



بررسی عددی تأثیر دمش بر رفتار هیدرودینامیکی جریان‌های کاویتاسیونی عبوری از هیدروفویل‌ها با استفاده از روش پیش شرط توانی

پوریا اکبرزاده^{۱*}، ابراهیم اکبرزاده^۲

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

* شاهرود، صندوق پستی ۳۶۱۹۹۹۵۱۶۱، akbarzad@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۹ دی ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۳ اسفند ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۰۸ شهریور ۱۳۹۳

کلید واژگان:

دمش

روش پیش شرط توانی

جریان کاویتاسیونی

مدل باروتروپیک

ضرایب برآ و پسی فشاری

تحلیل و شبیه‌سازی عددی جریان‌های کاویتاسیون به دلیل ظهور و کاربرد آن در صنایع دریایی، توربوماشین‌های آبی، هیدروفویل‌ها، اجسام زیرسطحی و غیره از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. به همین دلیل در این تحقیق اثر دمشر رفتار هیدرودینامیکی جریان‌های کاویتاسیونی عبوری از هیدروفویل‌ها بررسی شده است. روش حجم محدود جیمسون و روش پیش شرط توانی به همراه مدل تک‌فازی کاویتاسیون (مدل باروتروپیک) برای تحلیل جریان کاویتاسیونی استفاده شده است. پایداری حل به کمک جملات اتلافی مرتبه دوم و چهارم به دست آمده است. برای رسیدن به حالت دائم از روش چهار مرحله‌ای صریح رانگ-کوتا استفاده شده است. با توجه به این که غالباً کاویتاسیون در اعداد رینولدز بالا رخ می‌دهد، جهت سهولت در شبیه‌سازی، معادلات جریان غیرلزج در نظر گرفته شده، برای اعمال دمش از سطح هیدروفویل، یک جت در سطح فوقانی هیدروفویل قرار داده شده است. پارامترهای محل جت، نسبت سرعت دمش، زاویه دمش و پهنای جت متغیرهای مورد بررسی است. شبیه‌سازی در دو عدد کاویتاسیون متفاوت صورت گرفته است. نتایج عددی نشان می‌دهد روش پیش شرط توانی سرعت همگرایی را تا حد زیادی افزایش می‌دهد. دمش سبب کاهش ضرایب برآ و پسی فشاری و طول کاویتا نسبت به حالت بدون دمش می‌شود. همچنین افزایش نسبت سرعت دمش، زاویه دمش و پهنای جت موجب کاهش طول کاویتا و ضرایب برآ و پسی فشاری می‌شود.

Numerical investigation of blowing effect on hydrodynamic behavior of cavitating flows over hydrofoils using power law preconditioning method

Pooria Akbarzadeh^{1*}, Ebrahim Akbarzadeh²

1- Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology University, Urmia, Iran

* P.O.B. 3619995161 Shahrood, Iran, akbarzad@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 19 January 2014

Accepted 22 February 2014

Available Online 30 August 2014

Keywords:

Blowing

Power-Law Preconditioning Method

Cavitating Flow

Barotropic Model

Lift and Pressure Drag Coefficients

ABSTRACT

Numerical analysis and simulation of cavitating flows due to appearance and its application in the maritime industry, water turbomachinery, hydrofoils, underwater vehicles, etc. have specific importance. For this reason in this research, the effect of blowing on hydrodynamic behavior of cavitating flows over hydrofoils has been investigated. Jameson's finite volume method and power-law preconditioning method with single-phase cavitation model (Barotropic model) have been used to the analyzing of cavitating flow. The stabilization of solution has been achieved with help of the second and fourth-order dissipation term. Explicit four step Runge-Kutta method has been used to achieve the steady state condition. As regards the cavitation often occurs at high Reynolds number, to facilitate the simulation the inviscid flow equations are considered. For apply the blowing from hydrofoil surface, a jet has been placed on hydrofoil's upper surface. The parameters of jet location, blowing velocity ratio, blowing angle and width of jet are investigated and simulation has been performed for two different cavitation numbers. The numerical results show that the power-law precondition increases the convergence speed significantly. Blowing reduces the cavity length, lift and pressure drag coefficients compared to no blowing case. Also the increase of blowing velocity ratio, blowing angle and width of jet, decrease the cavity length, lift and pressure drag coefficients.

۱- مقدمه

صدا، نوسان و کاهش بازده پمپ‌های هیدرولیکی می‌شود؛ با این وجود کاربردهای مفید و مطلوبی نظیر کاهش نیروی پسا در اجسام زیر سطحی دارد؛ بنابراین با توجه به اهمیت پدیده کاویتاسیون، مطالعات بسیاری توسط محققان انجام گرفته است. گریست [۱] در سال ۱۹۵۹ کاویتاسیون حول هیدروفویل در

مطالعه و بررسی جریان‌های کاویتاسیونی موضوع مهمی در طراحی و عملکرد دستگاه‌های مهندسی از جمله هیدروفویل‌ها، اجسام زیرسطحی و توربو ماشین‌هاست. جریان کاویتاسیونی اغلب سبب مشکلات نامطلوب مانند ایجاد

Please cite this article using:

P. Akbarzadeh, E. Akbarzadeh, Numerical investigation of blowing effect on hydrodynamic behavior of cavitating flows over hydrofoils using power law preconditioning method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 59-67, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

محدود جیمسون برای تحلیل جریان های غیرلزج کاویتاسیونی به کار گرفته؛ همچنین از روش پیش شرط توانی معرفی شده توسط اصفهانیان و اکبرزاده [۲۱] جهت تسریع در روند همگرایی استفاده شده است. پایداری حل به کمک جملات اتلافی مرتبه دوم و چهارم به دست آمده است. برای پیمایش در زمان و رسیدن به حالت دائم از الگوریتم چهار مرحله ای رانگ-کوتا^۵ استفاده شده؛ در این مطالعه برای شبیه سازی جریان های کاویتاسیونی از مدل باروتروپیک معرفی شده توسط دلتوی [۲۳] استفاده شده است. برای اعمال دمش از سطح هیدرو فویل، یک جت در سطح فوقانی هیدرو فویل قرار داده شده؛ کمیت های محل جت، سرعت دمش، زاویه دمش و پهنای جت متغیر است. مطالعه بر هیدرو فویل های NACA16009 و NACA66(MOD) در جریان کاویتاسیونی برای دو عدد کاویتاسیون متفاوت صورت گرفته شده است. باتوجه به این که اغلب کاویتاسیون در رینولدزهای زیاد رخ می دهد جهت سهولت در شبیه سازی، معادلات جریان غیر لزج در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می دهد که دمش سبب کاهش طول کاویتی و ضرایب برآ و پسای فشاری نسبت به حالت بدون جت می شود و با افزایش نسبت سرعت دمش، طول کاویتی و ضرایب برآ و پسای فشاری کاهش می یابد. افزایش زاویه دمش و پهنای جت، طول کاویتی و ضرایب برآ و پسای فشاری را کاهش می دهد.

۲- معادلات حاکم پیش شرط شده

معادله پیش شرط سازی شده غیرلزج دوبعدی تراکم ناپذیر در شکل بقای برداری به صورت رابطه (۱) نوشته می شود:

$$\Gamma^{-1} \frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

در رابطه بالا Γ ماتریس پیش شرط، $\vec{Q}$ بردار متغیرهای اولیه و $\vec{F}$ بردارهای شار عددی بوده و مطابق معادله (۲) نمایش داده می شود.

$$\vec{Q} = \begin{pmatrix} p \\ u \\ v \end{pmatrix}, \Gamma = \begin{pmatrix} \beta^2 & 0 & 0 \\ -\sigma u/\rho & 1/\rho & 0 \\ -\sigma v/\rho & 0 & 1/\rho \end{pmatrix}$$

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ \rho uv \end{pmatrix}, \vec{E} = \begin{pmatrix} \rho v \\ p + \rho v^2 \\ \rho uv \end{pmatrix} \quad (2)$$

که در آن $u = \bar{u}/U_\infty$ و $v = \bar{v}/U_\infty$ به ترتیب سرعت در جهت x و y ، $x = \bar{x}/L$ و $y = \bar{y}/L$ محورهای مختصات کارترین، $p = \bar{p}/\rho_\infty U_\infty^2$ فشار استاتیکی و $\rho = \bar{\rho}/\rho_\infty$ چگالی نسبی است. همچنین $t = \bar{t} U_\infty / L$ طول مرجع و U_∞ سرعت مرجع است. $\bar{\phi}$ کمیت با بعد ϕ را نشان می دهد. β ضریب تراکم پذیری مصنوعی می باشد که مطابق مرجع [۲۰] استخراج شده، σ ضریب پیش شرط بوده که در روش پیش شرط توانی اصفهانیان و اکبرزاده [۲۱] برای جریان غیرلزج به صورت رابطه (۳) تعریف شده است:

$$\sigma = (1 - A_u)^m \quad (3)$$

که در آن m عدد صحیح مثبت و A_u یک حسگر سرعت است.

$$A_u = \lim_{x \rightarrow x_m^+} \frac{|\nabla u(x_m) - \nabla u(x)|}{|\nabla u(x_m)| + |\nabla u(x)|} \quad (4)$$

$\nabla u(x_m)$ گرادیان سرعت در $x = x_m$ است و از رابطه (۵) به دست می آید:

$$\nabla u(x_m) = \lim_{x \rightarrow x_m} \frac{u(x) - u(x_m)}{x - x_m} \quad (5)$$

شایان یاد است اگر $\sigma = 0$ و $\sigma = 1$ انتخاب شود به ترتیب معادل روش پیش شرط ترکل و روش تراکم پذیری مصنوعی کورین خواهد بود.

۳- مدل کاویتاسیون باروتروپیک

در کنار اهمیت شبیه سازی جریان های غیر کاویتاسیونی، شبیه سازی و تحلیل

عدد کاویتاسیون محدود را با استفاده از تئوری خطی پیش بینی کرد و بعدها روش خود را برای کاویتاسیون گسترده تعمیم داد. در سال ۱۹۸۷ اهلمن [۲] روش توزیع گردابه را برای حل جریان کاویتاسیون جزئی حول هیدرو فویل دو بعدی به کار گرفت. فاین و کینانس [۳، ۴] روش توزیع چشمه و دابلت را برای حل جریان کاویتاسیون جزئی حول هیدرو فویل دو بعدی معرفی کردند. دولار و همکارانش [۵] در سال ۲۰۰۵ شبیه سازی عددی حول هیدرو فویل را انجام دادند. پسندیده فرد و همکارانش از روش توزیع گردابه در مرزهای هیدرو فویل و گردابه برای تحلیل کاویتاسیون جزئی و گسترده استفاده کردند [۶]. در سال ۲۰۰۹ هجرانفر و همکارانش [۷] جریان دو بعدی کاویتاسیونی آشفته حول هیدرو فویل NACA0012 و NACA66(MOD) را شبیه سازی کردند. سروشان و همکارانش جریان کاویتاسیونی غیر دائم را مدل سازی کردند [۸]. لی و همکارانش [۹] جریان کاویتاسیون در عدد کاویتاسیون ۱ را حول هیدرو فویل NACA0015 حل کردند. کریم و همکارش [۱۰] در سال ۲۰۱۲ به مطالعه و پیش بینی کاویتاسیون حول هیدرو فویل NACA0012 پرداختند. بهبهانی نژاد و همکارانش [۱۱] مدل رتبه کاسته را برای شبیه سازی جریان غیر دائم کاویتاسیون جزئی ارائه کردند. آن ها نشان دادند که این مدل از لحاظ زمان محاسباتی بهینه تر از روش های متداول در تحلیل جریان غیر دائم کاویتاسیون جزئی حول هیدرو فویل عمل می کند. روحی و همکارانش [۱۲] جریان کاویتاسیونی را با استفاده از مدل LES شبیه سازی کردند. سلیک و همکارانش [۱۳] روش المان مرزی را برای پیش بینی کاویتاسیون به کار گرفتند.

در سال های اخیر برنامه های محاسباتی برای رفع مشکلاتی مانند پایداری و زمان بر بودن شبیه سازی های عددی بهبود داده شده اند. روش پیش شرط سازی^۱ نیز سعی بر رفع این مشکلات دارد. روش تراکم پذیری مصنوعی استاندارد^۲ (SAC) که توسط کورین [۱۴] و برای حل معادلات تراکم ناپذیر معرفی شد را می توان از اولین روش های پیش شرط قلمداد کرد. سپس ترکل [۱۵] برای افزایش سرعت همگرایی روشی را معرفی کرد که به روش پیش شرط استاندارد^۳ (SPM) معروف شد. پس از کورین و ترکل، محققانی مانند چوی و مرکل [۱۶]، زاکانتی [۱۷] و ملان و همکارانش [۱۸] مطالعات تکمیلی در زمینه پیش شرط سازی را برای جریان های تراکم پذیر و تراکم ناپذیر، لزج و غیرلزج، پایا و ناپایا انجام دادند. یک تحقیق جامع در موضوع پیش شرط سازی به وسیله ون لیر و همکارانش [۱۹] صورت گرفت. آن ها ماتریس بهینه پیش شرط سازی را به دست آوردند. در سال ۲۰۰۲ ملان و همکاران [۲۰] روش پیش شرط سازی تعمیم یافته را برای تحلیل جریان های تراکم ناپذیر پایا و ناپایا معرفی کردند. در سال ۲۰۱۰ اصفهانیان و اکبرزاده [۲۱، ۲۲] روش پیش شرط سازی توانی^۴ را ارائه دادند. در پیش شرط سازی توانی، ماتریس پیش شرط به وسیله یک رابطه توانی و به کمک سرعت یا فشار محلی در هر گام زمانی تصحیح می شود.

با توجه به موارد یاد شده ملاحظه می شود که تحقیقات صورت گرفته در حوزه کاویتاسیون و جریان های کاویتاسیونی عمده تاً شامل مدل سازی جریان کاویتاسیونی و تأثیر پدیده کاویتاسیون بر رفتار آئرو دینامیکی اجسام غوطه ور است و تاکنون تأثیر تزریق سیال بر جریان کاویتاسیون و آثار آئرو دینامیکی آن مورد مطالعه جدی قرار نگرفته است؛ بنابراین در تحقیق حاضر به بررسی اثر دمش سیال از سطح هیدرو فویل بر ضرایب آئرو دینامیکی برآ و پسا به طور کمی و تأثیر آن بر طول کاویتی به طور کیفی پرداخته شده است. روش حجم

1- Preconditioning method
2- Standard Artificial Compressibility
3- Standard Preconditioning Method
4- Power-Law Preconditioning Method

عبارت اتلاف مصنوعی $D_{i,j,k}$ متشکل از دو عبارت مرتبه دوم و چهارم برای بار اول توسط جیمسون [۳۵] پیشنهاد شد. برای حل معادلات بالا از روش رانگ-کوتای چهار مرحله ای مطابق رابطه (۱۰) استفاده شده است [۳۴، ۳۳] (که ۴ و ۳، ۲، ۱ و k و ضرایب α_k ، به ترتیب ۴، ۳، ۲ و ۱ انتخاب شده اند):

$$\begin{aligned} Q_{i,j,k}^{(0)} &= Q_{i,j,k}^{(n)} \\ Q_{i,j,k}^{(k)} &= Q_{i,j,k}^{(0)} - \frac{\Delta t}{\alpha_k A_{i,j}} (Q_{i,j,k}^{(k-1)} - Q_{i,j,k}^{(0)}) \\ Q_{i,j,k}^{(n+1)} &= Q_{i,j,k}^{(4)} \end{aligned} \quad (11)$$

۵- شرایط مرزی

برای مرز دیواره، در جریان غیرلزج، فشار و سرعت ها از روش سلول مجاری محاسبه می شود. در مرز ورودی، اندازه مؤلفه های سرعت ثابت و برابر مقدار آنها در جریان آزاد قرار داده می شوند و فشار از داخل میدان جریان برون یابی می شود. در مرز خروجی، فشار برابر با فشار جریان آزاد و مؤلفه های سرعت با استفاده از برون یابی از داخل میدان تعیین می شود. در مرز جت دمش، اندازه مؤلفه های سرعت ثابت و برابر مقدار سرعت دمش است و فشار از داخل میدان برون یابی می شود.

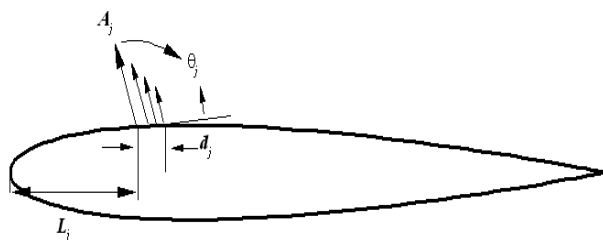
۶- کمیت های دمش

چهار کمیت در شبیه سازی عددی کنترل دمش مطابق شکل ۱ مورد استفاده قرار گرفته است. این کمیت ها پهنای جت، d_j ، محل جت، L_j ، نسبت سرعت جت، A_j و زاویه دمش، θ_j هستند. A_j برابر نسبت سرعت جت به سرعت جریان آزاد (V_j/U_∞) تعریف می شود. یک جت در سطح فوقانی هیدروفویل قرار داده و شبیه سازی برای مقادیر مختلف پهنای جت، d_j (۲/۵ الی ۱۰ درصد طول وتر)، موقعیت جت، L_j (۰/۳ الی ۰/۹ طول وتر)، نسبت سرعت دمش، A_j (۰/۱ الی ۰/۱) و زاویه جت دمش، θ_j (۳۰ الی ۹۰ درجه) انجام پذیرفته است.

۷- نتایج

برای ارزیابی روش مورد استفاده در شبیه سازی، تعداد زیادی شبکه با اندازه های مختلف در نظر گرفته شد که ماحصل آن انتخاب شبکه ای با ابعاد 150×64 برای هیدروفویل NACA16009 و 180×64 برای هیدروفویل NACA66(MOD) از نوع دایروی [۲۲] بود. نمونه ای از شبکه مورد استفاده برای هیدروفویل های NACA66(MOD) و NACA16009 در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این بخش جریان تراکم ناپذیر کاویتاسیونی عبوری از هیدروفویل NACA16009 در زاویه حمله ۳ درجه و عدد کاویتاسیون $s=0.66$ و هیدروفویل NACA66(MOD) در زاویه حمله ۴ درجه و عدد کاویتاسیون $s=0.84$ به کمک روش پیش شرط توانی شبیه سازی شده است. جهت اعتبارسنجی حل عددی، توزیع فشار روی دیواره، C_p ، برای هیدروفویل NACA16009 بدون اعمال دمش، با نتایج عددی کریشناسوامی [۳۶] مقایسه شده است.



شکل ۱ کمیت های کنترل دمش

پدیده کاویتاسیون و جریان های کاویتاسیونی نیز به دلیل تأثیر مستقیم آن در عملکرد تجهیزاتی نظیر توربومشین های آبی، هیدروفویل ها، انژکتورهای سوختی، پره های پروانه ای زیر دریایی ها، اجسام زیر سطحی و غیره مورد توجه محققان قرار گرفته است. طبق تعریف، کاویتاسیون در یک سیال و در نقاطی که فشار محلی کمتر از فشار بخار می شود می تواند رخ دهد. اصلی ترین مشکل شبیه سازی عددی پدیده کاویتاسیون وجود هم زمان دو نوع سیال با خواص به نسبت متفاوت است: سیال تک فاز تراکم ناپذیر (مایع خالص و بخار مایع خالص) و یک فاز ترکیبی تراکم پذیر. دلانوی و کوانی [۲۳] یک رابطه حالت باروتروپیک برای فاز ترکیبی یاد شده پیشنهاد دادند که مخلوطی تک فاز با چگالی وابسته به دو فاز مایع و بخار را مدل سازی می کند. این مدل به تازگی توسط محققانی نظیر مرکل و همکارانش [۲۴]، سانگ و همکارانش [۲۵]، کوتیر و همکارانش [۲۶-۲۹] و اصفهانیان و همکارانش [۳۰] در شبیه سازی جریان های کاویتاسیون مورد استفاده قرار گرفته است. شایان یاد است که استفاده از رویکرد معادله حالت برای مدل سازی کاویتاسیون اما با روابطی دیگر نیز در مراجعی نظیر [۳۱]، [۳۲] قابل مشاهده است. در این مطالعه از مدل دلانوی و کوانی [۲۳] استفاده می شود. بدین ترتیب که هرگاه سیال مایع باشد، سیال مورد نظر بر از مایع با چگالی ρ_l و هرگاه سیال بخار باشد، سلول مورد نظر بر از بخار با چگالی ρ_v در نظر گرفته می شود. در نواحی که هر دو سیال حضور داشته باشند، چگالی مخلوط از رابطه (۶) محاسبه می شود:

$$\rho = \frac{\rho_l}{\rho_v} \left\{ \frac{\rho_l + \rho_v}{2} + \frac{\rho_l - \rho_v}{2} \sin \left(\frac{2}{C_{\min}} \frac{p - p_{\text{vap}}}{\rho_l - \rho_v} \right) \right\} \quad (6)$$

$$p - p_{\text{vap}} > \Delta p_{\text{vap}} \\ |p - p_{\text{vap}}| < \Delta p_{\text{vap}} \\ p - p_{\text{vap}} < -\Delta p_{\text{vap}}$$

که p_{vap} فشار بخار سیال، $C_{\min}$ کم ترین سرعت صوت در سیال و $\Delta p_{\text{vap}} = \pi C_{\min}^2 / (\rho_l - \rho_v)$ در مدل باروتروپیک مقدار $C_{\min}$ نقش مهمی در تعیین اندازه طول و ضخامت حفره کاویتاسیون دارد. بهترین انتخاب این کمیت بین 1.5 m/s و 4.0 m/s است [۲۴]. کمیت دیگری که در جریان های کاویتاسیون از آن یاد می شود، عدد کاویتاسیون بوده که به صورت رابطه (۷) تعریف می شود [۲۸]:

$$s = \frac{p_\infty - p_{\text{vap}}}{1/2 \rho_\infty U_\infty^2} \quad (7)$$

۴- روش حجم محدود جیمسون

معادلات حاکم پیش شرط سازی ارائه شده در رابطه (۱) به شکل انتگرالی در یک حجم کنترل Ω که سطح آن $\partial\Omega$ است، به صورت رابطه (۸) بیان می شوند:

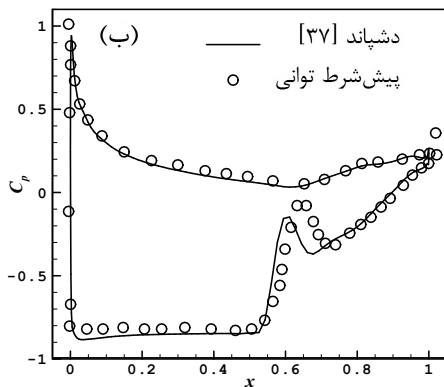
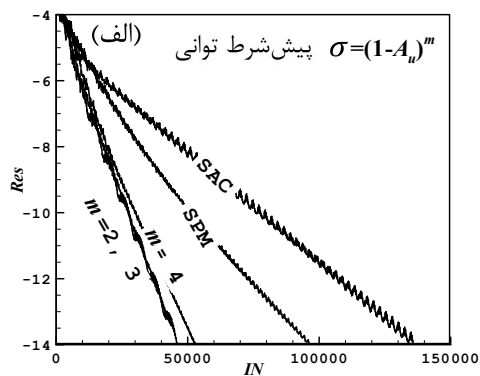
$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \bar{Q} dA + \bar{F} \oint_{\partial\Omega} (\bar{F} dx - \bar{E} dy) = 0 \quad (8)$$

این معادلات در شکل بقایی خود به روش حجم محدود سلول-مرکزی در حجم سلول محاسباتی (i,j) همراه با جملات اتلافی جیمسون [۳۴، ۳۳] به شکل رابطه (۹) در می آیند:

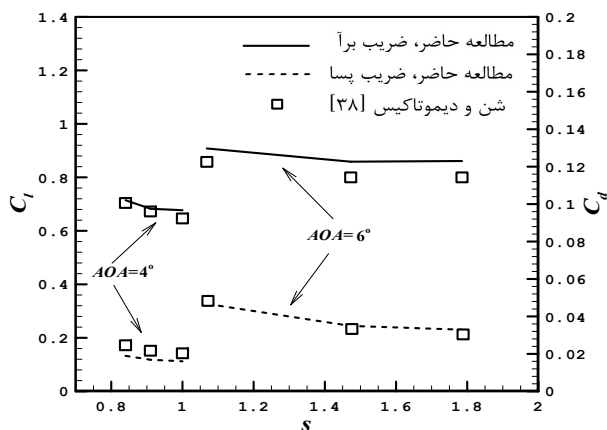
$$A_{i,j} \frac{\partial Q_{i,j,k}}{\partial t} = G_{i,j,k} + D_{i,j,k} \quad (9)$$

که $k=1, 2, 3$ شاخص مؤلفه های بردار، $A_{i,j}$ مساحت سلول (i,j) ام و $G_{i,j,k}$ شار عددی مرتبط با سلول است:

$$\begin{aligned} G_{i,j,1} &= \beta^2 \sum (F_1 dy - E_1 dx)_{i,j} \\ G_{i,j,2} &= -\frac{\sigma u_{i,j} G_{i,j,1}}{\beta^2} \sum (F_2 dy - E_2 dx)_{i,j} \\ G_{i,j,2} &= -\frac{\sigma u_{i,j} G_{i,j,1}}{\beta^2} \sum (F_2 dy - E_2 dx)_{i,j} \end{aligned} \quad (10)$$

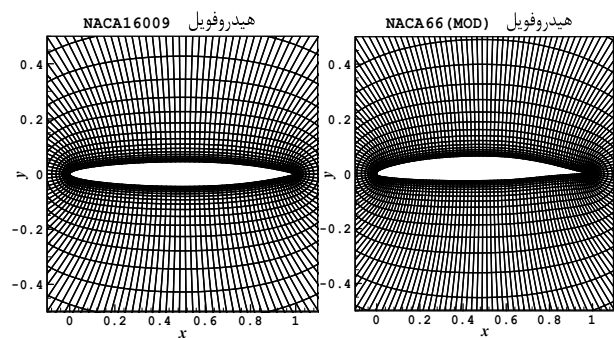


شکل ۴ جریان غیرلزج کاویتاسیونی عبوری از هیدروفویل NACA66(MOD) در زاویه حمله ۴ درجه و عدد کاویتاسیون ۰.۸۴: (الف) نرخ همگرایی (ب) توزیع فشار روی دیواره

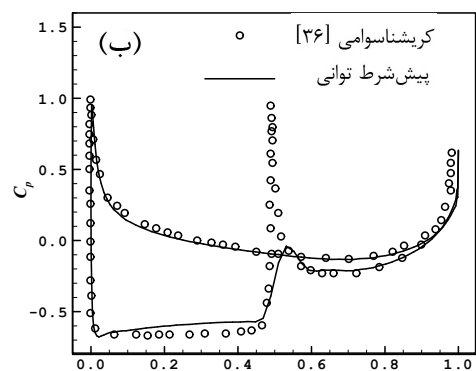
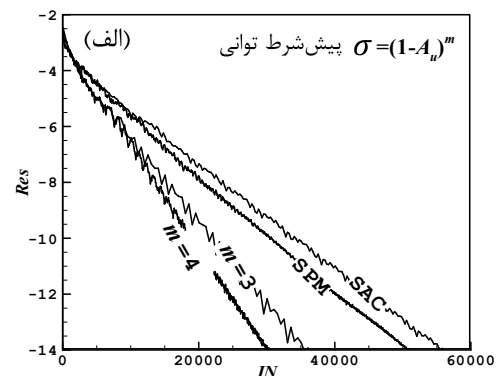


شکل ۵ ضریب برآ و پسای فشاری در جریان غیرلزج کاویتاسیونی برای هیدروفویل NACA66(MOD) بدون دمش در زاویه حمله ۴ و ۶ درجه

نتایج عددی ضرایب برآ و پسای فشاری در زاویه دمش ۹۰ درجه و سرعتها و موقعیت های مختلف جت دمش برای هیدروفویل های NACA16009 و NACA66(MOD)، به ترتیب در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است. C_{Lb} ضریب برآ و C_{Dab} ضریب پسای فشاری در حالت بدون جت می باشند. شایان یاد است که ضریب برآ، C_L و ضریب پسای فشاری، C_d به ترتیب از روابط $C_d = F_D / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 c$ و $C_L = F_L / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 c$ بدست می آیند که F_L ، نیروی برآ، F_D ، نیروی پسای فشاری و c طول وتر هیدروفویل است که در این تحقیق برابر واحد در نظر گرفته شده است. با توجه با شکل ۶ مشاهده می شود برای هیدروفویل NACA16009 دمش در تمامی سرعتها، ضریب برآ و پسای فشاری را نسبت به حالت بدون دمش کاهش می دهد و با افزایش نسبت سرعت دمش ضریب برآ و ضریب پسای فشاری کاهش می یابد. شکل ۷ نشان می دهد در هیدروفویل NACA66(MOD) دمش در نسبت سرعت پایین



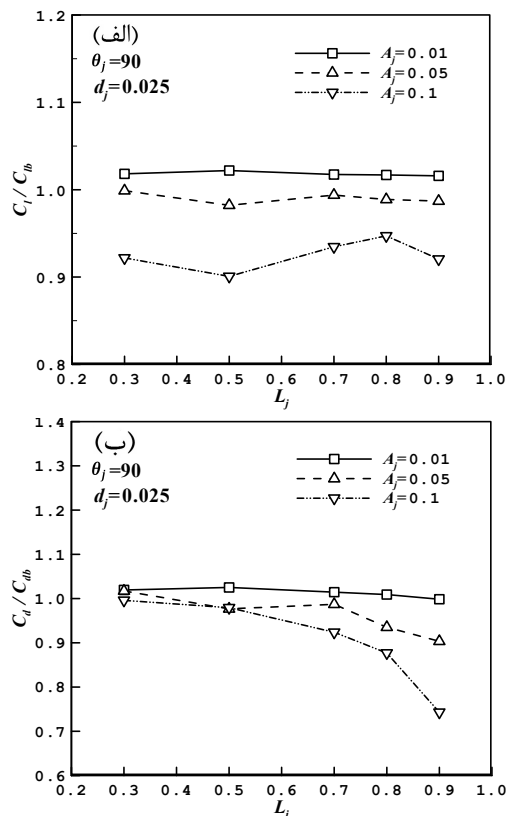
شکل ۲ نمونه ای از شبکه مورد استفاده برای هیدروفویل های NACA16009 و NACA66(MOD)



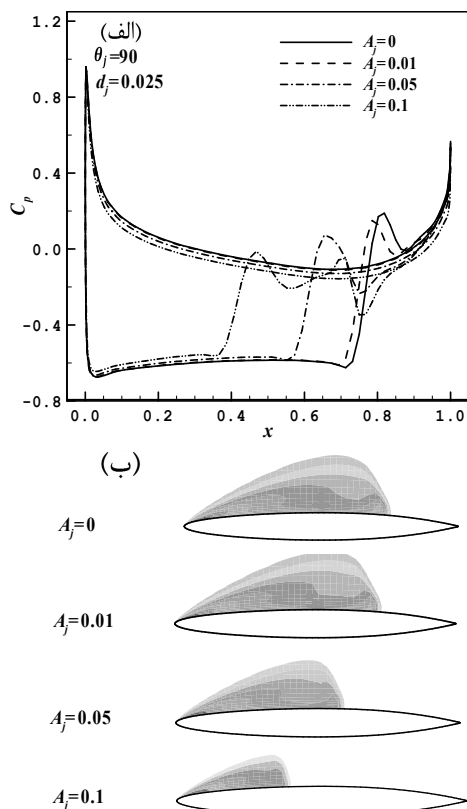
شکل ۳ جریان غیرلزج کاویتاسیونی عبوری از هیدروفویل NACA16009 در زاویه حمله ۳ درجه و عدد کاویتاسیون ۰.۶۶: (الف) نرخ همگرایی (ب) توزیع فشار روی دیواره

در شکل ۳ توزیع فشار روی دیواره هیدروفویل و نرخ همگرایی حل نشان داده شده است. مطابق شکل ۳ مشاهده می شود نتایج شبیه سازی عددی انطباق خوبی با نتایج عددی کریشناسوامی [۳۶] دارد و اعمال روش پیش شرط توانی نسبت به روش های دیگر پیش شرط بین ۳۶ تا ۴۵ درصد سرعت همگرایی را افزایش می دهد. برای هیدروفویل NACA66(MOD) توزیع فشار روی دیواره، C_p بدون اعمال دمش، با نتایج دشپاند و همکارانش [۳۷] مقایسه شده و به همراه نرخ همگرایی در شکل ۴ نمایش داده شده است. نتایج حاکی از انطباق خوب نتایج با داده های دشپاند و همکارانش [۳۷] و همچنین افزایش ۵۰ تا ۶۵ درصدی سرعت همگرایی است. جهت اعتبارسنجی تکمیلی، مقادیر ضریب برآ و پسای فشاری برحسب عدد کاویتاسیون برای هیدروفویل NACA66(MOD) محاسبه و با نتایج تجربی شن و دیموتاکیس [۳۸] در شکل ۵ مقایسه شده است. مقادیر محاسبه شده انطباق خوبی با نتایج تجربی دارد.

پس از اعتبارسنجی شبیه سازی عددی و ارزیابی سرعت همگرایی روش پیش شرط سازی توانی، اثر دمش روی ضرایب آئرو دینامیکی و طول کاویتا به طور جداگانه بررسی و نتایج آن ها ارائه شده اند.



شکل ۷ نتایج عددی دمش جریان کاویتاسیونی عبوری از هیدروفویل NACA66(MOD) در زاویه حمله ۴ درجه و عدد کاویتاسیون ۰.۸۴: (الف) ضریب برآ (ب) ضریب پسای فشاری

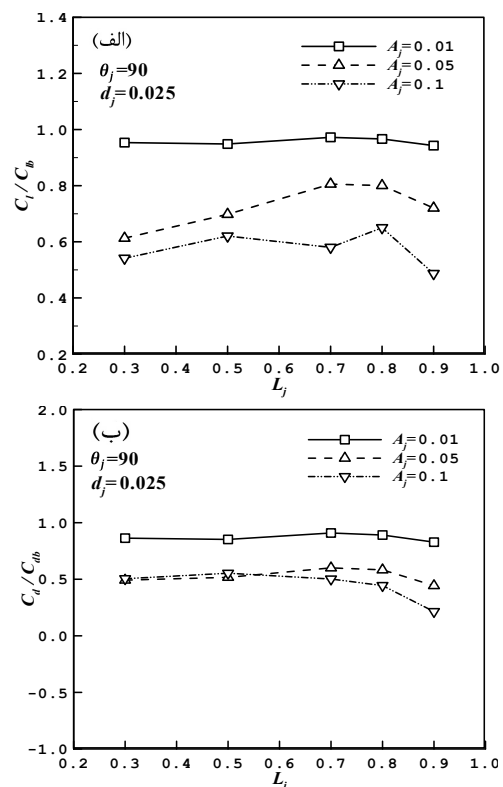


شکل ۸ جریان کاویتاسیونی عبوری از هیدروفویل NACA16009 در زاویه حمله ۳ درجه، عدد کاویتاسیون ۰.۶۶ و $L_j = 0.7$: (الف) توزیع فشار بر دیواره (ب) خطوط هم تراز چگالی

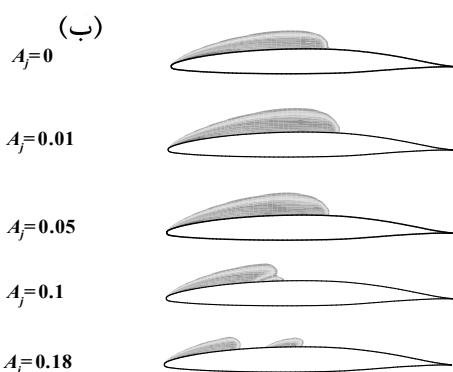
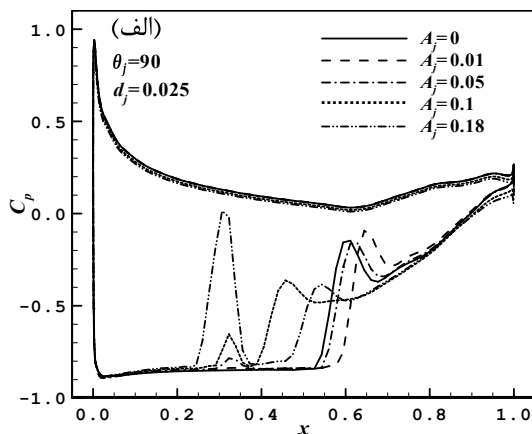
(۰/۱) ضریب برآ و پسای فشاری را نسبت به حالت بدون دمش افزایش می دهد، ولی با افزایش نسبت سرعت، ضریب برآ و پسای فشاری نسبت به حالت بدون دمش کاهش می یابد. همچنین نتایج نشان می دهد تغییر موقعیت جت دمش، تأثیر محسوسی بر ضرایب برآ و پسای فشاری ندارد.

در شکل ۸ منحنی ضریب فشار روی دیواره، C_p و خطوط هم تراز چگالی برای هیدروفویل NACA16009 در نسبت سرعت های مختلف دمش و $L_j = 0.7$ نشان داده شده است. ملاحظه می شود دمش سبب کاهش طول کاویتی نسبت به حالت بدون دمش می شود و با افزایش نسبت سرعت دمش طول کاویتی کاهش می یابد. با توجه به توزیع فشار (شکل ۸ الف) مشاهده می شود اختلاف توزیع فشار پایین دست کاویتی و سطح تحتانی هیدروفویل ناچیز است. در نتیجه سهم اعظم میزان ضریب برآ و پسای فشاری ناشی از اختلاف فشار ناحیه کاویتی و سطح تحتانی متناظر با ناحیه کاویتی هیدروفویل است که با کاهش طول کاویتی، این اختلاف فشار کاهش می یابد و همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود منجر به کاهش ضریب برآ و پسای فشاری می گردد. همچنین موقعیت های مختلف جت دمش بررسی گردید و همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود در $L_j = 0.3$ با افزایش نسبت سرعت جت و در $A_f = 0.15$ ، کاویتی به دو کاویتی کوچک تر تبدیل می شود.

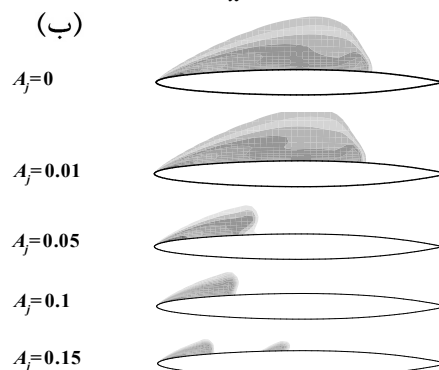
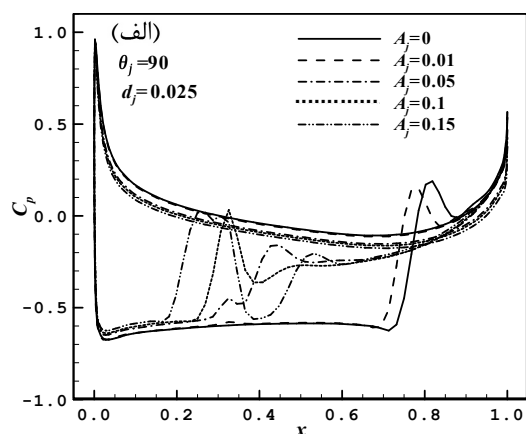
برای هیدروفویل NACA66(MOD) توزیع فشار بر دیواره، C_p و خطوط هم تراز چگالی در سرعت های مختلف دمش و $L_j = 0.7$ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود دمش در سرعت های پایین طول کاویتی را به طور قابل توجهی تغییر نمی دهد، ولی در سرعت بالا (۰/۱) سبب کاهش طول کاویتی نسبت به حالت بدون دمش می شود. همچنین مطابق شکل ۱۱ در $L_j = 0.3$ با افزایش نسبت سرعت جت و در $A_f = 0.18$ ، کاویتی به دو کاویتی کوچک تر تبدیل می شود.



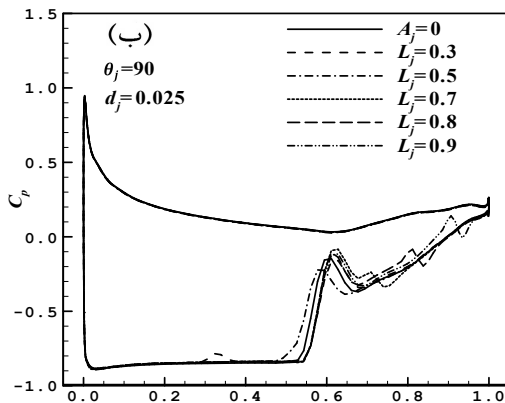
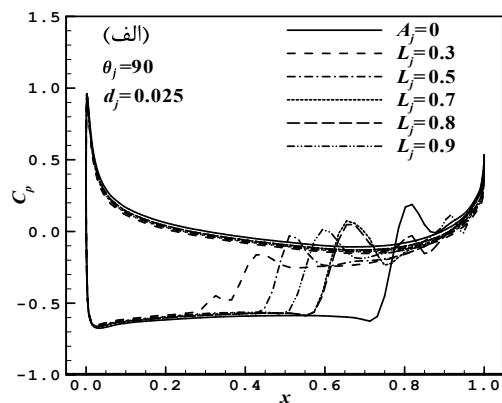
شکل ۹ نتایج عددی دمش در جریان کاویتاسیونی عبوری از هیدروفویل NACA16009 در زاویه حمله ۳ درجه و عدد کاویتاسیون ۰.۶۶: (الف) ضریب برآ (ب) ضریب پسای فشاری



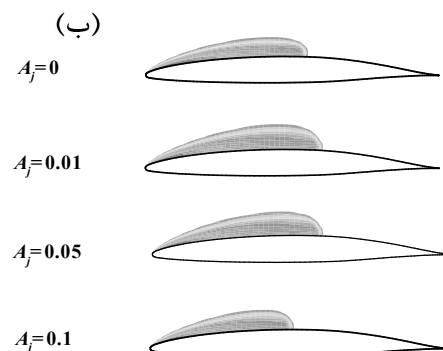
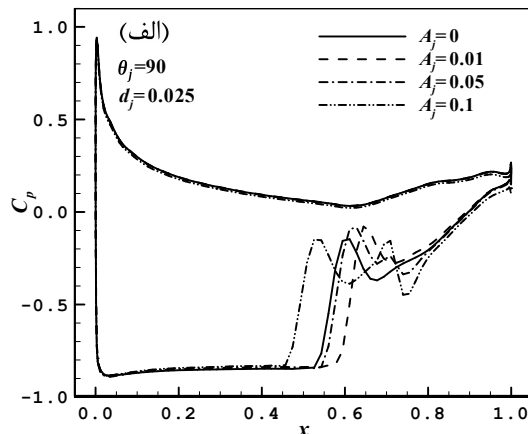
شکل ۱۱ جریان کاویتاسیونی عبوری از هیدروفویل NACA66(MOD) در زاویه حمله ۴ درجه، عدد کاویتاسیون 0.84 و $L_j = 0.3$: (الف) توزیع فشار بر دیواره (ب) خطوط هم‌تراز چگالی



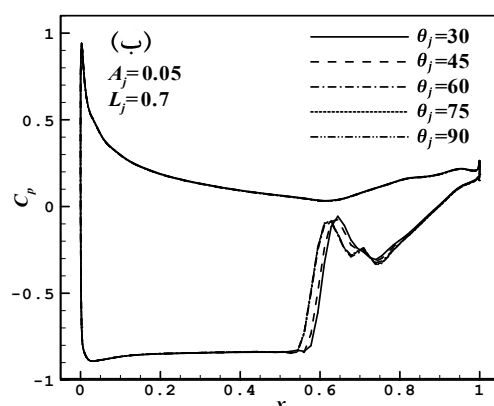
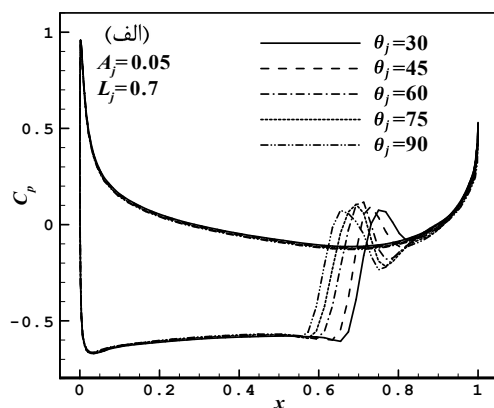
شکل ۹ جریان کاویتاسیونی عبوری از هیدروفویل NACA16009 در زاویه حمله ۳ درجه، عدد کاویتاسیون 0.66 و $L_j = 0.3$: (الف) توزیع فشار بر دیواره (ب) خطوط هم‌تراز چگالی



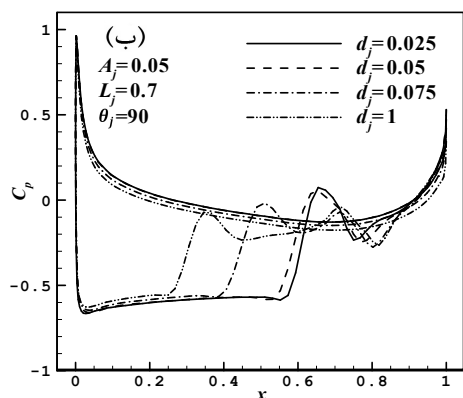
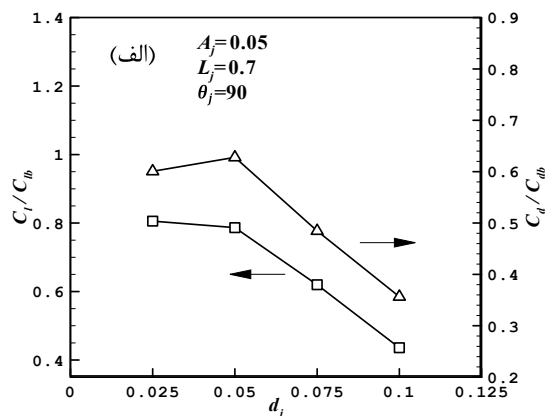
شکل ۱۲ توزیع فشار بر دیواره در موقعیت‌های مختلف دمش (الف) هیدروفویل NACA16009 در زاویه حمله ۳ درجه و عدد کاویتاسیون 0.66 (ب) هیدروفویل NACA66(MOD) در زاویه حمله ۴ درجه و عدد کاویتاسیون 0.84



شکل ۱۰ جریان کاویتاسیونی عبوری از هیدروفویل NACA66(MOD) در زاویه حمله ۴ درجه، عدد کاویتاسیون 0.84 و $L_j = 0.7$: (الف) توزیع فشار بر دیواره (ب) خطوط هم‌تراز چگالی



شکل ۱۴ توزیع فشار بر دیواره در زاوایای دمش مختلف، الف هیدروفویل NACA16009 در زاویه حمله ۳ درجه و عدد کاویتاسیون ۰.۶۶ ب هیدروفویل NACA66(MOD) در زاویه حمله ۴ درجه و عدد کاویتاسیون ۰.۸۴



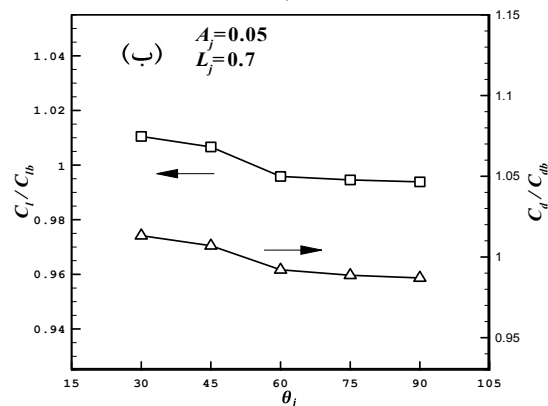
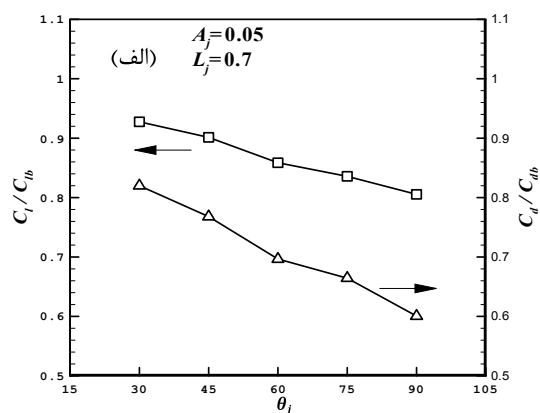
شکل ۱۵ اثر پهنای جت بر جریان کاویتاسیونی عبوری از هیدروفویل NACA16009: (الف) ضریب برآ و پسای فشاری (ب) توزیع فشار روی دیواره

برای بررسی اثر موقعیت دمش، توزیع فشار بر دیواره برای موقعیت های مختلف جت و نسبت سرعت $A_j = 0.05$ در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مشاهده می شود برای هیدروفویل NACA16009 هرچه جت دمش به لبه حمله نزدیک تر شود طول کاویتا کاهش می یابد، ولی برای هیدروفویل NACA66(MOD) محل قرارگیری جت تأثیر چندانی بر طول کاویتا ندارد.

شبیه سازی در زاوایای دیگر دمش نیز انجام شده و نتایج برای زاوایای دمش ۳۰ الی ۹۰ درجه در شکل های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۴ الف ملاحظه می شود برای هیدروفویل NACA16009 افزایش زاویه دمش، طول کاویتا را کم تر می کند و همان طور که در شکل ۱۳ الف مشاهده می شود سبب کاهش ضریب برآ و پسای فشاری می شود. در حالیکه براساس شکل ۱۴ ب برای NACA66(MOD)، تغییر زاویه دمش تأثیر محسوسی بر توزیع فشار دیواره و ضرایب برآ و پسای فشاری ایجاد نمی کند. اثر پهنای جت بر ضرایب برآ و پسای فشاری و توزیع فشار برای هیدروفویل NACA6609 در شکل ۱۵ نشان داده شده است. پهنای جت ۰.۲۵، ۰.۵، ۰.۷۵ و ۰.۱ درصد طول وتر بررسی شده است. با توجه به شکل ۱۵ (ب) مشاهده می شود با افزایش پهنای جت، طول کاویتا کاهش می یابد که مطابق شکل ۱۵ الف منجر به کاهش ضرایب برآ و پسای فشاری می شود.

۸- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی اثر دمش سیال از سطح هیدروفویل و پارامترهای دمش بر طول کاویتا و ضرایب آئرو دینامیکی پرداخته شده است. روش حجم محدود جیمسون برای تحلیل جریان های غیرلزج کاویتاسیونی به کار گرفته شده است.



شکل ۱۶ تأثیر زاویه دمش بر ضریب برآ و پسای فشاری: (الف) هیدروفویل NACA66(MOD) در زاویه حمله ۳ درجه و عدد کاویتاسیون ۰.۶۶ (ب) هیدروفویل NACA66(MOD) در زاویه حمله ۴ درجه و عدد کاویتاسیون ۰.۸۴

θ_j	زاویه دمش
ρ_∞	چگالی جریان آزاد
ρ_l	چگالی بخار
ρ_v	چگالی مایع
ρ	چگالی
σ	ضریب پیش‌شرط
زیر نویس‌ها	
j	جت دمش

۱۰- مراجع

- [1] J. A. Geurest, Linearized Theory for Fully Cavitated Hydrofoils, *International Shipbuilding Progress*, Vol. 7, No. 65, pp. 48-54, 1960.
- [2] J. S. Uhlman, The surface singularity method applied to partially cavitating hydrofoils, *Journal of Ship Research*, Vol. 32, No. 2, pp. 107-124, 1987.
- [3] S. A. Kinnas, N. E. Fine, Non linear Analysis of the flow around Partially or Supercavitating Hydrofoils by a Potential Based Panel Method, in *Proceeding of the IABEM-90 Symposium of the International Association for Boundary Element Methods*.
- [4] N. E. Fine, S. A. Kinnas, A boundary element method for the analysis of the flow around 3-D cavitating hydrofoils, *Journal of Ship Research*, Vol. 37, No. 1, 1993.
- [5] M. Dular, R. Bachert, B. Stoffel, B. Širok, Experimental evaluation of numerical simulation of cavitating flow around hydrofoil, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, Vol. 24, No. 4, pp. 522-538, 2005.
- [6] M. Pasandideh Fard, I. Rashidi-Toroghi, M. Tolami, Numerical Simulation of 2-D Supercavitation and partial cavitation, Using Boundary Element Method, *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 4, No. 3, pp. 15-28, 2008. (In Persian)
- [7] k. Hejranfar, E. Ezzat neshan, K. Fattah Hesari, Numerical simulation of two-dimentional turbulent cavitation flow by means of barotropic model around arbitrary hydrofoil using preconditioning method, in *12th Fluid Dynamics Conference*, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, 2009. (In Persian)
- [8] M. Soroshan, S. A. Mohsenpour, H. Soleimani, Modeling and Investigation of Unsteady and turbulent flow over hydrofoil, in *11th Marine Industries Conference*, Kish Island, Iran, 2009. (In Persian)
- [9] D.-q. Li, M. Grekula, P. Lindell, Towards numerical prediction of unsteady sheet cavitation on hydrofoils, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, Vol. 22, No. 5, Supplement 1, pp. 741-746, 2010.
- [10] M. M. Karim, M. S. Ahmmed, Numerical study of periodic cavitating flow around NACA0012 hydrofoil, *Ocean Engineering*, Vol. 55, No. 0, pp. 81-87, 2012.
- [11] M. Behbahani-Nejad, M. cHangizian, Reduced-Order modeling of unsteady partial cavity flows using the boundary element method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 140-152, 2013. (In Persian)
- [12] E. Roohi, A. P. Zahiri, M. Passandideh-Fard, Numerical simulation of cavitation around a two-dimensional hydrofoil using VOF method and LES turbulence model, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 9, pp. 6469-6488, 2013.
- [13] F. Celik, Y. Arikan Ozden, S. Bal, Numerical simulation of flow around two- and three-dimensional partially cavitating hydrofoils, *Ocean Engineering*, Vol. 78, No. 0, pp. 22-34, 2014.
- [14] A. J. Chorin, A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems, *Journal of Computational Physics*, Vol. 2, pp. 12-26, 1967.
- [15] E. Turkel, Preconditioning Methods for Solving the Incompressible and Low Speed Compressible Equations, *Journal of Computational Physics*, Vol. 72, pp. 227-298, 1987.
- [16] Y. Choi, C. Merkle, Application of Preconditioning in Viscous Flows, *Journal of Computational Physics*, Vol. 105, pp. 207-223, 1993.
- [17] M. R. Zaccanti, *Analysis and Design of Preconditioning Methods for the Euler Equations* PhD Thesis, College of Engineering Mississippi State., 1999.
- [18] A. G. Malan, R. W. Lewis, P. Nithiarasu, An improved unsteady, unstructured, artificial compressibility, finite volume scheme for viscous incompressible flows: Part I. Theory and Implementation, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 54, pp. 659-714, 2002.
- [19] V. B. Leer, W. T. Lee, P. Roe, Characteristic Time-Stepping or Local Preconditioning of the Euler Equations, *AIAA Paper, AIAA-91-1552-CP*, 1991.

همچنین از روش پیش‌شرط توانی جهت تسریع در روند همگرایی بهره گرفته شده است. پایداری حل به کمک جملات اتلافی مرتبه دوم و چهارم به‌دست آمده است. برای پیمایش در زمان و رسیدن به حالت دائم از الگوریتم چهار مرحله‌ای رانگ-کوتا استفاده شده است. در این مطالعه برای شبیه‌سازی جریان‌های کاویتاسیونی از مدل باروتروپیک معرفی شده توسط دلانوی استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی، انطباق بسیار خوبی با نتایج و کارهای عددی و تجربی محققان دیگر دارد. مشاهده می‌شود که اعمال روش پیش‌شرط توانی تأثیر به‌سزایی در افزایش سرعت همگرایی حل دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که دمش سبب کاهش طول کاویتا و ضرایب برآ و پسای فشاری نسبت به حالت بدون جت می‌شود و با افزایش نسبت سرعت دمش، طول کاویتا، ضرایب برآ و پسای فشاری کاهش می‌یابد. افزایش زاویه دمش، طول کاویتا، ضرایب برآ و پسای فشاری را کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش پهنای جت، طول کاویتا، ضرایب برآ و پسای فشاری کاهش می‌یابد. در ادامه، پیشنهاد می‌شود مطالعه‌ای جدی درخصوص بهینه‌سازی شرایط تزریق نظیر انتخاب قدرت دمش، محل دمش، ابعاد پهنای دمش و تعداد شکاف‌های تزریق با عنایت به نحوه شکل‌گیری کاویتا و ضرایب آنرودینامیکی به عنوان فعالیت‌های آتی در راستای این تحقیق صورت پذیرد.

۹- فهرست علائم

A_j	نسبت سرعت دمش، V_j/U_∞
AOA	زاویه حمله
c	طول وتر هیدروفویل
C_d	ضریب پسای فشاری، $C_d = F_D / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 c$
C_{db}	ضریب پسای فشاری بدون جت دمش
C_l	ضریب برآ، $C_l = F_L / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 c$
C_{lb}	ضریب برآ بدون جت دمش
C_{min}	کمترین سرعت صوت
C_p	ضریب فشار، $C_p = (p - p_\infty) / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2$
d_j	پهنای جت
F_D	نیروی پسای فشاری
F_L	نیروی برآ
IN	تعداد تکرار عددی
L_j	محل قرار گیری جت دمش
p	فشار
p_∞	فشار جریان آزاد
p_{vap}	فشار بخار
Res	باقیمانده
s	عدد کاویتاسیون
u	سرعت در راستای محور x
U_∞	سرعت جریان آزاد
v	سرعت در راستای محور y
V_j	سرعت جت دمش
x	محور x
y	محور y

علائم یونانی

β	ضریب تراکم‌پذیری مصنوعی
---------	-------------------------

- [29] O. Coutier-Delgosha, F. Deniset, J. A. Astolfi, J. B. Leroux, Numerical Prediction of Cavitating Flow on a Two-Dimensional Symmetrical Hydrofoil and Comparison to Experiments, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 129, pp. 279-292, 2007.
- [30] V. Esfahanian, P. Akbarzadeh, k. hejranfar, Power-Law Preconditioning in Numerical Solution of the 3rd order Non-Cavitation and Cavitation Flows, in *1st Applied Hydrodynamics Conference*, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran, 2010. (In Persian)
- [31] C. S. Song, Current Status of CFD for Cavitating Flows, in *Proceeding of the 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*.
- [32] T. G. Liu, B. C. Khoo, W. F. Xie, Isentropic One-Fluid Modelling of Unsteady Cavitating Flow, *Journal of Computational Physics*, Vol. 201, pp. 80-108, 2004.
- [33] A. Jameson, *Steady-state solution of the Euler equations for transonic flow*, *Proceedings of Transonic, Shock, and Multidimensional Flows*, New York: Advances in Scientific Computing, Academic Press, 1982.
- [34] V. Esfahanian, P. Akbarzadeh, The Jameson's numerical method for solving the incompressible viscous and inviscid flows by means of artificial compressibility and preconditioning method, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 206, No. 2, pp. 651-661, 2008.
- [35] A. Jameson, W. Schmidt, E. Turkel, Numerical solutions of the Euler equations by finite volume methods using Runge-Kutta time-stepping schemes, *AIAA Paper*, AIAA-1981-1259, 1981.
- [36] P. Krishnaswamy, *Flow modelling for partially cavitating hydrofoils*, PhD Thesis, Denmark, 2000.
- [37] M. Deshpand, J. Feng, C. L. Merkle, Cavity Flow Predictions Based on the Euler Equations, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 116, pp. 36-44, 1994.
- [38] Y. T. Shen, P. E. Dimotakis, The Influence of Surface Cavitation on Hydrodynamic Forces, in *22nd American Towing Tank Conference*, 1989, pp. 44-53.
- [20] A. G. Malan, R. W. Lewis, P. Nithiarasu, An improved unsteady, unstructured, artificial compressibility, finite volume scheme for viscous incompressible flows, Part II. Application, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 54, pp. 715-729, 2002.
- [21] V. Esfahanian, P. Akbarzadeh, A Local Power-Law Preconditioning Method for Steady Incompressible Flows, in *Second International Conference on Energy Conversion and Conservation (CICME10)*, Hammamet, Tunisia, 2010.
- [22] V. Esfahanian, P. Akbarzadeh, K. Hejranfar, An improved progressive preconditioning method for steady non-cavitating and sheet-cavitating flows, *INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN FLUIDS*, Vol. 68, pp. 210-232, 2012.
- [23] Y. Delannoy, J. L. Kueny, Two phase flow approach in unsteady cavitation modeling, Cavitation and Multiphase Flow Forum, *ASME-FED*, Vol. 98, pp. 153-158, 1990.
- [24] C. L. Merkle, J. Feng, P. E. O. Buelow, Computational Modelling of the Dynamics of Sheet Cavitation, in *3rd International Symposium on Cavitation*, Grenoble, France, 1998.
- [25] C. Song, J. He, Numerical Simulation of Cavitating Flows by Single-Phase Flow Approach, in *3rd International Symposium on Cavitation*, Grenoble, France, 1998, pp. 295-300.
- [26] O. Coutier-Delgosha, R. Fortes-Patella, J. L. Reboud, Evaluation of the Turbulence Model Influence on the Numerical Simulations of Unsteady Cavitation, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 125, pp. 38-45, 2003.
- [27] O. Coutier-Delgosha, R. Fortes-Patella, J. Reboud, L., N. Hakimi, C. Hirsch, Stability of Preconditioned Navier-Stokes Equations Associated with a Cavitation Model, *Computers & Fluids*, Vol. 34, pp. 319-349, 2005.
- [28] O. Coutier-Delgosha, R. Fortes-Patella, J. Reboud, L., N. Hakimi, C. Hirsch, Numerical Simulation of Cavitating Flow in 2D and 3D Inducer Geometries, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 48, pp. 135-167, 2005.