01 درباره مدل شناور ساخته شود. مدل‌های شناور باید با دقت خاصی در تحمل نیروی حاصل از آب به بدنه، اندازه زبری سطح، ساخت متعلقات، اندازه و موقعیت شبیه‌سازی آشفتگی ساخته شوند. مدل باید به اندازه‌ای بزرگ باشد که اثرات دیواره حوضچه، عمق کم آب، وزن مدل و سرعت حداکثر قابل اندازه‌گیری باشد.

تست‌های آزمایشگاهی در آزمایشگاه کانال آب کوثر دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر انجام شده است (شکل ۱۲). مشخصات فنی این آزمایشگاه به شرح زیر است:

- ✓ طول حوضچه آزمایش: ۱۵۰ متر
- ✓ عرض حوضچه آزمایش: ۷ متر
- ✓ عمق حوضچه آزمایش: ۵/۳ متر
- ✓ حداقل طول ناحیه آزمایش: ۷۵ متر
- ✓ مجهز به سامانه کشش با حداکثر سرعت‌های ۱۵، ۳ و ۳۰ متر بر ثانیه

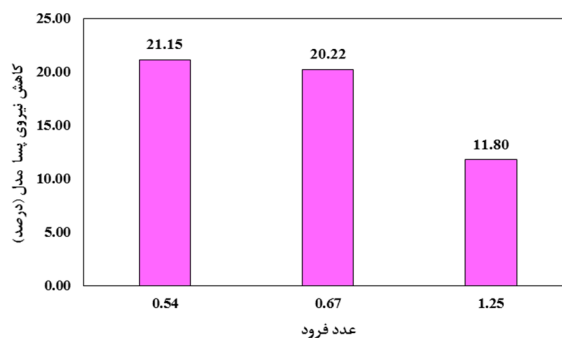


شکل ۱۲. نمای از آزمایشگاه کانال آب کوثر

تست‌ها برای دو حالت مختلف صورت گرفته است. در حالت اول شناور کاتاماران بدون سامانه تزریق حباب و در محدوده سرعت ۱ تا ۴ متر بر ثانیه تست شده و نتایج مربوط به نیروی پسای هیدرودینامیکی با یک لودسل اندازه‌گیری و سپس ثبت شده است. این نتایج در جدول ۲ مشخص شده است. نکته حائز اهمیت این است که عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی نیز محاسبه شده است. دقت محاسبه دو قسمت تجهیزات و پراکندگی داده‌ها قطعی نیست. همچنین به منظور نمایان بودن نحوه تغییرات نیروی پسای با عدد فرود طولی، نتایج به دست آمده در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. داده‌های تجربی مربوط به نیروی پسای هیدرودینامیکی مدل شناور کاتاماران در شرایط همراه تزریق حباب

سرعت مدل (متر بر ثانیه)	عدد فرود مدل	نیروی پسای (نیوتن)	عدم قطعیت
۱/۴۱	۰/۵۴	۰/۴۱	$\pm ۰/۰۰۳$
۱/۷۷	۰/۶۷	۰/۷۳	$\pm ۰/۰۰۵$
۳/۲۸	۱/۲۵	۴/۴۱	$\pm ۰/۰۲۳$



شکل ۱۵. میزان کاهش نیروی پسای هیدرودینامیکی مدل شناور کاتاماران در شرایط همراه تزریق حباب

همان‌طور که از نتایج مشخص است با افزایش عدد فرود میزان قابلیت تزریق حباب در کاهش نیروی پسای یافته است؛ اما به‌طور متوسط در حدود ۱۷ درصد میزان نیروی پسای در گستره سرعتی وسیله کاهش یافته است که نشان‌دهنده قابلیت بسیار بالای این روش در کاهش نیروی پسای است. با توجه به تصاویر تهیه شده با دوربین زیر آب در طول تمامی تست‌ها، حباب‌ها از ناحیه سینه به‌طور کامل تزریق شده و شکل گرفته‌اند. به‌طور نمونه شکل زیر نحوه گسترش حباب‌ها را در ناحیه مرزی مدل در حالت حرکت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است حباب‌ها به خوبی توانسته‌اند در لایه مرزی شکل گرفته و همراه با مدل حرکت نمایند؛ که این مسئله علت کاهش نیروی پسای در گستره سرعتی وسیله است.



شکل ۱۶. حضور حباب‌های تزریقی در لایه مرزی مدل در حال حرکت

۵. نتیجه‌گیری

به‌منظور بررسی چگونگی عملکرد روش تزریق حباب در یک شناور با ابعاد واقعی، پارامترهای زیادی دخیل هستند که

حتماً بایستی لحاظ شوند. یکی از پارامترهای مهم در عملکرد بهینه حباب‌ها عبارت است از پایداری حباب‌ها در کل ناحیه مجاور بدنه شناور، بنابراین در آزمایش‌ها باید طول مدل تا حد امکان بلند انتخاب شود تا حضور و پایداری حباب‌ها در ناحیه سیال اطراف بدنه مورد بررسی قرار گیرد. اگر در فاز طراحی جانمایی تزریق‌کننده‌ها در ناحیه کف شناور در نظر گرفته شود بایستی از میان فرم بدنه‌های معمول، آن فرمی را انتخاب نمود که تا حد امکان بیشتر از سایر فرم‌ها قادر به نگهداری حباب‌ها در زیر بدنه باشد. همچنین به‌منظور دستیابی به نرخ بیشینه کاهش در مقاومت کل، به‌خصوص در شناورهای تندرو باید بدنه را طوری طراحی نمود که کمترین پسای موج‌سازی حاصل شود تا بدین‌صورت با کاهش هم‌زمان نیروی پسای اصطکاکی و موج‌سازی، پسای کل نیز تا حد قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یابد. در این پژوهش تأثیر به‌کارگیری روش تزریق حباب در کاهش نیروی پسای هیدرودینامیکی یک مدل ۱ به ۲۵ از شناور کاتاماران به‌صورت تجربی مطالعه شده است. با توجه به محدوده سرعت عملیاتی نمونه اصلی، تست‌ها در محدوده اعداد فرود ۰/۴۴ تا ۱/۴۸ انجام شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، برای سه عدد فرود ۰/۵۴، ۰/۶۷ و ۱/۲۵ نیروی پسای هیدرودینامیکی به‌ترتیب به میزان ۲۱/۱۵٪، ۲۰/۲۲٪ و ۱۱/۸٪ کاهش یافته است. طبق این نتایج، با افزایش عدد فرود میزان قابلیت تزریق حباب در کاهش نیروی پسای کاهش یافته است. براساس مطالعات تجربی، نرخ کاهش نیروی پسای اصطکاکی به میزان بسیار زیادی به کسر تمرکز حباب‌ها، اندازه و درنهایت پایداری حباب‌ها در لایه مرزی وابسته است. با افزایش عدد فرود، بر اساس مشاهده‌های تجربی موجود در این پژوهش، کسر تمرکز حباب‌ها و پایداری آن‌ها تا حدودی در مقایسه با اعداد فرود پایین‌تر کاهش یافته و به‌این‌ترتیب میزان اثرگذاری روش تزریق حباب در کاهش نیروی پسای وسیله در اعداد فرود بالا کاهش یافته است؛ اما به‌طور متوسط در حدود ۱۷ درصد میزان نیروی پسای در گستره سرعتی ابزار کاهش یافته است که نشان‌دهنده قابلیت بسیار بالای این روش در کاهش نیروی پسای است.

Engineering. 2019; 183: 236–48.

- [12] Elghobashi S. On predicting particle-laden turbulent flows. Applied Scientific Research. 1994; 52(4): 309-22.
- [13] Prasanta KS. CFD prediction of the resistance of a catamaran with staggered demi hulls. Paper Presented at: International Conference in Marine hydrodynamic; 18-23 Sep 2006; Egmond aan Zee, Netherlands.
- [14] Cyro HJ. Tech Brief and Manual fabrication of Plexigalsses. Black Stone Industries Inc; 2005.

پی‌نوشت

1. Mac Cormick
2. Bhattacharyya
3. Begdevich
4. Pal
5. Guin
6. Takahashi
7. Kodama
8. Merkle
9. Takunaga
10. Kato
11. Watanabe
12. Meng
13. Ulman
14. Mäkiharju
15. Jang
16. Zhang
17. Hao
18. Pelexi Glass

منابع

- [1] Yunqing G, Tao L, Jiegang M, Zhengzan S, Peijian Z. Review Article Analysis of Drag Reduction Methods and Mechanisms of Turbulent. Applied Bionics and Biomechanics. 2017; Vol. 2017.
- [۲] جهانمیری محسن، بحرینی عبدالرسول. روش‌های نوین کاهش نیروی درگ اجسام غوطه‌ور در سیال. مجله مهندسی مکانیک. ۱۳۹۰؛ (۸۱): ۱۴-۲۷.
- [3] McCormic ME, Bhattacharyya R. Drag Reduction of Submersible Hull by Electrolysis. Naval engineering journal. 1973; 85: 11–16.
- [4] Insel M, Gokcay S, Helvacioğlu IH. Flow Analysis of an Air Injection through Discrete Air Lubrication. Paper Presented at: International Conference on Ship Drag Reduction; 2010; Istanbul, Turkey.
- [5] Kazuyasu S, Kawamura T, Takagi S, Matsumoto Y. Numerical simulation on Drag Reduction Mechanism by Microbubbles. Ship performance division. National maritime Tokyo. 181-0004, Japan.
- [6] Kato H, Yamaguchi H, Maeda M, Miyanaga M. Skin friction reduction by microbubbles Journal of Marine Science and Technology. 1996;5(1): 241–54.
- [7] Hassan YA, Ortiz-villafuctte J. Experimental study of microbubble drag reduction using particle image velocimetry. Paper Presented at: 11th international symposium on application of laser techniques to fluid mechanics; 2002 July 8-11; Lisbon, Portugal.
- [8] Mäkiharju SA, Perlin M, Ceccio SL. On the energy economics of air lubrication drag reduction. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2012 Dec 1;4(4):412-22.
- [9] Jang J, Choi SH, Ahn SM, Kim B, Seo JS. Experimental investigation of frictional resistance reduction with air layer on the hull bottom of a ship. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2014 Jun 1;6(2):363-79.
- [10] Zhang J, Yang S, Liu J. Numerical investigation of a novel device for bubble generation to reduce ship drag. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2018 Sep 1;10(5):629-43.
- [11] Hao WU, Yongpeng O, Qing YE. Experimental study of air layer drag reduction on a flat plate and bottom hull of a ship with cavity. Ocean