

ISME2019-1275

مقایسه‌ی مدل‌های آشفته‌گی و بررسی اثر کاویتاسیون بر ضرایب هیدرودینامیکی جریان روی

هیدروفویل ناکا 0015

مریم صابری نیا¹، محمود پسندیده فرد²

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه فردوسی مشهد / maryam.saberinia@mail.um.ac.ir

² استاد مهندسی هوافضا، دانشگاه فردوسی مشهد / fard_m@um.ac.ir

چکیده

آشفته بوده و شامل برهم کنش‌های پیچیده‌ای میان فازهای بخار و مایع می‌شود. کاویتاسیون دارای آثار نامطلوبی مانند صدمات ساختاری به بدنه‌ی جسم مثل خوردگی، بروز ارتعاشات و همچنین ایجاد نویز و پارازیت می‌باشد که تاثیر منفی بر عملکرد سیستم داشته و موجب اتلاف انرژی سیستم می‌گردد [1]. کاویتاسیون را می‌توان به صورت یه روند دینامیکی در سیال از تشکیل، رشد و انفجار حباب‌ها به هنگام عبور جریان در نظر گرفت [2]. بسیاری از مشکلات ایجاد شده در اثر کاویتاسیون همانند خوردگی، به دلیل رفتار گذرا و ناپایا در ساختار کاویتاسیون می‌باشد [3]. علت این رفتار گذرا و ناپایا تشکیل حباب‌های بخار در اندازه‌های متفاوت و از بین رفتن آن‌ها در زمان‌های مختلف است [4].

در گذشته مطالعات اساسی مختلفی بر روی جریان‌های کاویتاسیونی بر روی هیدروفویل‌ها انجام شده‌است. تولین¹ در سال 1953، آکوستا² در سال 1955، جورست³ و تیمان⁴ در سال 1956 این پدیده را به روش تئوری خطی مطالعه کردند. تئوری خطی افزایش اندازه و حجم ناحیه‌ی کاویتا را به تناسب افزایش ضخامت هیدروفویل بررسی می‌کند. در سال 1987 اولمان⁵ از روش غیر خطی گردابه‌های سطحی، پیش‌بینی کرد که با افزایش ضخامت هیدروفویل اندازه‌ی حباب کاویتا کاهش خواهد یافت. برخی از مطالعات انجام شده بر اساس تصحیح و بهینه‌سازی لبه‌ی حمله توسط تولین (1964)، آمرومین⁶ (1990) و کیناس⁷ (1991) ارائه شده‌است. با شروع استفاده از روش‌های المان مرزی، مطالعات کاویتاسیونی با پیشرفت سریعی همراه شد. فاین⁸ و کیناس در سال‌های 1992 و 1993، کیناس در سال 1994 و 1998، کیم⁹ در سال 1994، دانگ¹⁰ و کوپر¹¹ به اتفاق در سال 1998،

مطالعه‌ی عملکرد هیدرودینامیکی هیدروفویل‌ها با توجه به استفاده‌ی گسترده‌ی آن در صنایع دریایی امری ضروری می‌نماید. نظر به این که اکثر جریان‌های موجود در طبیعت به صورت آشفته می‌باشند، انتخاب مدل آشفته‌گی مناسب برای مطالعه جریان بسیار مهم بوده و در دقت محاسبات اثر به‌سزایی دارد. اعتبارسنجی نتایج به صورت مقایسه‌ی ضرایب فشار روی هیدروفویل در جریان‌های غیرکاویتاسیونی و کاویتاسیونی با نتایج موجود در مطالعات پیشین انجام گرفته‌است. در پژوهش حاضر نمودارهای ضرایب برآ و پسا در زوایای حمله‌ی مختلف با استفاده از مدل‌های آشفته‌گی $k - \varepsilon$ استاندارد و $k - \omega - SST$ در جریان غیرکاویتاسیونی روی هیدروفویل دو بعدی ناکا 0015، با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده و سپس به بررسی اثر افزایش عدد رینولدز بر این ضرایب پرداخته شده‌است. در نهایت با اعمال کاویتاسیون بر جریان تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌است. از نتایج موجود چنین به دست می‌آید که مدل آشفته‌گی $k - \omega - SST$ از دقت خوبی در پیش‌بینی نتایج و همچنین نقطه‌ی بروز جدایش جریان برخوردار می‌باشد. اثر افزایش عدد رینولدز به صورت افزایش ضریب برآ و کاهش ضریب پسا و تاخیر در بروز جدایش جریان بوده و اعمال کاویتاسیون بر جریان موجب کاهش ضریب برآ، افزایش ضریب پسا و بروز جدایش در زوایای حمله‌ی پایین‌تر می‌شود.

واژه‌های کلیدی

هیدروفویل، کاویتاسیون، آشفته‌گی، برآ، پسا

مقدمه

کاویتاسیون به عنوان یک پدیده مهم در تکنولوژی و یکی از موضوعات چالش‌برانگیز در زمینه‌های تحقیقاتی در علوم مهندسی شناخته می‌شود. در جریان‌های مایعات، کاویتاسیون عموماً با افت فشار تا مقادیر کمتر از فشار بخار اشباع و به عبارتی ایجاد فشار منفی بر روی جسم و تشکیل بخار ایجاد می‌شود. کاویتاسیون در محدوده‌ی وسیعی از سیستم‌های جلوبردنگی و هیدرولیکی نظیر پمپ‌ها، نازل‌ها، پروانه‌ی کشتی‌ها، هیدروفویل‌ها و اجسام زیرآبی قابل مشاهده است. جریان‌های کاویتاسیونی در اکثر سیستم‌های مهندسی به صورت

¹ Tulin

² Acosta

³ Geurst

⁴ Timman

⁵ Uhlman

⁶ Amromin

⁷ Kinnas

⁸ Fine

⁹ Kim

¹⁰ Dang

عبور کرده و گردابه‌های به‌وجودآمده در الگوی جریان تاثیرگذار واقع می‌شوند [6]. استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف می‌تواند منجر به اختلافات قابل توجهی در پیش‌بینی مقادیر برآ و پسا شود [9]. از این رو پژوهش حاضر بر انتخاب مدل آشفتگی مناسب در جریان غیر کاویتاسیونی بر روی هیدروفویل دوبعدی ناکا 0015 و مقایسه‌ی نتایج به دست‌آمده با داده‌های تجربی متمرکز بوده و در ادامه تاثیر تغییر عدد رینولدز بر جریان بدون کاویتاسیون و مقایسه‌ی عملکرد آیرودینامیکی هیدروفویل در دو حالت جریان بدون کاویتاسیون و همراه با کاویتاسیون بررسی شده‌است.

روش حل عددی

روش عددی مورد استفاده در این تحلیل بر اساس الگوریتم فشار مبنا و برپایه‌ی الگوریتم سمپل بوده و برای حل معادلات ناویر-استوکس از نرم افزار فلونت 17.2 استفاده شده‌است. جریان مورد نظر به صورت دوفازی، تراکم‌ناپذیر، آشفته و پایا در نظر گرفته شده و برای شبیه سازی حالت دوفازی جریان از مدل مخلوط استفاده شده‌است. همچنین برای اعمال فرایند کاویتاسیون و حل معادله‌ی انتقال جرم میان فازها از مدل کاویتاسیونی ساویر به کار گرفته شده‌است.

معادلات حاکم بر مدل مخلوط

معادلات پیوستگی و اندازه‌ی حرکت

معادله‌ی پیوستگی برای مدل مخلوط به صورت رابطه‌ی (1) قابل بیان است :

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

که چگالی مخلوط توسط رابطه‌ی (2) به دست می‌آید:

$$\rho = \alpha_v \rho_v + \alpha_g \rho_g + (1 - \alpha_v - \alpha_g) \rho_l \quad (2)$$

در این روابط α کسر حجمی اجزا بوده و زیرنویس‌های g ، v و l

به اجزای گاز غیر قابل چگالش، بخار و مایع مربوط است.

معادله‌ی اندازه‌ی حرکت برای مخلوط چندفازی به فرم رابطه‌ی (3)

است که برای همه‌ی فازها یک معادله حل می‌شود.

$$\iiint \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} dv + \iint (\rho v \cdot ds) V = - \iiint \nabla P dv + \iiint \rho f dv + F_{viscous} \quad (3)$$

که v حجم کنترل، P فشار مخلوط چند فازی، V سرعت جریان، S سطح کنترل و $F_{viscous}$ اثر نیروهای لزجی است.

معادله‌ی انتقال کسر حجمی برای فاز ثانویه :

برای شبیه‌سازی کاویتاسیون، با استفاده از معادله‌ی پیوستگی برای فاز ثانویه P ، معادله‌ی کسر حجمی برای فاز دوم به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{V}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{V}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (4)$$

کریشناس¹¹ در سال 2000 و دانگ در سال 2001 مطالعات مهمی در رابطه با کاویتاسیون بر روی هیدروفویل‌های دوبعدی و سه‌بعدی انجام دادند. مطالعات بعدی در این زمینه توسط بال¹² و کیناس در سال 2003، بال در سال‌های 2007، 2008 و 2011 با استفاده از روش المان مرزی ارائه شده‌است. پیشرفت‌های دیگر در شبیه‌سازی کاویتاسیون بر پایه‌ی حل عددی مطالعات متوسط‌گیری‌شده‌ی ناویراستوکس و معادلات اولر می‌باشد. دشیپاند¹³ در سال 1993 روش‌هایی بر مبنای حل معادلات ناویراستوکس و در سال 1994 بر مبنای حل معادلات اولر ارائه نمود. در سال 2010، لی¹⁴ خوردگی در اثر کاویتاسیون را بر روی هیدروفویل‌های دوبعدی و سه‌بعدی پیش‌بینی کرد. مطالعات وی در شرایط جریان‌های پایا و ناپایا و با استفاده از نرم افزار تجاری فلونت انجام شده و نتایج به دست آمده توسط این نرم‌افزار دارای تطابق بیشتری با حالت ناپایا بود. در همان سال هوانگ¹⁵ تاثیر مدل‌های مختلف آشفتگی را مقایسه و رفتار دیواره را بر روی جریان کاویتاسیونی حول ایرفویل بررسی نمود. برای پیش‌بینی مراحل اولیه‌ی بروز کاویتاسیون بر روی هیدروفویل‌ها، هوکسترا¹⁶ و واز¹⁷ در سال 2009 از مدل CFD جت برگشتی استفاده نمودند [5].

امروزه هیدروفویل‌ها به طور گسترده در صنایع دریایی و در موارد مختلفی نظیر رادر (برای کنترل وسایل نقلیه‌ی دریایی)، پروانه‌ها (برای تولید نیروی پیشرانش) و توربین‌های جزرومدی (برای استخراج انرژی از اقیانوس‌ها) استفاده می‌شوند [6].

با وجود توسعه‌ی بسیار سریع و کاربرد وسیع رایانه‌های حاضر و توانایی قابل ملاحظه‌ی آن‌ها در صرفه‌جویی هزینه و زمان در مقایسه با روش‌های تجربی، روش‌های عددی در مطالعه‌ی کاویتاسیون در سال‌های اخیر بسیار رایج و محبوب گشته‌اند [7].

علاوه بر این آزمایشات انجام‌شده در زمینه‌ی کاویتاسیون به دلیل وجود برخی از محدودیت‌های بارز و مشخص آزمایش و اندازه‌گیری، تنها بخشی از جواب‌های مورد نیاز را در اختیار می‌گذارند. از این رو برای اطلاع از جوانب دیگر مسئله، نیاز به روش‌های محاسباتی خواهیم داشت [8]. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) اشاره کرد. شبیه‌سازی جریان کاویتاسیونی با CFD، نیاز به در نظر گرفتن عوامل مختلفی به ویژه مدل‌سازی آشفتگی دارد. این مسئله به خاطر ماهیت آشفتگی جریان کاویتاسیونی است که در آن عدد رینولدز از حد جریان آرام

¹¹ Kuiper

¹² Krishnas

¹³ Bal

¹⁴ Deshpand

¹⁵ Li

¹⁶ Huang

¹⁷ Hokestra

¹⁸ Vaz

که در معادله‌ی بالا \dot{m}_{app} انتقال جرم از فاز q به فاز p و \dot{m}_{pq} انتقال جرم از فاز p به فاز q است.

معادله‌ی انتقال جرم ساویر¹⁹

در مدل انتقال جرم ساویر، معادله‌ی کسر حجمی بخار عموماً به شکل زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \vec{V}) = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \frac{Da}{Dt} \quad (5)$$

که مدل ساویر برای برقراری ارتباط بین کسر حجمی بخار با تعداد حباب‌ها بر واحد حجم مایع از بیان زیر استفاده می‌کند:

$$\alpha = \frac{n_b \frac{4}{3} \pi R_B^3}{1 + n_b \frac{4}{3} \pi R_B^3} \quad (6)$$

در رابطه‌ی (6)، R_B شعاع حباب‌های بخار و n_b تعداد حباب‌های بخار است.

مدل‌های آشفتگی

جریان‌های آشفته با نوسانات میدان سرعت همراه هستند. به دلیل آن‌که این نوسانات دارای مقیاس‌های کوچک و فرکانس‌های بالا می‌باشند، شبیه‌سازی آن‌ها به طور مستقیم در محاسبات مهندسی بسیار زمان‌بر و شامل هزینه‌ی بالا است. از این‌رو استفاده از مدل‌های آشفتگی مناسب برای حل سریع‌تر و آسان‌تر معادلات جریان آشفته امری ضروری می‌نماید. در ادامه برای محاسبات تحلیل پیش‌رو معادلات متوسط زمانی ناویر-استوکس²⁰ (RANS) به کار گرفته شده‌است. این معادلات بر اساس خواص جریان آشفته، تقریبی از حل متوسط زمانی معادلات ناویر-استوکس را ارائه می‌دهند. یکی از مرسوم‌ترین طبقه‌بندی‌های مدل‌های آشفتگی بر مبنای RANS، بر اساس تعداد معادلات انتقال (معادلات دیفرانسیل) مورد استفاده برای متغیرهای آشفتگی است. مدل‌هایی که فاقد هر نوع معادله‌ی انتقالی هستند با عنوان مدل جبری شناخته می‌شوند. در این مدل‌ها تنها از روابط تجربی و معادلات جبری استفاده شده و در آن‌ها هیچ معادله‌ی دیفرانسیلی وجود ندارد. مدل‌هایی که دارای یک معادله‌ی انتقالی هستند در گروه مدل‌های یک معادله‌ای و مدل‌هایی که دو معادله‌ی انتقالی دارند در گروه مدل‌های دو معادله‌ای جای می‌گیرند. در این میان استفاده از مدل‌های دو معادله‌ای به عنوان زیر بنای بسیاری از تحقیقات مربوط به مدل‌سازی جریان‌های آشفته، به خصوص در سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است. ساده‌ترین مدل‌های کامل آشفتگی که در عین برخورداری از قابلیت بالای پیش‌بینی جریان دارای معادلات نسبتاً ساده‌ای نیز می‌باشند، مدل‌های دو معادله‌ای هستند و می‌توان از آن‌ها برای پیش‌بینی خواص یک جریان آشفته بدون آگاهی از ساختار جریان و یا هندسه‌ی جریان استفاده نمود [10]. با توجه به صرفه‌ی اقتصادی و دقت قابل قبول این مدل‌ها برای طیف وسیعی از جریان‌های آشفته، در ادامه دو مدل $k - \omega - SST$ و $k - \epsilon$ استاندارد برای مقایسه‌ی داده‌ها با نتایج

آزمایشگاهی انتخاب شده‌اند. لازم به ذکر است هیچ‌کدام از مدل‌های آشفتگی قادر به مدل‌سازی تمامی جریان‌های آشفته با دقت کامل نبوده و انتخاب مدل آشفتگی مناسب به عواملی نظیر فیزیک جریان، میزان دقت مورد نیاز در حل عددی و وجود یا عدم وجود رژیم‌های مختلف جریان در کنار یکدیگر بستگی دارد. [10]

ضرایب هیدرودینامیکی و عدد کاویتاسیون

با توجه به اهمیت عملکرد آیرودینامیکی هیدروفویل‌ها، در این مقاله از ضرایب برآ، پسا و ضریب فشار استفاده شده و مفهوم هرکدام به اختصار بیان شده است. هرگاه جسمی در جریان سیال غوطه‌ور شود، نیرویی از طرف سیال به جسم وارد می‌شود که این نیرو حاصل اثر نیروهای فشاری و برشی است. مولفه‌ی افقی این نیرو را نیروی پسا و مولفه‌ی عمودی آن را نیروی برآ می‌نامند. ضرایب برآ و پسا بر مبنای این دو نیرو به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (13)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (14)$$

در این روابط F_L نیروی برآ، F_D نیروی پسا، ρ چگالی سیال، U سرعت جریان آزاد و A سطح تصویر شده‌ی جسم در جهت جریان آزاد می‌باشد. در نتیجه‌ی تغییرات فشار بر روی هیدروفویل و اهمیت مطالعه و بررسی این موضوع، ضریب فشار در هر نقطه طبق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (15)$$

که P_∞ فشار جریان آزاد و P فشار استاتیکی جریان در نقطه‌ی مورد نظر است.

دیگر اعداد بی بعد مهم در این مطالعه، عدد رینولدز (Re) و عدد کاویتاسیون (σ) در رابطه‌های (16) و (17) بیان شده‌اند:

$$Re = \frac{U_\infty C}{\nu} \quad (16)$$

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (17)$$

در روابط بالا ν لزجت سینماتیکی، C طول هیدروفویل و P_v فشار بخار اشباع است.

دامنه‌ی حل و شرایط مرزی

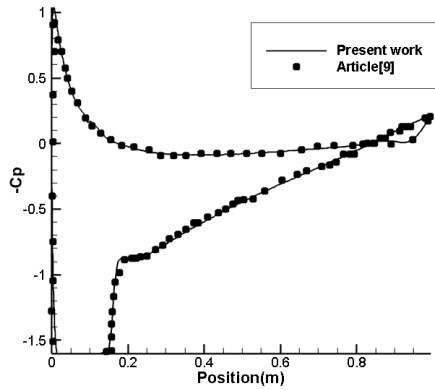
برای حل عددی، هیدروفویل ناکا 0015 با مرکز ثقل $\frac{x}{c} = 0.3086$ و طول وتر $C = 200 \text{ mm}$ استفاده شده‌است. دامنه‌ی محاسباتی دارای ابعاد $1400 \times 570 \text{ mm}$ بوده و طول دامنه به اندازه‌ی دو برابر طول وتر هیدروفویل از لبه‌ی حمله به سمت بالادست و چهار برابر طول وتر از لبه‌ی فرار به سمت پایین دست امتداد یافته‌است.

برای اعتبار سنجی نتایج ابتدا مقادیر ضریب فشار بر روی هیدروفویل در شرایط جریان بدون کاویتاسیون و همراه با کاویتاسیون در عدد کاویتاسیونی $\sigma = 1.6$ ، زاویه‌ی حمله‌ی درجه و عدد رینولدز 1.2×10^6 با نتایج موجود در مرجع [9] مقایسه شده و سپس با عبور جریان از روی هیدروفویل در زوایای حمله متفاوت، به بررسی عملکرد آیرودینامیکی آن پرداخته شده‌است.

¹⁹ Sauer

²⁰ Reynolds Average Navier-Stokes

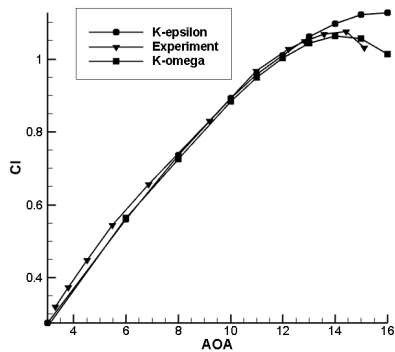
تعداد 141000 المان در دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده و شبکه بندی در اطراف هیدروفویل به صورت شبکه های سازمان یافته می باشد. بر روی هیدروفویل شبکه به صورت لایه مرزی استفاده شده و مقدار y^+ بر روی سطح حدود یک می باشد. شکل 1 شرایط مرزی بر روی دامنه حل و شکل 2 شبکه بندی در نواحی نزدیک هیدروفویل را نشان می دهد.



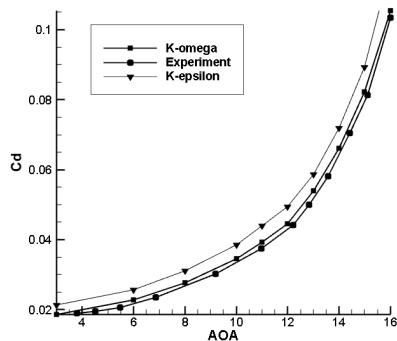
شکل 4: نمودار ضریب فشار بر روی هیدروفویل ناکا 0015 در شرایط جریان همراه با کاونتاسیون و زاویه ی حمله ی 6 درجه

نتایج

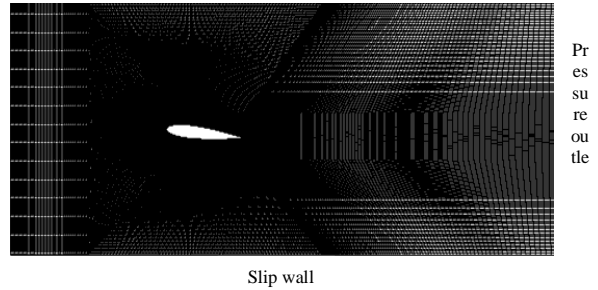
ضرایب برآ و پسا در زوایای حمله ی مختلف و در شرایط جریان بدون کاونتاسیون و عدد رینولدز 3.6×10^5 به دست آمده و نتایج محاسبات عددی با استفاده از دو مدل آشفتگی $k - \epsilon$ استاندارد و $k - \omega - SST$ و در مقایسه با نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [11]، در شکل 5 و شکل 6 نشان داده شده است. مشاهده می شود که هر دو مدل دارای مطابقت خوبی با نتایج تجربی بوده اما مدل $k - \epsilon$ استاندارد عملکرد ضعیفی در پیش بینی نقطه ی واماندگی هیدروفویل و محل جدایش جریان دارد. از این رو برای ادامه ی محاسبات از مدل $k - \omega - SST$ استفاده می شود.



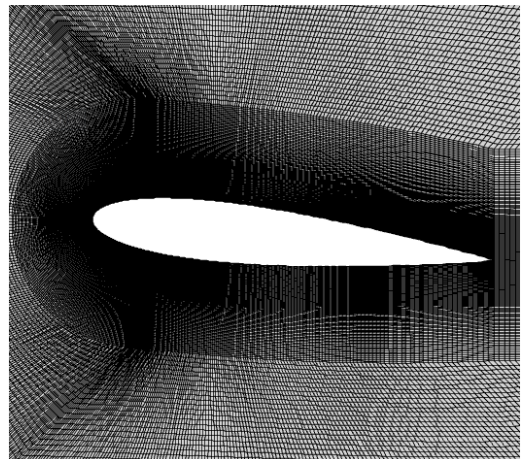
شکل 5: ضرایب برآ در زوایای حمله ی مختلف در جریان غیر کاونتاسیونی بر روی هیدروفویل ناکا 0015 و در عدد رینولدز 360000



شکل 6: ضرایب پسا در زوایای حمله ی مختلف در جریان غیر کاونتاسیونی بر روی هیدروفویل ناکا 0015 و در عدد رینولدز 360000

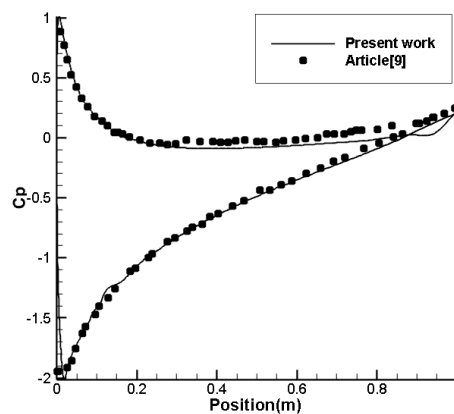


شکل 1: دامنه ی محاسباتی استفاده شده



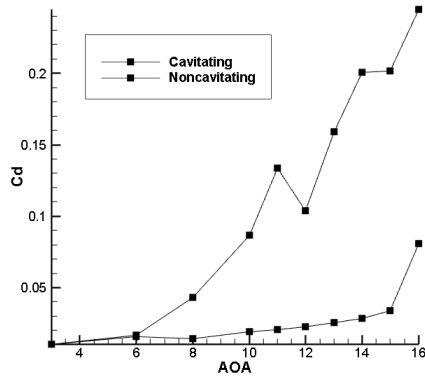
شکل 2: شبکه بندی در اطراف هیدروفویل

در شکل 3 ضرایب فشار به دست آمده بر روی هیدروفویل در شرایط جریان بدون کاونتاسیون و در شکل 4 ضرایب فشار در حالت جریان کاونتاسیونی با عدد کاونتاسیون $\sigma = 1.6$ با داده های موجود در مرجع [9] مقایسه شده و بیانگر مطابقت قابل قبول نتایج می باشد.

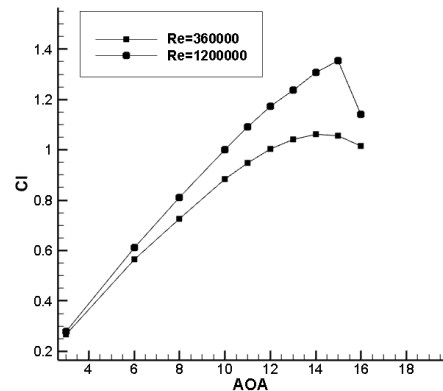


شکل 3: نمودار ضریب فشار هیدروفویل ناکا 0015 در جریان غیر کاونتاسیونی و زاویه ی حمله ی 6 درجه

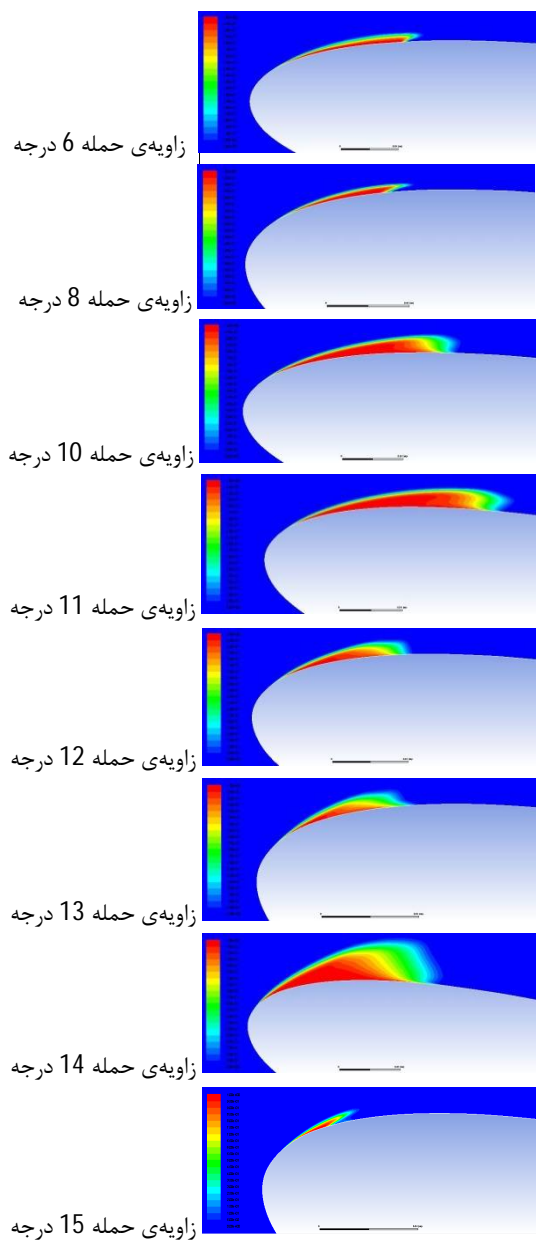
برای بررسی تاثیر عدد رینولدز بر ضرایب هیدرودینامیکی جریان غیر کایتاسیونی، مقدار این عدد را تا 1200000 افزایش داده و مقادیر ضرایب برآ و پسا را در زوایای حمله‌ی مختلف با مرحله‌ی قبل مقایسه می‌کنیم.



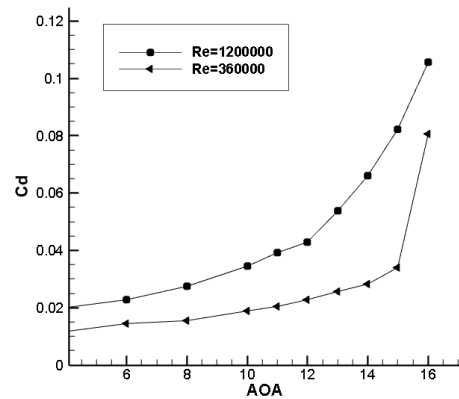
شکل 10: ضرایب برآ در جریان‌های کایتاسیونی و غیرکایتاسیونی در عدد رینولدز 1.2×10^6 و عدد کایتاسیون $\sigma = 1.6$



شکل 7: ضرایب برآ در زوایای حمله‌ی مختلف در جریان غیر کایتاسیونی بر روی هیدروفویل ناکا 0015 و در اعداد رینولدز مختلف

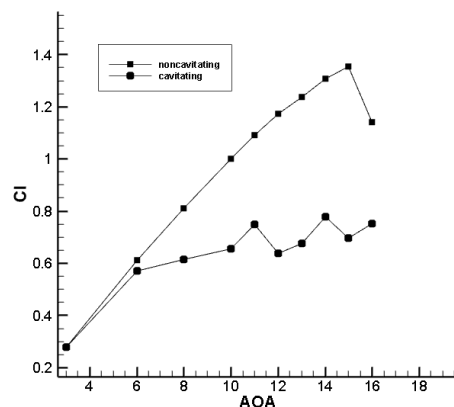


شکل 11: کانتورهای کسر حجمی بخار بر روی هیدروفویل در زوایای حمله‌ی مختلف



شکل 8: ضرایب پسا در زوایای حمله‌ی مختلف در جریان غیر کایتاسیونی بر روی هیدروفویل ناکا 0015 و در اعداد رینولدز مختلف

به منظور مشاهده‌ی اثر کایتاسیون بر ضرایب هیدرودینامیکی هیدروفویل، در عدد رینولدز ثابت 1.2×10^6 و با کاهش فشار در خروجی دامنه‌ی محاسباتی و در عدد کایتاسیون $\sigma = 1.6$ ، نمودارهای مقادیر متوسط ضرایب برآ و پسا در زوایای حمله مختلف رسم کرده و با حالت غیر کایتاسیونی جریان مقایسه می‌کنیم.



شکل 9: ضرایب برآ در جریان‌های کایتاسیونی و غیرکایتاسیونی در عدد رینولدز 1.2×10^6 و عدد کایتاسیون $\sigma = 1.6$

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با توجه به اشکال 5 و 6 مشخص است که پس از نقطه‌ی واماندگی جریان، ضریب برآ به یکباره کاهش یافته و ضریب پسا افزایش می‌یابد. در شکل‌های 7 و 8 مشاهده می‌شود که افزایش عدد رینولدز باعث افزایش ضریب برآ و کاهش ضریب پسا می‌شود. جدایش جریان در عدد رینولدز 360000، در زاویه‌ی حمله‌ی 14 درجه و در عدد رینولدز 1200000، جدایش جریان در زاویه‌ی 15 رخ می‌دهد. بنابراین می‌توان چنین برداشت کرد که افزایش عدد رینولدز موجب به تاخیر افتادن جدایش جریان می‌شود. در شکل 9 و شکل 10 مشهود است که با وقوع کاویتاسیون، ضرایب برآ دچار کاهش شده و ضریب پسا افزایش می‌یابد. با توجه به شکل 11 در جریان کاویتاسیونی مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه‌ی حمله، کسر حجمی بخار بر روی هیدروفویل افزایش می‌یابد. این افزایش تا زاویه‌ی حمله‌ی 11 درجه ادامه داشته و با دقت در شکل 9 و 10 نیز متوجه افزایش ضرایب برآ و پسا در این ناحیه می‌شویم. با افزایش زاویه‌ی حمله به 12 درجه، بخشی از بخار تشکیل شده بر روی هیدروفویل از سطح آن جدا شده و مقدار کسر حجمی بخار کاهش می‌یابد که با کاهش ضرایب برآ و پسا در این زاویه مواجه هستیم. با بیشتر کردن زاویه‌ی حمله تا 13 و 14 درجه دوباره شاهد افزایش حجم بخار روی هیدروفویل و به دنبال آن افزایش ضریب برآ و پسا بوده و پس از بیشتر کردن زاویه‌ی حمله‌ی جریان تا 15 درجه دوباره با جدا شدن بخار روی هیدروفویل و کاهش ضرایب هیدرودینامیکی آن مواجه می‌شویم.

مراجع و منابع

- [3] Liu, D.M., Liu, S.H., Wu, Y.L. and Xu, H.Y., 2009. "LES numerical simulation of cavitation bubble shedding on ALE 25 and ALE 15 hydrofoils". *Journal of Hydrodynamics*, 21(6), December, pp.807-813.
- [4] Gnanaskandan, A. and Mahesh, K., 2016. "Comparative study of RANS and LES in simulating cavitating flows". In *Proceedings of the 31st Symposium on Naval Hydrodynamics*.
- [5] Celik, F., Ozden, Y.A. and Bal, S., 2014. "Numerical simulation of flow around two-and three-dimensional partially cavitating hydrofoils". *Ocean Engineering*, 78, March, pp.22-34.
- [6] Ghadimi, P., Tanha, A., Tavakoli, S. and Feizi Chekab, M.A., 2018. "RANS simulation of the tip vortex flow generated around a NACA 0015 hydrofoil and examination of its hydrodynamic characteristics". *Journal of Marine Engineering & Technology*, 17(2), May, pp.106-119.
- [7] Huang, S., He, M., Wang, C. and Chang, X., 2010. "Simulation of cavitating flow around a 2-D hydrofoil". *Journal of Marine Science and Application*, 9(1), March, pp.63-68.
- [8] Bensow, R.E. and Bark, G., 2010. "Simulating cavitating flows with LES in OpenFoam". In *V European conference on computational fluid dynamics*, June, pp. 14-17.
- [9] Li, Z.R., Pourquie, M. and Van Terwisga, T.J., 2010. "A numerical study of steady and unsteady cavitation on a 2D hydrofoil". *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 22(5), October, pp.770-777.
- [10] Tabaki, M., 2016. "A Study of ventilated Supercavitation for the range of small Cavitation Numbers using CFD". MS Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, September.
- [11] Sheldahl, R.E. and Klimas, P.C., 1981. "Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines". (No. SAND-80-2114)., Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA).
- [1] Wang, G., Senocak, I., Shyy, W., Ikohagi, T. and Cao, S., 2001. "Dynamics of attached turbulent cavitating flows". *Progress in Aerospace sciences*, 37(6), August, pp.551-581.
- [2] Stopa, M.M., Cardoso Filho, B.J. and Martinez, C.B., 2014. "Incipient detection of cavitation phenomenon in centrifugal pumps". *IEEE Transactions on industry applications*, 5(1), June, pp.120-126.