

# تحقیق پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی عددی جریان غیر کاویتاسیونی و کاویتاسیونی حول پروانه‌ی استاندارد DTMB4119

احمدرضا ایوبی\* (کارشناس ارشد)

سعید خردمند (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مهندسی مکانیک شریف، بهار ۱۳۹۵ (۱۳۸-۱۱۹-۳۲-۳)  
دوری ۳-۳، شماره ۱، ص. ۱۱۹-۱۲۸

در این نوشتار جریان‌های غیر کاویتاسیونی و کاویتاسیونی حول پروانه‌ی دریایی DTMB4119 با روش RANS سه‌بعدی حل شده است. ضرایب تراست، گشتاور و بازدهی نیز برای این پروانه در هشت شبیه‌سازی استخراج و با نتایج تجربی مقایسه شد. الگوی کاویتاسیون مشخص شد و موقعیت و منطقه‌ی توسعه‌ی حفره نیز به دست آمد. به علاوه، تحقیقات عددی برای سه پارامتر مهم: ضریب پیشروی، عمق کاری پروانه و زبری سطح پروانه در جریان کاویتاسیونی انجام شد. مطالعه‌ی اثر ضریب پیشروی روی سطح پروانه نشان داد که با ضریب پیشروی کم‌تر، مقدار فاز بخار بیشتری مشاهده می‌شود. با پایین بردن عمق کاری پروانه در شرایط آب آزاد (افزایش فشار هیدروستاتیک)، جابه‌جایی محدوده‌ی حفره، تغییرات حجم حفره در نزدیکی لبه‌ی حمله، و کاهش قله‌ی منحنی کسر حجمی فاز بخار مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، افزایش ارتفاع زبری تا مقدار معینی، باعث کاهش مقدار کسر حجمی فاز بخار شد و پس از آن رشد کرد.

**واژگان کلیدی:** جریان کاویتاسیونی، عمق کاری پروانه، ارتفاع زبری سطح، مرز حفره.

ahmadreza.ayooobi@gmail.com  
kheradmand@mut-es.ac.ir

## ۱. مقدمه

جدید، جریان‌های پیچیده‌تری را اطراف این پیشرانه‌ها مطرح می‌کند و سختی‌های زیادی را برای بررسی و طراحی پیشرانه‌ی شناورها و تحلیل آن‌ها به وجود می‌آورد. تحلیل و بررسی پروانه‌ی طراحی شده در شرایط معمولی و بحرانی به منظور ارزیابی این پیچیدگی‌ها و عکس‌العمل پروانه در تحقق مازومات طراحی ضروری است. در سال‌های اخیر برای بررسی و مدل‌سازی جریان و شبیه‌سازی کاویتاسیون روی پروانه از روش‌های متفاوتی از قبیل پنل،<sup>[۷]</sup> المان مرزی<sup>[۹-۱۲]</sup> و کدهای RANS<sup>[۱۳]</sup> استفاده شده است. در یک تحقیق آزمایشگاهی که روی جریان آرام و مغشوش در نزدیکی یک پره‌ی پروانه و با استفاده از لیزر داپلر ولوسیمتری<sup>۱</sup> انجام شد،<sup>[۱۴]</sup> اندازه‌گیری جزئیات جریان برای تعیین خصوصیات لزجت نسبت به نظریه‌ی کلاسیک پتانسیل، نشان داد که گذر به اغتشاش لایه‌های مرزی به آرامی در لبه‌ی حمله در وسط وتر پره رخ می‌دهد و نیز لایه‌ی مرزی جریان وسط محدوده<sup>۲</sup> با رفتار دوبعدی معمولی شباهت دارد. از سوی دیگر تحقیق در خصوص برهمکنش لزج - غیرلزج<sup>۳</sup> برای پیش‌بینی اثر لزجت روی عملکرد پیشرانه‌های غیرکاویتاسیونی و کاویتاسیونی<sup>[۱۵]</sup> با استفاده از پیوند پتانسیل کم‌مرتب‌ی سه‌بعدی مبتنی بر روش المان مرزی و روش تحلیلی لایه‌ی مرزی انتگرالی دوبعدی مبتنی بر فرض نظریه‌ی نواری برای شبیه‌سازی انجام شد. بدین منظور از مدل نفوذ دیواره برای پیوستن جریان خارجی غیر لزج با جریان‌های لایه‌ی مرزی داخلی استفاده شد و جریان‌های

پدیده‌ی کاویتاسیون به لحاظ رفتار ناخوشایند و نیز بروز آن در زمینه‌های متفاوت - از زیردریا<sup>[۱]</sup> تا راکت‌های فضایی<sup>[۲]</sup> و حتی در بدن انسان<sup>[۳]</sup> - برای طراحان و محققان، همیشه نگران‌کننده بوده است. عموماً طبیعت کاویتاسیون شامل رشد دوره‌ی و ترکیب حفره‌ها، ایجاد نویز<sup>[۴]</sup> نوسان فشار روی بدنه و نیروهای لرزشی روی شفت پروانه<sup>[۵]</sup> است. بسته به شرایط کاری - نظیر سرعت شناور، عمق غوطه‌وری و سرعت دورانی پروانه، شرایط مانور شناور و غیره - پروانه انواع متفاوتی از کاویتاسیون، از قبیل کاویتاسیون لایه‌ی، حبابی، ابری، پیچشی نوک پره و پیچشی هاب را تجربه می‌کند. بروز فروپاشی حفره‌ی باعث ایجاد فشار شدید در نزدیکی پره‌ی پروانه و همچنین روی وسایل هیدرودینامیکی دیگر (مثل سکان) در پایین دست آن می‌شود. این فشارها اغلب منجر به چاله‌کنی و سایش جدی روی پره‌ی پروانه و سکان<sup>[۶]</sup> می‌شود. به علاوه، نوسانات فشار بیش از اندازه روی بدنه می‌تواند موجب نویز و حتی شکست قطعات بدنه شود.

برای برآوردن نیازمندی‌هایی چون: عملکرد خوب (کارایی بالا)، راحتی (مقدار نویز و لرزش کم)، امنیت و بهره‌برداری اقتصادی (سایش کم‌تر) پیشرانه‌های دریایی با هندسه‌های پیچیده‌تر طراحی می‌شوند. پیچیدگی مشخصات هندسی پیشرانه‌های

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۷/۹، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۲/۱۸، پذیرش ۱۳۹۴/۱/۱۵.

غیرکاویتاسیونی و کاویتاسیونی پیش‌رانه‌های یک یا چند جزئی (مسائل جریان خارجی) از قبیل هیدروفویل دوبعدی و سه‌بعدی، داکت تنها و همراه با پیش‌رانه و واترجت‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه‌ی مذکور نشان داد که این روش در حل جریان بین قسمت‌های ثابت و چرخان<sup>۱۶</sup> جت‌آب همگرایی سریعی دارد و نتایج با فضای گسسته شده وابستگی کمی دارند. در بررسی جریان متلاطم کاویتاسیونی ناپایدار اطراف یک پروانه‌ی دریایی با اندازه‌ی کامل پروانه در دنباله‌ی غیریکنواخت کشتی<sup>۱۶</sup> به‌منظور شبیه‌سازی از معادلات ناویر-استوکس لزج، مدل اغتشاشی  $SST - \omega - K$  و مدل کاویتاسیونی انتقال جرم استفاده شد، و عملکرد پروانه و ویژگی‌های ناپایداری جریان اغتشاشی کاویتاسیونی با نتایج آزمایشگاهی تطبیق داده شد. نتایج این تحقیق علت تناوبی بودن توسعه‌ی حفره شامل آغاز کاویتاسیون، رشد، انقباض نزدیک نوک پره‌ی پروانه را جریان ورودی غیریکنواخت، دنباله و اثر گرانش ارائه کرد.

در مطالعه‌ی دیگر و براساس نظریه‌ی جریان ویسکوز چندفازی با شبکه‌ی هیبرید و شبکه‌بندی لغزنده، محققین به‌منظور تخمین فشار، سرعت و کسر حجمی فاز بخار با دنباله‌ی یک جریان ورودی یکنواخت، از معادلات ناویر - استوکس ناپایدار و دینامیک حساب بهره گرفتند.<sup>۱۷</sup> نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که کاویتاسیون گردابی نوک مهم‌ترین عامل در تولید نوسان فشار درون دنباله‌ی آن است، و مشخصاتی از قبیل نرخ فرکانس پره و شفت حاصل از فشار پروانه‌ی درون دنباله با پارامترهای هندسی مدل برابر است. همچنین نشان داده شد که با افزایش فاصله از دیسک پروانه، سیگنال‌های فشاری نزدیک فرکانس پره کاهش می‌یابد و روند تضعیف با کاهش ضریب پیشروی و عدد کاویتاسیون سریع‌تر می‌شود.

با استفاده از روش معادلات ناپایدار ناویر - استوکس لزج جریان کاویتاسیونی اطراف پروانه‌ی اسکیدار بررسی<sup>۱۳</sup>، و برای معادلات اغتشاشی از مدل  $k - \epsilon$  و برای انتقال جرم فاز بخار نیز از مدل اصلاح‌شده‌ی ZGB<sup>۱۸</sup> استفاده شد. مطالعه‌ی اثر زاویه‌ی اسکیدو روی کاویتاسیون و عملکرد ناپایداری‌های کاری پروانه در دنباله‌ی غیر یکنواخت نشان داد که مدل کاویتاسیون اصلاح‌شده‌ی ZGB برای این مسئله شبیه‌سازی بهتری انجام داده و زاویه‌ی اسکیدو  $20^\circ$  درجه بهترین انتخاب برای این دنباله‌ی پاشنه‌ی طراحی شده با نیروی جلوبرنده مشخص شده است که کم‌ترین نوسانات نیرو را نیز دارد.

محققین از جریان اغتشاشی کاویتاسیونی ناپایدار در اطراف یک پروانه‌ی دریایی مرسوم در دنباله‌ی غیریکنواخت برای تخمین نوسانات فشار تحریک شده استفاده کرده<sup>۱۹</sup> و شبیه‌سازی پروانه‌ی کاویتاسیونی را براساس معادلات ناویر - استوکس با مدل کاویتاسیونی انتقال جرم (مدل  $SST - \omega - K$ ) و با استفاده از شبکه‌بندی لغزنده انجام دادند. نتایج حاصله نشان‌گر ارتباط بین نوسانات فشار و الگوی تغییر کاویتاسیون در ورود پره‌ها به رژیم سرعت زیاد دنباله بود. به‌گفته‌ی آنان شتاب ناشی از تغییر حجم حفره، منبع اصلی نوسانات فشار تحریکی به‌وسیله‌ی کاویتاسیون پروانه است. در طی بسط یک الگوریتم ضمنی فشاریایه برای محاسبه‌ی جریان‌های کاویتاسیونی دوفازی<sup>۲۰</sup> یک معادله‌ی تصحیح فشار برای قانون بقای جرم استخراج و روش پیوند فشار - سرعت برای حل معادلات حاکم جریان مورد استفاده قرار گرفت. در این فرایند، هر دو جریان کاویتاسیون جزئی و سوپر برای ارزیابی این روش و تحقیق خصوصیات ناپایدار جریان‌های کاویتاسیونی شبیه‌سازی شد. به‌گفته‌ی محققین جت‌های برگشتی قوی روی اشیاء استوانه‌یی دماغه صاف برای تمامی شبیه‌سازی جریان‌های کاویتاسیونی وجود دارد. آنها نشان دادند که برای جریان‌های کاویتاسیونی جزئی، جت‌های برگشتی به‌طور متناوب ظاهر می‌شوند و علت اصلی جدايش کاویتاسیون هستند؛ برای جریان‌های سوپرکاویتاسیون، جت‌های برگشتی اساساً با جریان‌های دنباله‌ی شیء اثر متقابل دارند.

پژوهش‌گران برای محاسبه‌ی نوسانات فشار القای کاویتاسیون پروانه<sup>۸</sup> از یک روش محاسباتی دو مرحله‌یی: ۱. محاسبه‌ی کاویتاسیون لایه‌یی پروانه، ۲. محاسبه‌ی نوسانات فشار روی پاشنه‌ی کشتی استفاده کردند؛ تحقیق آنها مبتنی بر روش ساده‌ی پنل صفحه‌یی SQCM است که در آن شرط کاتا به‌راحتی ارضاء شد. در اولین مرحله، شکل حفره به‌وسیله‌ی شرط مرزی و براساس نظریه‌ی خط جریان آزاد تعیین شد. برای دست‌یابی به شکل دقیق حفره‌ی نزدیک نوک پره‌ی پروانه، مؤلفه‌ی جریان عرضی روی شرط مرزی در نظر گرفته شد. در مرحله‌ی بعدی، از کاویتاسیون پروانه و جریان صفحه‌یی بدنه به‌طور همزمان برای محاسبه‌ی نوسانات فشار شامل اثر متقابل پروانه و بدنه، استفاده شد. محققین در ارائه‌ی هیدرودینامیک کاویتاسیون و طیف نویز فرکانس کوتاه کاویتاسیون سه پروانه هفت‌پره‌یی با اسکیدی زیاد و با جریان ورودی غیر یکنواخت<sup>۲۱</sup>، مقیاس‌گذاری نتایج آغاز کاویتاسیون پروانه و هیدروکوستیک کاویتاسیون از آزمون‌های مدل به مقیاس کامل پروانه و بازتاب اثرات هسته‌ها روی کاویتاسیون در روش‌های عددی را هدف گرفتند. آنها یک ارتباط عددی بین شبیه‌سازی لزج چندفازی هیدرودینامیک کاویتاسیون پروانه با هیدروکوستیک آن برقرار کردند و اثر مقیاس‌ها را روی عملکرد و قابلیت قانون مقیاس‌گذاری حاضر بررسی کردند.

هدف از بررسی شبیه‌سازی عددی جریان کاویتاسیونی اطراف دو پروانه‌ی سیار اسکیدار روی یک شفت منحرف<sup>۲۲</sup> عبارت است از: ۱. آزمایش توانایی روش عددی آنها در تشخیص تغییرات ویژگی‌های جریان به‌سبب طراحی‌های متفاوت پره‌ها؛ ۲. بهبود دانش فیزیکی که رشد و ترکیب کاویتاسیون را کنترل می‌کند و به تولید نویز و سایش کاویتاسیون روی این نوع پروانه‌ها می‌پردازد. آنها از شبیه‌سازی گرداب بزرگ<sup>۵</sup> همراه با اجرای حجم سیال<sup>۶</sup> در این تحقیق استفاده کردند و نشان دادند که در روش اخیر تحلیل تفاوت اصلی در ویژگی‌های جریان به‌سبب تناوب نسبتاً کم طراحی امکان‌پذیر است. به‌علاوه، با برخورداری از شبکه‌ی مناسب، شبیه‌سازی گرداب بزرگ توانایی نشان دادن سازوکارهای مهم در توسعه‌ی کاویتاسیون را دارد؛ شبیه‌سازی عددی یک مکمل واقعی برای آزمایشات طراحی پیشرفته‌ی پروانه است. در پروانه‌های دریایی که در شرایط بارگذاری سنگین قرار می‌گیرند، کاویتاسیون گردابی نوک پره‌ها زودتر از دیگر انواع کاویتاسیون تولید می‌شود. در نوک پره با وجود جریان ثانویه که می‌تواند باعث کاهش اوج مکش محلی در لبه‌ی حمله شود، بدون متأثر کردن میزان تراست و گشتاور پروانه، کاویتاسیون لبه حمله را به تأخیر می‌اندازد. بعد از آن، رایج‌ترین نوع کاویتاسیون و منبع اصلی نویز<sup>۲۳</sup> «کاویتاسیون لایه‌یی» است. در تحقیق حاضر به بررسی کاویتاسیون لایه‌یی پرداخته‌ایم.

تا پیش از این کاویتاسیون بر پروانه با استفاده از شکل‌های فاز بخار و حفره‌ی تشکیل شده روی سطوح پروانه مورد بررسی قرار گرفته است. اما موقعیت دقیق حفره و مساحت آن، و نیز مقطع تشکیل حفره و جهت و مقدار پیشرفت آن با استفاده از تغییر پارامترهای مهم از قبیل ضریب فشار، عمق کاری و زبری سطوح بررسی نشده است. با توسعه و پیشرفت علوم، نیازمندی‌های حل مسائل توسعه می‌یابد و بر پیچیدگی‌های مسائل نیز می‌افزاید و این، بررسی حداکثر جزئیات و پارامترها را ضروری می‌کند. به‌همین علت، تحقیق حاضر با استفاده از پارامتر ضریب فشار انجام شده است زیرا می‌تواند تغییرات فشار روی سطوح پروانه را منعکس سازد و با دقت مکان و موقعیت و مساحت حفره‌ی تشکیل شده روی هر مقطع و جهت پیشرفت حفره با تأثیر پارامترهای دیگر را نشان دهد.

در مطالعه‌ی حاضر با استفاده از روش معادلات ناویر - استوکس لزج، جریان غیرکاویتاسیونی و کاویتاسیونی حول پروانه‌ی استاندارد DTMB4119 شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی شده است. پارامترهای انتگرالی (ضرایب نیروی تراست، گشتاور و

جدول ۱. ثابت‌های مدل اغتشاشی  $\varepsilon - k$  [۲۱]

مقدار	ثابت
۱٫۴۴	$C_{1\varepsilon}$
۱٫۹۳	$C_{2\varepsilon}$
۰٫۰۹	$C_\mu$
۱٫۰	$\sigma_k$
۱٫۳	$\sigma_\varepsilon$

فازها در روش حاضر استفاده می‌شود. این معادلات با به‌کارگیری اطلاعات تجربی در رابطه‌های ترکیبی بسته می‌شوند. معادله‌ی پیوستگی جریان کاویتاسیونی عبارت است از:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (5)$$

که در آن اندیس  $m$  مربوط به آن متغیر در مدل مخلوط است. معادله‌ی مومنتم برای حل جریان کاویتاسیونی با جمع معادلات جداگانه‌ی مومنتم برای هر فاز به دست می‌آید. بنابراین معادله‌ی آن را می‌توان چنین نوشت:

$$\frac{\partial (\rho_m \vec{v}_m)}{\partial t} + \vec{v}_m \cdot \nabla \rho_m \vec{v}_m = -\nabla p + \mu_m \nabla^2 \vec{v}_m + F + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \quad (6)$$

که در آن  $p$  نشان‌گر فشار برحسب پاسکال و  $\alpha_k$  کسر حجمی فاز  $k$  است. سرعت متوسط جرمی، چگالی مخلوط، لزجت مخلوط و سرعت رانش فاز  $k$  به ترتیب براساس رابطه‌های ۷ تا ۱۰ تعریف می‌شوند:

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (7)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (8)$$

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (9)$$

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (10)$$

در رابطه‌ی ۱۰،  $\vec{v}_k$  سرعت فاز  $k$  است. انتقال جرم بین دو فاز مایع و بخار با معادله‌ی مدل کامل کاویتاسیون پیشنهادی سینگ‌هال [۲۲] تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial (\rho_m f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_v f) = \nabla \cdot (\gamma \nabla f) + R_e - R_c \quad (11)$$

که در آن  $f$  کسر حجمی فاز بخار،  $\vec{v}_v$  بردار سرعت فاز بخار، و  $\gamma$  ضریب معاوضه‌ی مؤثر است. با در نظرگیری معادله‌ی کاهش یافته‌ی رایلی - پلست<sup>۷</sup> و روش سینگ‌هال مبنی بر بیشینه بودن قطر حباب نمونه، پارامترهای  $R_e$  و  $R_c$  با رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب با عنوان‌های نرخ تولید بخار و چگالش تعریف می‌شوند:

$$R_e = \frac{c_e \sqrt{k_t}}{\sigma_s} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p_v - p)}{3\rho_l}} (\gamma - f_v - f_g), \quad p > p_v \quad (12)$$

$$R_c = \frac{c_c \sqrt{k_t}}{\sigma_s} \rho_l \rho_l \sqrt{\frac{2(p - p_v)}{3\rho_l}} f_v, \quad p < p_v \quad (13)$$

عملکرد) و جزئی (ضریب فشار) این شبیه‌سازی استخراج و با داده‌های آزمایشگاهی موجود [۱۴] اعتبارسنجی شده که تطابق نسبتاً خوبی به دست آمد. شبیه‌سازی عددی کاویتاسیون با استفاده از مدل کاویتاسیون کامل سینگ‌هال [۲۴] در عدد کاویتاسیون  $1.7 \times 10^2$  حول این پروانه انجام، و با استفاده از پارامتر ضریب فشار با نتایج سان [۱۵] اعتبارسنجی شد که حاصل مقایسه‌ها رضایت‌بخش بود. همچنین پارامترهای مرتبط با پدیده‌ی کاویتاسیون استخراج شد. در این تحقیق بررسی اثرات سه پارامتر مهم - شامل ضریب پیشروی، عمق کاری پروانه و زبری سطوح پروانه - در موضوع کاویتاسیون با بررسی نقطه به نقطه و لحاظ کردن عکس‌العمل‌های ضریب فشار انجام گرفت. مشخصات حفره از قبیل حجم، موقعیت مرکز حفره و جابه‌جایی‌های آن متأثر از پارامترهای تحت بررسی در شرایط متفاوت با نمودارهای مربوطه مورد بحث و مقایسه قرار گرفت. به علاوه، رابطه‌ی پیشنهادی در موضوع کاویتاسیون [۲۵] برقرار شد.

## ۲. معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی جریان سیال با روش دینامیک سیالات محاسباتی، از معادلات بقاء جرم، ناوبر - استوکس [۲۶] و نیز معادلات اغتشاشی  $\varepsilon - k$  [۲۷] استفاده می‌شود. معادله‌ی بقاء جرم یا معادله‌ی پیوستگی عبارت است از:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه  $\rho$  معرف چگالی با واحد کیلوگرم بر متر مکعب و  $\vec{v}$  بردار سرعت برحسب متر بر ثانیه است. بقاء حرکت در دستگاه مرجع اینرسی معروف به معادلات ناوبر - استوکس [۲۶] است:

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \rho \vec{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + F \quad (2)$$

که در آن  $\mu$  معرف لزجت دینامیکی برحسب متر مربع بر ثانیه، و  $F$  نیروهای خارجی است. برای شبیه‌سازی اثر اغتشاشات در این تحقیق از مدل استاندارد  $\varepsilon - k$  [۲۷] استفاده شده است. این مدل به‌عنوان یک مدل کاربردی دومعادله‌ی در شبیه‌سازی‌های اخیر محققین کاربرد فراوان داشته است. [۱۳، ۲۰-۲۲] انرژی جنبشی اغتشاشی و نرخ اتلاف آن از رابطه‌های ۳ و ۴ به دست می‌آید:

$$\frac{\partial (\rho k_t)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k_t \vec{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu_{lam} + \frac{\rho v_t}{\sigma_k} \right) \nabla k_t \right] + \rho v_t G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

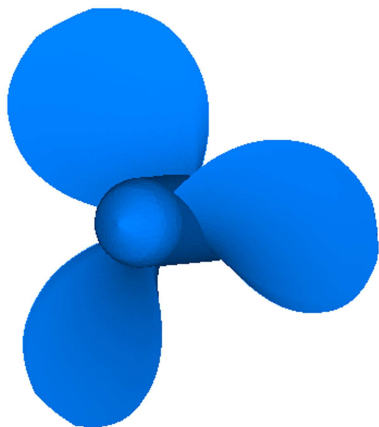
$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu_{lam} + \frac{\rho v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \rho v_t G \frac{\varepsilon}{k_t} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k_t} \quad (4)$$

در این رابطه‌ها،  $k_t$  انرژی جنبشی اغتشاشی،  $v_t$  عبارت کلموگراف - پراتنل،  $G$  نرخ تولید اغتشاش، و  $\varepsilon$  نرخ اتلاف انرژی جنبشی است. مقدار ثابت‌های این مدل در جدول ۱ آمده است.

در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی جریان کاویتاسیونی حول پروانه از روش اولیری - اولیری استفاده می‌شود. در این روش، فازهای بخار و مایع به‌وسیله‌ی معادلات ریاضی به‌صورت درهم نفوذی پیوسته مدل‌سازی می‌شوند. از آنجا که حجم یک فاز نمی‌تواند با دیگر فازها اشغال شود، مفهوم فیزیکی کسر حجمی معرفی می‌شود. کسرهای حجمی توابع پیوسته‌ی از زمان و مکان فرض می‌شوند که جمع آنها برابر با واحد است. بنابراین، از مجموعه معادلاتی با ساختار مشابه برای تمام

جدول ۲. مشخصات هندسی پروانه DTMB۴۱۱۹. [۳۶]

پارامتر پروانه	مقدار پارامتر
قطر (متر)	۰٫۳۰۴۸
تعداد پره	۳
ریک	۰
زاویه‌ی اسکینو	۰
مقطع پره	NACA ۰۰۶۶ $a = ۰٫۸$



شکل ۱. نمایی از پروانه‌ی DTMB۴۱۱۹. [۳۶]

که در آن  $k_v$  برابر ثابت ون‌کارمن با مقدار  $۰٫۴۱۸۷$  است.  $f_r$  تابع زبری است که تعیین‌کننده‌ی کمیت تغییر رهگیری ناشی از اثرات زبری است. این رابطه تابع زبری را در محاسبه‌ی سرعت متوسط نزدیک دیوار با برآورد ارتفاع زبری‌های تحت سه رژیم تأثیر می‌دهد: ۱. رژیم صاف هیدرودینامیکی  $k^+ \leq ۰٫۲۵$ ، ۲. رژیم گذار  $۰٫۲۵ \leq k^+ \leq ۵$ ، ۳. رژیم کاملاً زبر  $k^+ \geq ۵$ .  
برای تشخیص نوع رژیم جریان، از پارامتری بعد زبری براساس رابطه‌ی ۲۲ استفاده می‌شود:

$$k^+ = \rho k_s u^* / \mu \quad (22)$$

که در آن  $k_s$  ارتفاع فیزیکی زبری است.  $u^*$  نیز با رابطه‌ی ۲۳ به دست می‌آید:

$$u^* = c_\mu^{0.25} k_v^{0.75} \quad (23)$$

$c_\mu$  عدد ثابت است که در جدول ۱ مقدار آن آورده شده است. در این تحقیق برای هندسه‌ی پروانه، از مدل استاندارد DTMB۴۱۱۹ [۳۶] استفاده شده است. مشخصات این پروانه در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین در شکل ۱ نمای شماتیک پروانه ثبت شده است.

### ۳. تحلیل نتایج

#### ۳.۱. اعتبارسنجی روش عددی

##### ۳.۱.۱. حل جریان غیرکاویتاسیونی

به منظور اعتبارسنجی روش عددی مورد استفاده، پروانه‌ی DTMB۴۱۱۹ با شرایط آزمایش (ضریب پیشروی و سرعت دورانی) مرجع مورد نظر شبیه‌سازی شده است. برای اعتبارسنجی نتایج این شبیه‌سازی، از نتایج چسوپ [۱۳] استفاده شد. فشار

$c_e$  و  $c_c$  به ترتیب ثابت‌های تجربی با مقدارهای  $۰٫۰۲$  و  $۰٫۰۱$  هستند.  $\sigma_s$  ضریب کشش سطحی،  $p_v$  فشار بخار،  $\rho_l$  و  $\rho_v$  به ترتیب مربوط به چگالی فاز مایع و بخار است.

معادلات حاکم با روش حجم محدود [۲۲] گسسته شده است. از روش SIMPLE برای کوپل سرعت - فشار استفاده شد. مقادیر گسسته‌ی یک مقدار اسکالر در مرکز سلول ذخیره می‌شود. زمانی که مقادیر صفحه‌ی یک مقدار اسکالر برای عبارات جابه‌جایی در معادلات نیاز باشد، از مراکز سلول‌ها برون‌یابی می‌شوند. در این تحقیق از روش اختلاف محدود بالادست<sup>۸</sup> استفاده شده است. وقتی دقت مرتبه دوم مطلوب باشد، کمیت‌ها را در صفحه‌ی سلول‌ها با استفاده از روش نوسازی خطی چندبعدی [۲۳] محاسبه می‌کنند. در این روش، دقت مرتبه بالاتری در صفحه‌ی سلول‌ها با بسط سری تیلور برای حل مرکزی سلول‌ها حول مرکز سلول به دست می‌آید. از روش اختلاف محدود بالادست مرتبه‌ی دوم برای معادله‌ی پیوستگی، مومنتم و مدل اغتشاشی استفاده شد و برای معادله‌ی انتقال جرم (فاز بخار) نیز از روش اختلاف محدود بالادست مرتبه‌ی اول بهره گرفته شد. همچنین عبارات جابه‌جایی، به صورت اختلاف مرکزی با دقت مرتبه دوم گسسته شده‌اند. برای پارامتر فشار در جریان‌های غیرکاویتاسیونی و کاویتاسیونی به ترتیب از روش استاندارد و روش مرتبه‌ی دوم استفاده شده است.

از میان طیف گسترده‌ی پارامترهای عملکردی پروانه، [۲۴] در تحقیق حاضر از پارامترهای ضریب پیشروی، ضریب نیروی جلوبرنده، ضریب گشتاور و ضریب بازدهی استفاده شده است. این پارامترها را به ترتیب براساس رابطه‌های ۱۴-۱۷ تعریف می‌کنند:

$$J = \frac{v_a}{ND} \quad (14)$$

$$k_t = \frac{T_{th}}{\rho N^2 D^5} \quad (15)$$

$$k_q = \frac{Q}{\rho N^2 D^5} \quad (16)$$

$$\eta = \frac{k_t J}{k_q 2\pi} \quad (17)$$

در این رابطه‌ها،  $v_a$  سرعت پیشروی،  $N$  سرعت دورانی،  $D$  قطر پروانه،  $T_{th}$  نیروی تراست، و  $Q$  گشتاور پروانه است. برای محاسبه‌ی ضریب فشار پروانه‌ی DTMB۴۱۱۹ از رابطه‌ی ۱۸ برای هر مقطع استفاده می‌شود:

$$c_p = \frac{p_{abs} - p_0}{\frac{1}{2} \rho v_a^2 \left( 1 + \left( \frac{\pi R_r}{J} \right)^2 \right)} \quad (18)$$

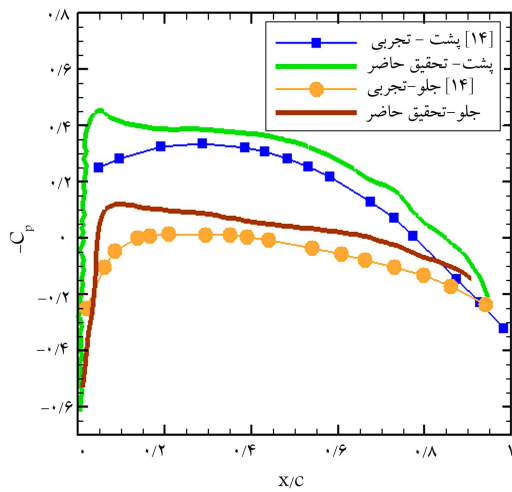
که در آن  $p_0$  و  $p_{abs}$  به ترتیب فشارهای مطلق و کاری، و  $R_r$  نسبت شعاع در پره است. رابطه‌ی تعریفی عدد کاویتاسیون و رابطه‌ی تشخیص شروع کاویتاسیون در تحقیقات عددی [۲۴] به ترتیب عبارت‌اند از:

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho v_a^2} \quad (19)$$

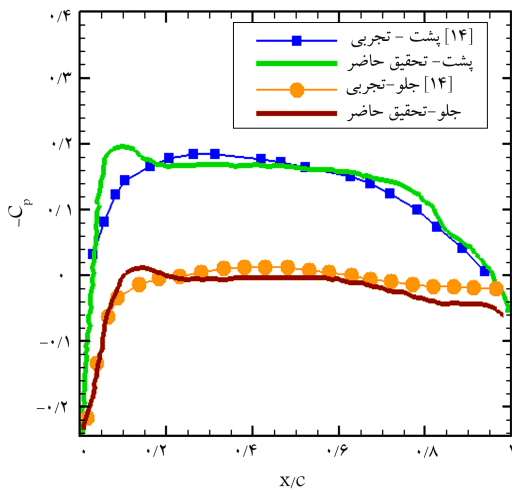
$$\sigma_{vi} = -C_p \quad (20)$$

پارامتر  $\sigma_{vi}$  عدد آغاز کاویتاسیون است. شبیه‌سازی جریان در نزدیکی سطوح پروانه با استفاده از توابع پیشنهادی دیوار [۲۵] انجام می‌گیرد. در این تحقیق برای بررسی اثر زبری سطح پروانه از قانون اصلاح‌شده‌ی دیوار استفاده می‌شود. برای دیدن اثر زبری، تابع ۲۱ به قانون لگاریتمی اضافه می‌شود:

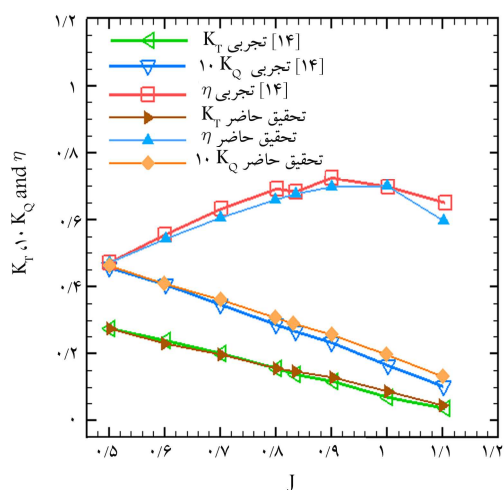
$$\Delta B = \frac{1}{k_v} \ln f \quad (21)$$



شکل ۲. توزیع ضریب فشار برای مقطع  $0.3^\circ$  شعاع برای ضریب پیشروی  $0.833$  در شرایط آزمون آزاد.



شکل ۳. توزیع ضریب فشار برای مقطع  $0.7^\circ$  شعاع برای ضریب پیشروی  $0.833$  در شرایط آزمون آزاد.



شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج ضرایب تراست، گشتاور و بازدهی ۷ شبیه‌سازی در مقابل داده‌های آزمایشگاهی. [۱۴]

اتمسفر برابر  $101325$  پاسکال، چگالی آب خالص برابر  $998.2$  کیلوگرم بر متر مکعب، و ضریب پیشروی معادل  $0.833$  در نظر گرفته شد.

در این شبیه‌سازی از تعداد  $1818604$  شبکه‌بندی بی‌ساختار استفاده شده است. برای استخراج داده‌های ضریب فشار، از مقطع  $0.3^\circ$  و  $0.7^\circ$  شعاع پره استفاده شد و سپس نتایج حاصله با داده‌های آزمایش چسوپ [۱۴] مقایسه شد. در شکل‌های ۲ و ۳ مقایسه‌ی تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی برای مقطع  $0.3^\circ$  و  $0.7^\circ$  شعاع نشان داده شده است. در مقطع  $0.3^\circ$ ، حل عددی حاضر داده‌های بزرگ‌تری را نسبت به مقطع  $0.7^\circ$  تخمین زده است. مقطع  $0.3^\circ$  نزدیک به هاب پروانه است و اثرات لایه‌ی مرزی -- به علت ضخامت بلندتر پروفایل‌ها -- مشهودتر است؛ همچنین به سبب جریان عرضی که نقش مهمی در این ناحیه دارد، تخمین فشار نقطه‌ی بیشتر از مقدار تجربی به دست آمده است. با استفاده از روش حاضر، در انتهای لبه برش کوچکی ایجاد شده که در تحقیقات دیگر محققینی که از این روش استفاده کرده‌اند [۳۷] نیز مشاهده می‌شود. روش حاضر (RANS) به اندازه‌ی کافی اثر ضخامت لایه‌ی مرزی جابه‌جایی روی توزیع فشار ناحیه‌ی نزدیک به لبه‌ی فرار را نزدیک به جریان واقعی نشان نداده است. این روش سرعت‌های جریان عرضی قوی بیرونی (یعنی مؤلفه‌های سرعت شعاعی بیرونی بزرگ) را تخمین می‌زند. این اثرات می‌تواند ناشی از ضخامت ناگهانی لایه‌ی مرزی در لبه‌ی فرار پره باشد که جریان چسبیده را مجبور به خمش و اجتناب از این ناحیه‌ی کم‌انرژی می‌کند. این پدیده با رفتار ضریب اصطکاک روی پره تأیید می‌شود.

در نهایت، ضرایب مهم پروانه از قبیل ضریب تراست، ضریب گشتاور و ضریب بازدهی برای این پروانه با انجام ۷ شبیه‌سازی درگستره‌ی ضریب پیشروی از  $0.5$  تا  $1.1$  در شرایط آزمون آزاد، با نتایج آزمایشگاهی چسوپ [۱۴] مقایسه شد (شکل ۴). چنان که مشاهده می‌شود، قله‌ی منحنی بازدهی با افزایش نسبت گام به قطر به مقدار بزرگ‌تر ضریب پیشروی انتقال می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت گام به قطر، قله‌ی منحنی بازدهی به مقدار بیشتر صعود می‌کند. در پروانه‌ی مورد تحقیق نقطه‌ی طراحی ضریب پیشروی  $0.833$  است.

هر شبیه‌سازی با داده‌های اولیه‌ی متفاوت (سرعت پیشروی‌های متفاوت متناسب با ضریب پیشروی) داده شده است. این داده‌ها نشان‌گر مطابقت روند طی شده با نتایج چسوپ [۱۴] است. در زاویه حمله‌های بزرگ که معادل ضریب پیشروی‌های کوچک‌تر یا بارگذاری سنگین است، نتایج عددی بسیار نزدیک به داده‌های تجربی است.

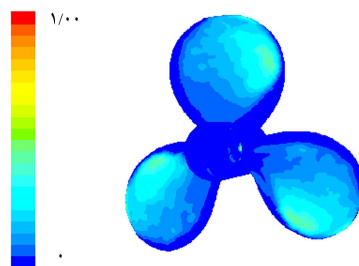
### ۲.۱.۳. حل جریان کاویتاسیونی

یکی از مسائل اصلی در پروانه‌های تحت کاویتاسیون، کاهش تراست است. در ضریب پیشروی ثابت، عدد آغاز کاویتاسیون با افزایش نسبت گام به قطر ارتقاء می‌یابد؛ برای این تحقیق عدد کاویتاسیون  $1.02$  انتخاب شده است. به‌طور کلی، رفتار یک حفره تابعی از بارگذاری و عدد کاویتاسیون است. کاویتاسیون لایه‌ی بر صفحه‌ی جلو و پشت پره‌ها از نوک پره شروع می‌شود و با کاهش عدد کاویتاسیون به سمت شعاع‌های کم‌تر پیش می‌رود. روش حاضر (RANS) طول حفره را در راستای شعاعی بیشتر تخمین می‌زند. [۳۸] که می‌تواند به علت کاویتاسیون نواری باشد که از لبه‌ی حمله شروع می‌شود و تشخیص آن از کاویتاسیون لایه‌ی بر روش عددی بسیار سخت است. [۳۴] برای اعتبارسنجی صحت این شبیه‌سازی در شرایط کاویتاسیونی از نتایج پیشین [۱۵] استفاده شده و ضریب فشار حاصله در این شبیه‌سازی در سه مقطع پره با آن نتایج مقایسه شده است. نتایج بررسی این پدیده مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. با استفاده از مدل مخلوط جریان‌های دوفازی، برای شرایط آزمون آزاد، عدد کاویتاسیون  $1.02$  و در ضریب پیشروی  $0.833$  این شبیه‌سازی انجام

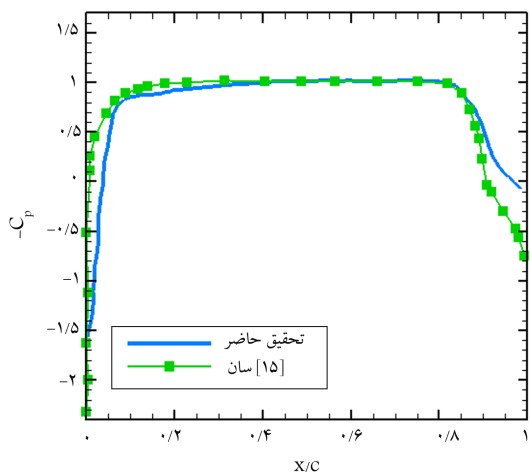
شده است. در شکل ۵ تصویر سه بعدی تشکیل فاز بخار روی صفحات پشت پروانه نشان داده شده است.

در شکل‌های ۶ تا ۸ ضریب فشار روی صفحه‌ی پشت پروانه با سطح مکش که در آن بیشتر کاونتاسیون لایه‌ی شکل می‌گیرد، به ترتیب برای مقطع‌های  $0.613^\circ$ ،  $0.747^\circ$  و  $0.88^\circ$  شعاع نشان داده شده که حدوداً مرزهای محیطی تشکیل حفره‌اند. در این نمودارها، منفی ضریب فشار به عدد  $10^2$  نزدیک شده است. در شکل ۶ مقطع  $0.747^\circ$  شعاع نشان داده شده است. در این مقطع، مقدار کم‌ترین ضریب فشار به عدد کاونتاسیون می‌رسد. بنابراین در نزدیکی لایه حمله، حفره تشکیل شده است. با استفاده از این نمودار در مقدار اعداد برابر با عدد کاونتاسیون شبیه‌سازی، مرزهای حفره را می‌توان تشخیص داد. برای اعتبارسنجی در مقطع  $0.88^\circ$  شعاع و همچنین نزدیک به از بین رفتن حفره، ضریب فشار برای مقطع  $0.88^\circ$  شعاع در شکل ۸ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، مرز پایانی حفره، طول حفره (برابری مقدار ضریب فشار با عدد کاونتاسیون داده شده برای این تحقیق)، و مکان نزدیک به لایه حمله در این نمودار مشخص است.

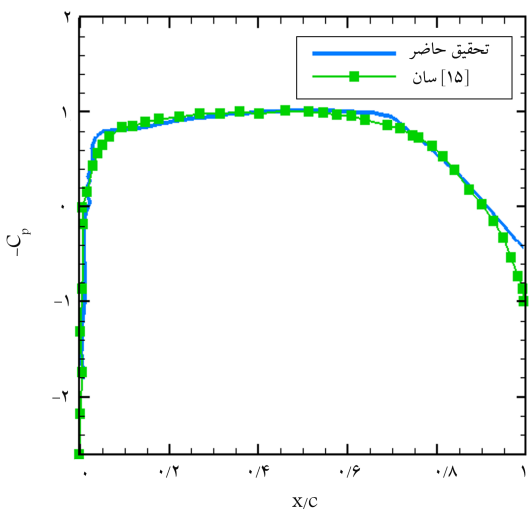
در شکل ۹ (نمودار حجم فاز بخار) محور افقی از صفر تا ۱ به ترتیب لایه‌ی فرار تا لایه حمله نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، به علت داشتن بیشترین مقدار حجم بخار، حدوداً مرکز حفره را می‌توان در مقطع  $0.747^\circ$  شعاع تشخیص داد. از آنجا که معیار شروع و وقوع کاونتاسیون فشار نقطه‌ی است، در مقطع  $0.613^\circ$  و  $0.747^\circ$  شعاع، بیشترین مقدار کسر حجمی (بیشترین قطر حفره) در محل  $0.866^\circ$  وتر، و به ترتیب برابر با  $0.313^\circ$  و  $0.389^\circ$  است؛ در مقطع  $0.88^\circ$  شعاع نیز بیشترین مقدار کسر حجمی فاز بخار در محل  $0.703^\circ$  وتر و برابر با  $0.234^\circ$  است.



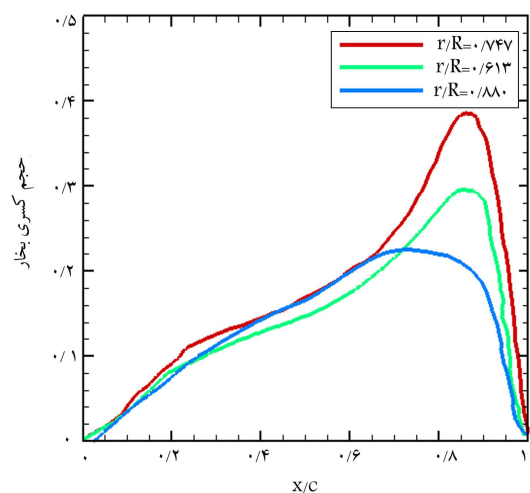
شکل ۵. کسر حجمی فاز بخار روی صفحات پشت پروانه.



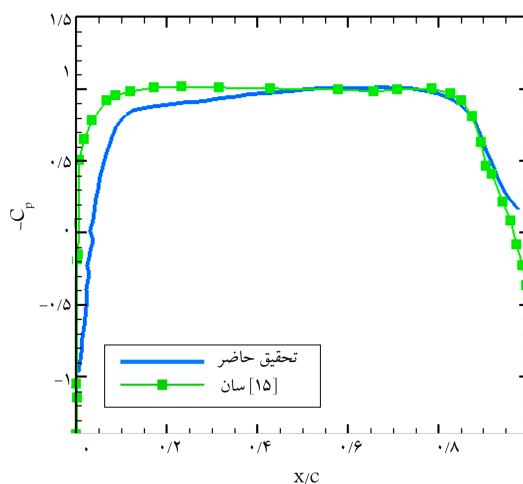
شکل ۷. توزیع ضریب فشار در مقطع  $0.747^\circ$  شعاع، برای ضریب پیشروی  $0.833$  و عدد کاونتاسیون  $10^2$ .



شکل ۸. توزیع ضریب فشار در مقطع  $0.88^\circ$  شعاع، برای ضریب پیشروی  $0.833$  و عدد کاونتاسیون  $10^2$ .



شکل ۹. نمودار حجم بخار برای ضریب پیشروی  $0.833$  و عدد کاونتاسیون  $10^2$ .

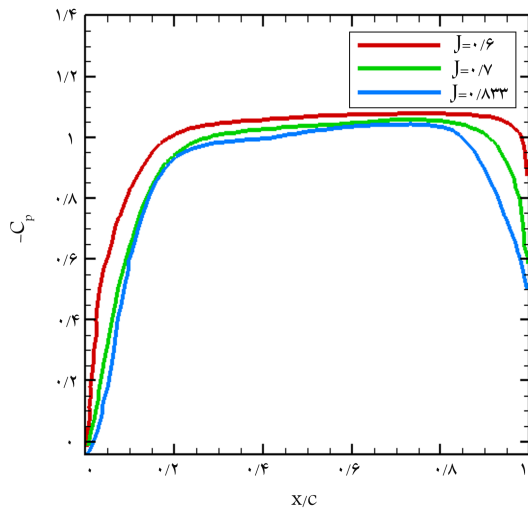


شکل ۶. توزیع ضریب فشار در مقطع  $0.613^\circ$  شعاع، برای ضریب پیشروی  $0.833$  و عدد کاونتاسیون  $10^2$ .

### ۲.۳. مطالعه‌ی پارامترهای مؤثر در کاویتاسیون

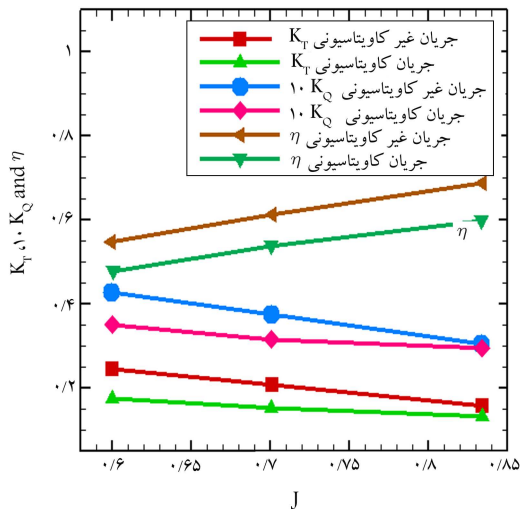
#### ۱.۲.۳. مطالعه‌ی اثر ضریب پیشروی

به منظور مطالعه‌ی اثر ضریب پیشروی برای شرایط بارگذاری سنگین، سه شبیه‌سازی انجام شده است. واضح است که ادامه‌ی افزایش بارگذاری همان‌طور که تقریباً به سمت نوک پره زیاد می‌شود قدرت گردابه‌ی نوک را نیز افزایش می‌دهد. برای تحقیق اثر ضریب پیشروی، سرعت پیشروی را زیاد می‌کنیم. در این مورد هم سرعت دورانی پروانه ثابت در نظر گرفته شده است. سرعت پیشروی برای این تحقیق ۸۳۳، ۸۳۶، ۸۳۹ و ۸۴۲ متر بر ثانیه به ترتیب برای ضریب پیشروی‌های ۰٫۶، ۰٫۷، ۰٫۸۳۳ و ۱ است. در شکل ۱۰ نشان داده شده که در بارگذاری‌های بیشتر (ضریب پیشروی کم‌تر)، ناحیه‌ی تحت کاویتاسیون افزایش می‌یابد. با در نظرگیری سیر حرکت منحنی ضریب فشار در رسیدن به عدد ۱٫۰۲، می‌توان نواحی توسعه‌ی حفره را در مقطع گفته شده مشاهده کرد. بنابراین، در مقطع ۰٫۷۴۷، مرزهای حفره به لبه‌ی حمله نزدیک‌تر می‌شود.



شکل ۱۰. توزیع ضریب فشار در جریان کاویتاسیونی برای مقطع ۰٫۷۴۷ و عدد کاویتاسیون ۱٫۰۲.

برای تبیین فیزیکی اثر افزایش سرعت در افزایش ضریب پیشروی و در نتیجه، کاهش شدت کاویتاسیون روی پره‌ها، می‌توان آن را معادل ثابت نگه داشتن سرعت ورودی و افزایش سرعت دورانی شفت پروانه در نظر گرفت. در این حالت، ضریب پیشروی کاهش می‌یابد و در نتیجه کاویتاسیون افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت دورانی شفت، سرعت محلی روی سطح پره‌ها نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه فشار نقطه‌یی کاهش می‌یابد؛ این نشانه‌ی مساعد شدن شرایط برای افزایش کاویتاسیون است. در نتیجه، افزایش سرعت دورانی منجر به افزایش سرعت محلی، کاهش فشار و نهایتاً افزایش پدیده‌ی کاویتاسیون می‌شود.

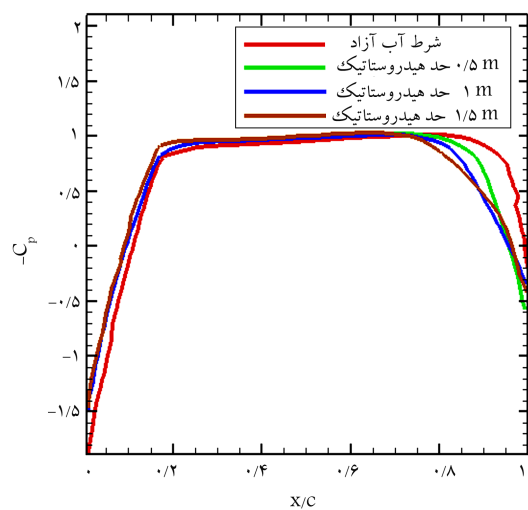


شکل ۱۱. مقایسه‌ی نتایج ضرایب تراست، گشتاور و بازدهی سه شبیه‌سازی جریان غیر کاویتاسیونی در مقابل جریان کاویتاسیونی.

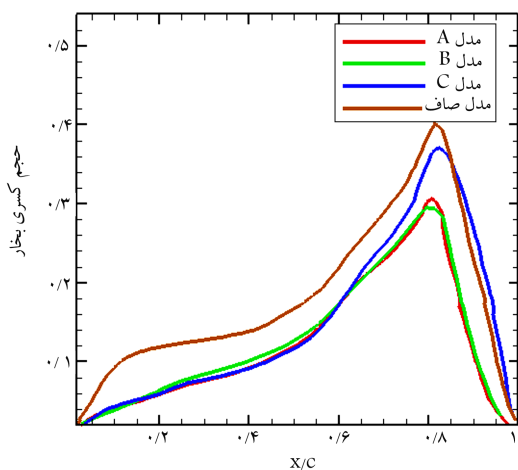
در شکل ۱۱ ضرایب عملکردی این پروانه در دو جریان غیر کاویتاسیونی و کاویتاسیونی نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، با داشتن کاویتاسیون ضرایب کارکردی کاهش یافته و در نتیجه ضریب بازدهی کاهش یافته است. چنان که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب پیشروی اختلاف بین این دو جریان کاهش یافته است و نشان می‌دهد که ضریب پیشروی طراحی در جریان کاویتاسیونی هم خوب جواب داده است و نیز به سمت ضریب پیشروی‌های بزرگ‌تر، کاویتاسیون کم‌تر کاهش یافته است. نواحی نشان داده شده نشان‌گر تشدید کاویتاسیون از ضریب پیشروی ۰٫۷ به پایین است. به‌طور کلی، برای یک فویل بارزا، در زاویه‌ی حمله‌ی کوچک و عدد کاویتاسیون متعادل، پدیده‌ی کاویتاسیون همیشه باعث کاهش برانمی‌شود، زیرا گسترش حفره یعنی رژیم کم‌فشار، به سمت پایین‌دست جریان کاهش بران نزدیک لبه‌ی حمله را جبران می‌کند. بنابراین، طول حفره‌های کوچک‌تر اغلب منجر به ضریب برای کوچک‌تر می‌شود.

#### ۲.۲.۳. مطالعه‌ی اثر عمق

برای بررسی اثر عمق کاری پروانه روی کاویتاسیون لایه‌یی پره‌ها و مشخصات حفره، چهار شبیه‌سازی در ارتفاع‌های متفاوت انجام شد. در شکل ۱۲ ضریب فشار برای این چهار ارتفاع نشان داده شده است. ضریب فشار بر حسب وتر در مقطع ۰٫۷۴۷ برای چهار ارتفاع آب صفر، ۰٫۵، ۱٫۰ و ۱٫۵ متر ارائه شده است. در اولین نمودار، ارتفاعی برای این شبیه‌سازی در نظر گرفته نشده است. این شبیه‌سازی همان شرایط آزمون آزاد آب برای یک پروانه است که در اینجا می‌تواند مقیاسی برای عمق‌های دیگر باشد. چنان که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع آب در بالای پروانه، طول حفره کم می‌شود، به‌طوری که برای ارتفاع آب صفر در محل ۰٫۳۷ متر، وتر، برای ارتفاع آب ۰٫۵ متر در محل ۰٫۸۵ متر، وتر، برای ارتفاع آب ۱ متر در محل ۰٫۷۸ متر، وتر، و برای ارتفاع آب ۱٫۵ متر در محل ۰٫۷۴ متر وتر ضریب



شکل ۱۲. توزیع ضریب فشار در جریان کاویتاسیونی برای مقطع ۰٫۷۴۷.



شکل ۱۴. حجم بخار در مقطع ۰٫۷ شعاع در پشت پره‌ی پروانه در جریان کاونتاسیونی، ضریب پیشروی ۰٫۸۳۳ و عدد کاونتاسیون ۱٫۰۲.

صفر) است. در صورتی که مدل C طول بیشتری نسبت به مدل صاف (بازگشت منحنی از محل ۰٫۸۹ و وتر شروع می‌شود) و مدل‌های A و B دارد (بازگشت منحنی ضریب فشار از محل ۰٫۹ و وتر شروع می‌شود). این تغییرات ضریب فشار بر اثر ارتفاع زبری می‌تواند حالت بهینه‌ی برای داشتن زبری پیشنهاد کند، چنان که محققین<sup>[۳۹]</sup> روی متأثر شدن کاونتاسیون با اندازه‌ی ذرات شن پیشنهاد کردند. بنابراین داشتن یک مقداری زبری شدت کاونتاسیون را روی پره کاهش می‌دهد. با تحقیق بیشتر می‌توان مدل‌های مناسب‌تر را برای کاربرد پروانه‌های دریایی پیدا کرد. در تبیین فیزیکی اثر زبری روی کاونتاسیون می‌توان وقوع آن را روی سطح زبر در پیک کم‌فشار دانست، مخصوصاً به وسیله‌ی نقاط کوچک کاونتاسیون. این نقاط آشکارا به واسطه‌ی المان‌های زبری ایجاد می‌شود و اندازه‌ی آنها از اندازه‌ی المان‌های زبری تجاوز می‌کند؛ این بدان معناست که متوسط فشار در بیرون لایه‌ی مرزی نزدیک به فشار بخار است. در نتیجه می‌توان وقوع جدایش محلی در المان‌های زبری را محرک ایجاد کاونتاسیون دانست.

در شکل ۱۴ حجم فاز بخار روی مقطع ۰٫۷ برای چهار مدل زبری صفر، مدل A، مدل B و مدل C نشان داده شده است. در این شکل، محور افقی از صفر تا ۱ به ترتیب لبه‌ی فرار تا لبه‌ی حمله را نشان می‌دهد. این نمودار برای سه مقطع متفاوت بی‌بعد شده با طول وتر نشان داده شده است. در این شکل با افزایش زبری نسبت به مدل صاف، کاهش کسر حجمی فاز بخار را داریم. در نتیجه می‌توان تا حدودی زبری را پارامتری مفیدی برای کاهش کاونتاسیون دانست. کسر حجمی بخار مدل‌های A و B حدوداً به یک اندازه و برابر مقدارهای ۰٫۳۶ و ۰٫۳۷ است. همچنین منحنی مدل C تا حدود ۰٫۶ و تر با مدل‌های A و B حجم یکسانی را دارد که با مدل صاف (کسر حجمی آن برابر ۰٫۴۸ است) کاملاً متفاوت است و دارای کسر حجمی ۰٫۴۴ است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

دو جریان غیر کاونتاسیونی و کاونتاسیونی حول پروانه‌ی DTMB۴۱۱۹ با روش RANS و مدل انتقال جرم پیشنهادی سینگ‌هال<sup>[۲۴]</sup> شبیه‌سازی شد. برای اعتبارسنجی حل جریان غیر کاونتاسیونی از پارامترهای ضرایب فشار، تراست، گشتاور و بازدهی استفاده شد. همچنین برای اعتبارسنجی حل جریان کاونتاسیونی از

فشار به مقدارهای بیشتر حرکت می‌کند. همچنین افزایش مقدار کم‌ترین ضریب فشار نشان‌گر کاهش کاونتاسیون است. چنان که در شکل نیز مشخص است، انتهای مرزی حفره در بیشترین مقدار عددی ضریب فشار از کم‌ترین آن قرار دارد و از این نقطه، حفره رو به زوال می‌گذارد. علت فیزیکی افزایش ارتفاع آب که باعث کاهش شدت کاونتاسیون می‌شود را می‌توان افزایش فشار هیدروستاتیک دانست که منجر به افزایش اختلاف فشار آن با فشار بخار و نیز افزایش عدد کاونتاسیون می‌شود که این نشان‌دهنده‌ی کاهش حفره و کسر حجمی فاز بخار آب روی پره‌هاست. برای تحقیقات بیشتر می‌توان اثر پارامترها را روی پدیده‌های کاونتاسیون گردابی نوک و هاب تحقیق کرد.

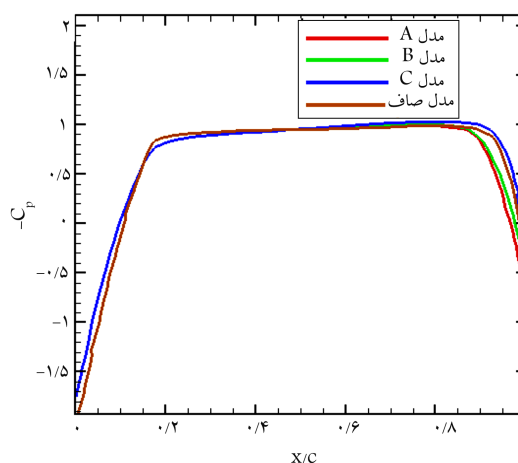
#### ۳.۲.۳. مطالعه‌ی اثر زبری

در این قسمت اثرات پارامتر زبری در ضریب پیشروی ۰٫۸۳۳ با استفاده از تابع تعریف‌شده‌ی زبری که در قسمت معادلات حاکم ارائه شد مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از این تابع، مقادیر تنش برشی، سرعت متوسط و مقادیر اغتشاشی در نزدیکی سطح برآورد می‌شود. فرمول‌های پیشنهادی در این تحقیق<sup>[۳۵]</sup> مبتنی بر داده‌های نیکورادزه اتخاذ شده است. سه مدل ارائه‌شده توسط اندازه‌گیری مقایسه‌کننده‌ی رابرت<sup>[۳۴]</sup> در شبیه‌سازی زبری سطوح پروانه کاربرد داشته است. در جدول ۳ مشخصات این چهار مدل ارائه شده است. در شکل ۱۳ توزیع فشار برای ۰٫۷ شعاع در چهار مدل زبری صفر، مدل A، مدل B و مدل C در پشت پره نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۳ ضریب فشار برای چهار شبیه‌سازی زبری روی پره مقایسه شده است. چنان که مشاهده می‌شود، افزایش طول حفره با افزایش ارتفاع زبری رابطه دارد؛ به طوری که تطابق منحنی ضریب فشار در مقدار ۱٫۰۲ برای مدل C بیشتر از سه مدل دیگر است. نکته‌ی دیگر این که مدل‌های A و B تا حدودی بر هم منطبق‌اند (بازگشت منحنی ضریب فشار از محل ۰٫۸۴۸ و وتر شروع می‌شود) در صورتی که ارتفاع زبری مدل B بیشتر از دو برابر مدل A است.

همچنین طول حفره برای مدل‌های A و B کم‌تر از مدل صاف (ارتفاع زبری

جدول ۳. ارتفاع‌های سطوح زبر برای چهار مدل شبیه‌سازی.<sup>[۳۴]</sup>

مدل	صاف	A	B	C
ارتفاع زبری (میکرومتر)	۰	۶٫۷	۱۴٫۲	۳۱٫۷



شکل ۱۳. توزیع ضریب فشار در جریان کاونتاسیونی برای مقطع ۰٫۷ و عدد کاونتاسیون ۱٫۰۲.



احتمال کاویتاسیون گردابی نوک پره کاهش می‌یابد. بنابراین در مورد این پارامتر، ماندگاری کاویتاسیون گردابی نوک پره بیشتر از کاویتاسیون لایه‌ی است که علت آن را می‌توان به شروع کاویتاسیون گردابی از نوک و گسترش آن به لبه‌ی پره دانست.

-- نتایج بررسی پارامتر زبری سطوح پروانه: با افزایش مقدار زبری سطح پروانه، می‌توان مدل‌های بهینه‌ی را پیدا کرد. مدل‌های A و B مساحت کاویتاسیون کم‌تری نسبت به سطح صاف نشان می‌دهند، در صورتی که در مدل C مساحت کاویتاسیونی افزایش یافته است. با افزایش مقدار زبری سطح پروانه، مقدار کسر حجمی فاز بخار در ابتدا کاهش و با زبرتر شدن سطح رو به افزایش می‌گذارد. در این مورد هم مدل‌های A و B نتایج یکسانی داشته‌اند. به علاوه مساحت تحت کاویتاسیون نسبت به مدل صاف کاهش یافته و برای هر مدل زبری تقریباً ثابت می‌ماند. با افزایش مقدار زبری سطح پروانه، مقدارهای کسر حجمی فاز بخار روی وتر تا حدود ۰٫۶ مقدار ثابتی است اما قله‌ی حفره برای مدل C افزایش می‌یابد.

ضریب فشار در سه مقطع استفاده شد. با استفاده از پارامتر ضریب فشار، مکان‌یابی حفره و محدوده‌ی مرزهای آن انجام شد. کشیدگی طولی حفره در نزدیکی لبه‌ی حمله در محل‌های ۰٫۶۱۳، ۰٫۷۴۷ و ۰٫۸۸ وتر نشان داده شد. برای بررسی پارامترهای مؤثر در شدت کاویتاسیون، شبیه‌سازی‌های جریان کاویتاسیونی با رعایت اثر هر پارامتر خاص به‌طور جداگانه انجام شد که نتایج حاصله عبارت‌اند از:

-- نتایج بررسی پارامتر ضریب پیشروی: با افزایش ضریب پیشروی ناحیه‌ی کاویتاسیونی افزایش می‌یابد و محدوده‌ی حفره (مرزهای آن) بزرگ می‌شود. به علاوه، در بین ضرایب پیشروی ۰٫۸۳۳ و ۰٫۷ نتایج مساحت حفره نسبت به ضریب پیشروی ۰٫۶ کم‌تر است و کاهش آن تا مقدار ۰٫۶ مرزهای حفره افزایش چشم‌گیری داشته است.

-- نتایج بررسی پارامتر عمق آب بالای محور پروانه: با افزایش عمق آب، مساحت حفره کاهش می‌یابد. همچنین، مرکز حفره از لبه‌ی حمله‌ی پره فاصله می‌گیرد و

## پانویس‌ها

1. laser Doppler Velocimetry
2. span
3. viscous/inviscid interaction
4. rotor and stator
5. large eddy simulation (LES)
6. volume-of-fluid (VOF)
7. Rayleigh-Plesset
8. upwind

## منابع (References)

1. Wright, M.M., Epps, B., Dropkin, A. and Truscott, T.T. "Cavitation of a submerged jet", *Experiments in Fluids*, **54**(6), pp. 1-21 (2013).
2. Hattori, Sh., Taruya, K., Kikuta, K. and Tomaru, H. "Cavitation erosion of silver plated coatings considering thermodynamic effect", *Wear*, **300**(1-2), pp. 136-143 (2013).
3. Lee, H., Taenaka, Y. and Kitamura, S. "Mechanism for cavitation in the mechanical heart valve with an artificial heart: Nuclei and viscosity dependence", *Artificial Organs*, **29**(1) pp. 41-47 (2005).
4. Mohammad noori, M., Riahi, M. and Valipour, A. "Using perturbation method to obtain scaled numerical model for analyzing noise of supercavitation", *Modares Mechanical Eng. Journal*, **12**(5), pp. 146-153 (1391).
5. Kinns, R., Thompson, L., Kessissoglou, N. and Tso, Y. "Hull vibratory forces transmitted via the fluid and the shaft from a submarine propeller", *Ships and Offshore Structures*, **2**(2), pp. 183-189 (2007).
6. Paik, B.G., Kim, K.S., Kim, K.Y., Ahn, J.W., Kim, T.G., Kim, K.R., Jang, Y.H. and Lee, S.U. "Test method of cavitation erosion for marine coatings with low hardness", *Ocean Eng.*, **38**(13), pp. 1495-1503 (2011).
7. Ye, J.M. and Xiong, Y. "Prediction of podded propeller cavitation using an unsteady surface panel method", *J. of Hydrodynamics, Ser. B*, **20**(6), pp. 790-797 (2008).
8. Kanemaru, T. and Ando, J. "Numerical analysis of cavitating propeller and pressure fluctuation on ship stern using a simple surface panel method "SQCM"", *J. of Marine Sc. and Tech.*, **18**(3), pp. 294-309 (2013).
9. Behbahani-nejad, M. and Changizian, M., Reduced-order modeling of unsteady partial cavity flows using the boundary element method", *Modares Mechanical Eng. Journal*, **13**(6), pp. 140-152 (1392).
10. Lee, H. and Kinnas, S.A. "Application of a boundary element method in the prediction of unsteady blade sheet and developed tip vortex cavitation on marine propellers", *J. of Ship Research*, **48**(1), pp. 15-31 (2004).
11. Lee, H.S. and Kinnas, S.A. "A BEM for the modeling of unsteady propeller sheet cavitation inside of a cavitation tunnel", *Computational Mechanics*, **37**(1), pp. 41-52 (2005).
12. Young, Y.L. and Kinnas, S.A. "Analysis of supercavitating and surface-piercing propeller flows via BEM", *Computational Mechanics*, **32**(4-6), pp. 269-281 (2003).
13. Liu, Y., Zhao, P.F., Wang, Q. and Chen, Z.H. "URANS computation of cavitating flows around skewed propellers", *J. of Hydrodynamics*, **24**(3), pp. 339-347 (2012).
14. Jessup, S.D. "An experimental investigation of viscous aspects of propeller blade flow", PhD Thesis, The Catholic University of America, Washington DC (1989).
15. Sun, H. "Performance prediction of cavitating propulsors using a viscous/inviscid interaction method", PhD Thesis, The University of Texas at Austin, Austin (2008).
16. Ji, B., Luo, X.W., Wu, Y.L., Liu, S.H., Xu, H.Y. and Oshimab, A. "Numerical investigation of unsteady cavitat-

- ing turbulent flow around a full scale marine propeller”, *J. of Hydrodynamics*, **22**(5), pp. 747-753 (2010).
17. Zhu, Z.F., Fang, S.L. and Wang, X.Y. “Characteristic analysis of unsteady viscous flow around a cavitating propeller”, *Science China Technological Sciences*, **53**(7), pp. 1983-1993 (2010).
  18. Zwart, P.J., Gerber, A.G. and Belamri, T. “A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics”, *International Conference on Multiphase Flow*, Yokohama, Japan (2004).
  19. Ji, B., Luo, X., Peng, X., Wua, Y. and Xu, H. “Numerical analysis of cavitation evolution and excited pressure fluctuation around a propeller in non-uniform wake”, *International J. of Multiphase Flow*, **43**, pp. 13-22 (2012).
  20. Zhang, L.X. and Khoo, B.C. “Computations of partial and super cavitating flows using implicit pressure-based algorithm (IPA)”, *Computers & Fluid*, **73**, pp. 1-10 (2013).
  21. Yang, Q.F., Wang, Y.Sh. and Zhang, Z.H. “Scale effects on propeller cavitating hydrodynamic and hydroacoustic performances with non-uniform inflow”, *Chinese J. of Mech. Eng.*, **26**(2), pp. 414-427 (2013).
  22. Lu, N.X., Bensow, R.E. and Bark, G. “Large eddy simulation of cavitation development on highly skewed propellers”, *Journal of Marine Science and Technology*, **19**(2), pp. 197-214 (2014).
  23. Lee, K., Lee, J., Kim, D., Kim, K. and Seong, W. “Propeller sheet cavitation noise source modeling and inversion”, *Journal of Sound and Vibration*, **333**(5), pp. 1356-1368 (2014).
  24. Singhal, A.K., Athavale, M.M., Li, H. and Jiang, Y. “Mathematical basis and validation of the full cavitation model”, *ASME J. Fluids Eng.*, **124**(3), pp. 617-62 (2002).
  25. Franc, L.P. and Michel, J.M., *Fundamentals of Cavitation*, Kluwer Academic Publishers, New York (2005).
  26. Batchelor, G.K., *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, England (1967).
  27. Launder, B.E. and Spalding, D.B., *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, London, England (1972).
  28. Kim, S., Choi, Ch., Kim, J., Park, J. and Baek, J. “Tip clearance effects on cavitation evolution and head breakdown in turbopump induce”, *J. of Propulsion and Power*, **29**(6), pp. 1357-1366 (2013).
  29. Kellett, P., Turan, O. and Incecik, A. “A study of numerical ship underwater noise prediction”, *Ocean Eng.*, **66**, pp. 113-120 (2013).
  30. Yue, Ch., Guo, Sh. and Shi, L. “Hydrodynamic analysis of the spherical underwater robot SUR-II”, *International J. of Advanced Robotic Sys*, **10**, pp. 1-12 (2013).
  31. Launder, B.E. and Spalding, D.B. “The numerical computation of turbulent flows”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Eng.*, **3**, pp. 269-290 (1974).
  32. Coutier-Delgosha, O., Deniset, F., Astolfi, J.A. and Leroux, J.B. “Numerical prediction of cavitating flow on a two-dimensional symmetrical hydrofoil and comparison to experiments”, *ASME J. Fluids Eng.*, **129**(3), pp. 279-292 (2007).
  33. Barth, T.J. and Jespersen, D. “The design and application of upwind schemes on unstructured meshes”, AIAA 27th Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada (1989).
  34. Carlton, J., *Marine Propeller and Propulsion*, 2nd e., Elsevier Ltd, USA (2007).
  35. Cebeci, T. and Bradshaw, P., *Momentum Transfer in Boundary Layers*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington D.C. (1977).
  36. Ghassemi, H. “A study on hydrodynamic analysis of propellers and cavitation prediction of hydrofoils by the application of surface panel method”, PhD Thesis, Yokohama National University, Yokohama, Japan (1997).
  37. Villa, D., Gaggero, S. and Brizzolara, S. “RANS and PANEL method for unsteady flow propeller analysis”, *9th International Conference on Hydrodynamics*, Shanghai, China (2010).
  38. Bertetta, D., Brizzolara, S., Canepa, E., Gaggero, S. and Viviani, M. “EFD and CFD characterization of a CLT propeller”, *International J. of Rotating Machinery*, **2012**, pp. 1-22 (2012).
  39. Wu, J.H. and Gou, W.J. “Critical size effect of sand particles on cavitation damage”, *J. of Hydrodynamics, Ser. B*, **25**(1), pp. 165-167 (2013).