

## شبیه‌سازی عددی جریان کاویتاسیون جزئی حول هیدروفویل به روش المان مرزی با استفاده از مدل جت بازگشتی

محمود پسندیده فرد<sup>۱</sup>، سینا افخمی<sup>۲</sup>، مهدی نوروزی<sup>۳</sup>

۱ و ۲- دانشکده مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

یکی از پدیده‌هایی که بررسی و تحقیق بسیاری از محققان در مهندسی را به خود جلب کرده است، پدیده کاویتاسیون می‌باشد. در این مقاله به شبیه‌سازی جریان همراه با کاویتاسیون جزئی حول هیدروفویل پرداخته شده است، برای این شبیه‌سازی از روش المان مرزی مبتنی بر تئوری گرین استفاده شده است. برای این منظور از یک الگوریتم دو مرحله‌ای استفاده شده تا انتهای کاویتا با استفاده از مدل جت بازگشتی مدل شود. در مرحله اول طول کاویتا ورودی مساله است و عدد کاویتاسیون و شکل کاویتا با استفاده از الگوریتم طول ثابت بدست می‌آید، سپس با محاسبه ارتفاع جت بازگشتی، با الگوریتم عدد کاویتاسیون ثابت و شکل اولیه حاصل از مرحله قبل، مساله حل می‌شود تا به شکل نهایی همگرا شود. مشاهده می‌شود این روش مطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. خصوصاً هندسه و مقدار ضریب فشار انتهای کاویتا را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. سرعت بالای همگرایی و دقت نسبتاً مطلوب از مزایای قابل توجه این روش است.

**واژه‌های کلیدی:** کاویتاسیون جزئی- روش المان مرزی- هیدروفویل- مدل جت بازگشتی

### مقدمه

یکی از پدیده‌هایی که بررسی و تحقیق بسیاری از محققان در مهندسی را به خود جلب کرده است، پدیده کاویتاسیون می‌باشد. کاویتاسیون زمانی رخ می‌دهد که فشار در حوزه‌ای از سیال به پایین‌تر از فشار بخار آن برسد. در این وضعیت در درون سیال، محدوده‌ای با سطوح معین شروع به رشد می‌کند که فاز درون آن به صورت بخار است و در سراسر ناحیه داخل حباب، فشار ثابتی که به مراتب از فشار سیال کمتر و برابر فشار بخار مایع می‌باشد به وجود می‌آید. زمانی که کاویتاسیون قسمتی از سطح جسم را در بر بگیرد اصطلاحاً کاویتاسیون جزئی رخ داده است. گاهی ایجاد شرایط کاویتاسیون جزئی بر روی اجسام غوطه‌ور در آب، می‌تواند مزایای قابل توجهی داشته باشد؛ زیرا با به وجود آمدن کاویتاسیون در اطراف یک جسم غوطه‌ور، جسم به جای این که با فاز مایع در تماس باشد، با فاز بخار در تماس قرار می‌گیرد. واز آنجایی که لزجت گازها به مراتب کمتر از لزجت مایعات است، این پدیده منجر به کاهش اساسی نیروی پسای وارد بر جسم می‌شود. غالباً مشاهده می‌شود که جریان سیال اصلی گذرنده از روی سطح کاویتا، تمایل دارد از انتهای کاویتا به درون آن برمی‌گردد که این جریان بازگشتی، جت بازگشتی نامیده می‌شود. علت به وجود آمدن جت بازگشتی را می‌توان به تمایل سیال برای حرکت از محیط با فشار بالا به محیط کم فشار داخل کاویتا نسبت داد. نتایج تجربی حاکیست که برای ایجاد جت

بازگشتی دو شرط لازم است شرط اول گرادین فشار معکوس زیاد در انتهای کاویتا و شرط دوم کاویتا با ضخامت بالا، که کاویتای‌های با طول کم ضخامت زیادی ندارند و کاویتای‌های با طول زیاد گرادین فشار معکوس زیادی ندارند بنابراین کاویتای‌های بلند و کوتاه جت بازگشتی قابل ملاحظه‌ای ندارند و تنها کاویتای‌های با طول متوسط، دارای جت بازگشتی قابل توجهی هستند [۱]. به علت وجود جهت‌ها و فازهای مختلف جریان سیال در انتهای کاویتا، شبیه‌سازی این منطقه بسیار پیچیده است. حل کامل معادله ناویر استوکس که در آن نیازی به شبیه‌سازی منطقه انتهای کاویتا نیست ولی هزینه محاسباتی زیادی در بر دارد. ولی در روش‌های المان مرزی بر پایه پتانسیل می‌بایست انتهای کاویتا مدل شود. تاکنون مدل‌های مختلفی برای انتهای کاویتا پیشنهاد شده است که مدل جت بازگشتی، فیزیکی‌ترین مدل پیشنهاد شده برای انتهای کاویتا می‌باشد و تطابق خوبی با واقعیت این پدیده دارد. افراد زیادی سعی در شبیه‌سازی این پدیده داشته‌اند بیرهوف [۲] و گیلبرگ [۳]. در یک جریان متقارن پشت صفحه تخت عمودی، جت بازگشتی را مشاهده نمودند، فرنس و هاتون [۴] به بررسی آزمایشگاهی کاویتاسیون پرداختند. پلونو راتو [۵] به بررسی عددی کاویتاسیون گسترده حول هیدروفویل پرداختند. کیناس و فاین [۶] به بررسی کاویتاسیون جزئی و گسترده حول هیدروفویل با استفاده از روش المان مرزی پرداختند. آنها برای ناحیه انتهایی کاویتا از مدل بازیاب فشار استفاده کردند. کریشناسوامی [۷] به بررسی کاویتاسیون حول هیدروفویل دو بعدی با استفاده از روش المان مرزی پرداخت. وی برای مدل کردن انتهای کاویتا از مدل جت بازگشتی استفاده کرد. آهلمن و همکاران [۸] نیز از مدل جت بازگشتی برای تحلیل کاویتاسیون گسترده پشت هندسه‌های متقارن محوری مانند دیسک استفاده نموده‌اند. پسندیده فرد و نوروزی [۹] به بررسی کاویتاسیون حول هندسه‌های متقارن محوری مختلف با روش المان مرزی و مدل جت بازگشتی پرداختند.

در این مقاله به بررسی کاویتاسیون جزئی روی هیدروفویل به روش المان مرزی پرداخته شده است. برای مدل کردن انتهای کاویتا از مدل جت بازگشتی استفاده شد. الگوریتم حل به این صورت است که در ابتدا با استفاده از روش طول ثابت و استفاده از مدل بستن ساده در انتهای کاویتا، مقادیر عدد کاویتاسیون و توزیع فشار حول هیدروفویل بدست می‌آید و هندسه کاویتا مشخص می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از مقادیر به دست آمده از مرحله قبل، ارتفاع جت بازگشتی با استفاده از رابطه تحلیلی کالتر [۱۰] به دست می‌آید. با تعبیه یک جت بازگشتی با طول و ارتفاع مشخص در شکل کاویتا همگرا شده در مرحله قبل، به عنوان شکل اولیه استفاده می‌کنیم و با استفاده از روش عدد کاویتاسیون ثابت مسئله حل می‌شود و توزیع فشار و شکل جدید کاویتا بدست می‌آید مشاهده می‌شود که با بکار بردن مدل بستن ساده، در انتهای کاویتا شاهد یک

۱- دانشیار

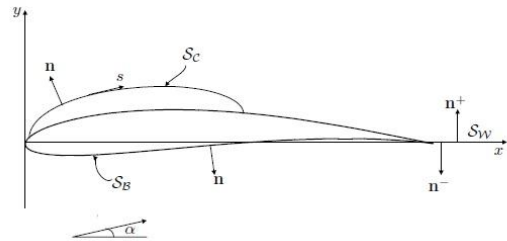
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد هوافضا sina.afkhami@gmail.com

۳- دانشجوی دکتری تبدیل انرژی

پرش نا متعارف هستیم که با بکارگیری مدل جت بازگشتی این پرش تاحدی اصلاح و به مقادیر واقعی نزدیک تر می شود.

### معادلات حاکم

مطابق شکل (۱) یک هیدروفویل با کاویتاسیون جزئی در جریان یکنواخت با سرعت  $U_\infty$  و زاویه حمله  $\alpha$  قرار دارد. در این مطالعه فرض بر این است که جریان پایدار، غیر چرخشی، غیر قابل تراکم و غیرلزج می باشد.



شکل ۱-نمای دو بعدی هیدروفویل با کاویتاسیون جزئی با مدل بستن ساده

پتانسیل سرعت روی هیدروفویل و کاویتا باید معادله لاپلاس را ارضا کند.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

منظور از  $\phi$  پتانسیل کل میباشد.

شرط های مرزی که میبایست ارضا شوند:

الف: شرط مرزی سینماتیکی روی سطح جسم و کاویتا: برای این که سطح هیدروفویل خط جریان باشد، میبایست سرعت عمودی بر هیدروفویل برابر صفر باشد.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (2)$$

به طوریکه منظور از  $\vec{n}$  بردار یکه نرمال بر سطح هیدروفویل است.

ب: شرط مرزی دینامیکی روی سطح کاویتا: چون جریان حول کاویتا تا حد زیادی غیرچرخشی است، می توان با استفاده از معادله برنولی، سرعت ثابتی برای جریان روی سطح کاویتا به دست آورد.

$$U_c = U_\infty \sqrt{1 + \sigma} \quad (3)$$

که  $\sigma$  عدد بدون بعد کاویتاسیون است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\sigma = \frac{P_\infty - P_c}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (4)$$

که  $U_\infty$  و  $P_\infty$  به ترتیب سرعت و فشار جریان آزاد می باشد. و  $P_c$  فشار بخار مایع می باشد. با توجه به بی بعد سازی سرعت با  $U_\infty$ ، مولفه مماسی سرعت روی سطح کاویتا به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \phi}{\partial s} = \sqrt{1 + \sigma} \quad \text{on } S_c \quad (5)$$

منظور از  $S_c$  سطح کاویتا میباشد. با انتگرال گیری از رابطه (۴) خواهیم داشت:

$$\phi = \phi_0 + \sqrt{1 + \sigma} (s - s_0) \quad \text{on } S_c \quad (6)$$

ج) شرط مرزی دینامیکی روی سطح جت بازگشتی: مطالعات نشان میدهد که سرعت جت بازگشتی از مرتبه سرعت جریان آزاد است و معمولاً مقداری کمتر از آن است. البته ضخامت کاویتا می تواند سرعت جت بازگشتی را دستخوش تغییراتی کند. بر اساس تحلیل های جریان پتانسیل، فرض می شود که جت بازگشتی با ضخامت ثابتی به درون کاویتا بر می گردد و هم چنین سرعت جریان عمود بر مقطع ورودی جت

بازگشتی برابر سرعت جریان در مرز کاویتا یعنی  $U_c$  است [۱۱]. بنابراین داریم:

$$\phi_{jet} = \phi_0 + \sqrt{1 + \sigma} (s_{jet} - s_0) \quad \text{on } S_j \quad (7)$$

که در آن منظور از  $S_j$  سطح جت است و  $s_{jet}$  برابر طول کمان لبه سطح مقطع جت می باشد.

د: شرط مرزی انتهای کاویتا: در مدل بستن ساده ارتفاع نسبی کاویتا در نقطه انتهای کاویتا می بایست صفر باشد.

$$h(s_1) = 0 \quad (8)$$

که منظور از  $h(s_1)$  ضخامت نسبی کاویتا در نقطه انتهای کاویتا است

ه: شرط کوتا در لبه فرار هیدروفویل: مطابق با این شرط میبایست سرعت در لبه فرار هیدروفویل محدود باشد.

$$\nabla \phi < \infty \quad (9)$$

### استخراج معادلات انتگرالی

با بکارگیری تئوری سوم گرین برای سطح جسم و کاویتا می توان نوشت:

$$\phi = \int_{s_b + s_c + s_{jet}} \left[ \frac{\partial \phi}{\partial n} \phi_s - \phi \frac{\partial \phi_s}{\partial n} \right] ds + \int_{s_w} \Delta \phi_w \frac{\partial \phi_s}{\partial n} ds \quad (10)$$

که منظور از  $\phi_s$  پتانسیل یک چشمه به قدرت واحد در حالت دوبعدی است.

$$\phi_s = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln r \quad (11)$$

منظور از  $s_b$ ،  $s_c$  و  $s_w$  به ترتیب سطح هیدروفویل، سطح کاویتا و سطح دنباله میباشد. منظور از  $\Delta \phi_w$  اختلاف پتانسیل روی سطح دنباله می باشد.

$$\Delta \phi_w = \phi_w^+ - \phi_w^- \quad (12)$$

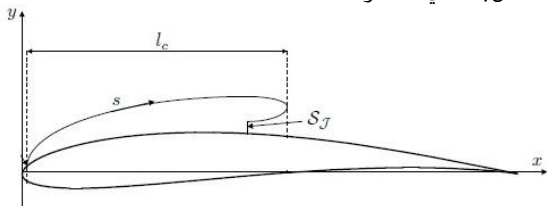
### گسسته سازی معادلات

به منظور استفاده از متدهای حل عددی معادلات انتگرالی، میبایست این معادلات را با گسسته سازی، به صورت گروهی از معادلات جبری درآورد. برای این منظور سطح هیدروفویل و کاویتا به ترتیب با  $n_b$  و  $n_c$  پانل شامل چشمه و دوگان تقریب زده می شود. با توجه به رابطه و شرایط مرزی  $n_b$  قدرت دوگان و  $n_c$  قدرت چشمه و یک عدد کاویتاسیون مجهول است. بنابراین مساله تعداد  $(n_b + n_c)$  معادله حاصل از رابطه (۱۰) و تعداد  $(n_b + n_c + 1)$  مجهول داریم. مشاهده می شود که یک مجهول اضافی داریم. برای کامل شدن دستگاه معادلات خطی و حل دستگاه معادلات نیاز به یک معادله کمکی داریم. برای این منظور از این مفهوم استفاده می شود که مجموع قدرت خالص چشمه های توزیع شده روی سطح کاویتا با شار عبوری از مقطع عمودی جت بازگشتی برابر است [۱۰]. این مفهوم به صورت زیر بیان می شود.

$$\int_{s_b + s_c + s_j} \frac{\partial \phi}{\partial n} ds = \sqrt{1 + \sigma} \int_{s_j} ds \quad (13)$$

### الگوریتم حل طول ثابت

الگوریتم عدد کاویتاسیون ثابت است، شکل اولیه از اهمیت ویژه ای برخوردار است به نحوی که حل برای برخی از شکل های اولیه جواب قابل قبولی نمی دهد. این مساله یکی از نقاط ضعف مدل جت بازگشتی است [۱۱]. پس از محاسبه ارتفاع جت بازگشتی نقطه انتهایی کاویتی که از الگوریتم طول ثابت بدست آمد در راستای عمود بر بدنه جسم و به اندازه ارتفاع جت، از سطح جسم جدا می شود و بدین ترتیب نقطه شروع برگشت جت به درون کاویتی مشخص می گردد. میزان پیشروی جت بازگشتی به درون کاویتی ورودی مساله است. با توجه به اینکه این طول، در فصل مشترک کاویتی و جریان جت قرار دارد، لذا آن را باید به عنوان جزئی از کاویتی در نظر گرفت و متناسب با دیگر المان ها مساله، المان بندی نمود.



شکل ۲- هیدروفویل با کاویتاسیون جزیی با مدل جت بازگشتی

بدین ترتیب در حل دستگاه معادلات گرین بر روی سطح کاویتی، المانهای مذکور نیز باید حل شوند. مقطع عمودی جت بازگشتی نیز که از آخرین نقطه پیشروی جت بازگشتی به درون کاویتی شروع و به سطح جسم ختم می شود می بایست المان بندی گردد و در معادلات گرین مورد استفاده قرار گیرد. ولی نیازی به حل المان های روی مقطع عمودی جت نمی باشد و صرفاً به عنوان شرایط مرزی دستگاه در معادلات گرین مورد استفاده قرار می گیرد. مطابق الگوریتم عدد کاویتاسیون ثابت دستگاه معادلات حل می شوند. با این تفاوت که حدس طول اولیه کاویتی مقدار درستی می باشد و فقط شکل کاویتی پس از چند تکرار همگرا می شوند.

### محاسبه ارتفاع جت

به منظور تعیین ضخامت جت بازگشتی، از رابطه تحلیلی زیر که توسط کالندر [۱۰] ارائه گردیده استفاده می شود.

$$h_{jet} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1+\sigma}} \right] + \frac{1}{4} \frac{dc_p}{d} \quad (۱۶)$$

که رابطه ای بر حسب عدد کاویتاسیون ( $\sigma$ )، گرادیان ضریب فشار ( $C_p$ )، در انتهای کاویتی، بیشینه ضخامت کاویتی ( $d$ ) و طول کاویتی ( $l$ ) است. طول جت بازگشتی نیز، درصدی اختیاری از طول کاویتی خواهد بود.

### نتایج عددی

برای شبیه سازی عددی لازم است استقلال از شبکه بررسی شود، به این منظور جریان حول هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ همراه با کاویتاسیون جزیی به طول نسبی ( $l/c=0.5$ ) بررسی شد. شکل (۲) نمودار عدد کاویتاسیون بدست آمده از الگوریتم طول ثابت به ازای تعداد پانل های مختلف

با توجه به این الگوریتم طول کاویتی به عنوان ورودی مساله در نظر گرفته می شود و خروجی مساله عدد کاویتاسیون و شکل کاویتی می باشد. این الگوریتم شامل مراحل زیر است.

الف: ابتدا با توجه به طول اولیه کاویتی شکل اولیه آن مشخص می گردد. (معمولاً سطح هیدروفویل در نظر گرفته می شود).

ب: با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) مقادیر قدرت دوگان ها و چشمه ها و عدد کاویتاسیون به دست می آید. (تا اینجا روی سطح کاویتی تنها شرط مرزی دینامیکی ارضا شده است)

ج: در این مرحله از شرط مرزی سینماتیکی برای اصلاح شکل کاویتی استفاده می شود. در حقیقت برای این که سرعت عمودی بر پانل های سطح کاویتی وجود نداشته باشد، این پانلها به صورت موازی با جهت سرعت نقاط کنترل آنها قرار خواهند گرفت. شکل عددی شرط فوق به صورت زیر است:

$$\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} = \frac{V_{yi}}{V_{xi}} \quad (۱۴)$$

منظور از  $(x_i, y_i)$  و  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  مختصات دوسر هر پانل می باشد و منظور از  $(V_{xi})$  و  $(V_{yi})$  مولفه های افقی و عمودی سرعت روی هر پانل می باشد.

شرط همگرایی برای این الگوریتم این است که حاصل جمع قدرت چشمه ها روی سطح کاویتی برابر صفر شود.

$$\sum_{i=1}^{n_c} \frac{\partial \phi}{\partial n_i} = 0 \quad (۱۵)$$

منظور از  $n_c$  تعداد پانل های روی کاویتی است.

### الگوریتم حل عدد کاویتاسیون ثابت

با توجه به این الگوریتم عدد کاویتاسیون به عنوان ورودی مساله و طول و شکل کاویتی خروجی مساله است. ملاحظه می شود که در این روش به معادله اضافی نیازی نیست.

الف: از آنجایی که طول کاویتی به عنوان خروجی مساله می باشد، یک طول دلخواه به عنوان حدس اولیه در نظر می گیریم و شکل اولیه کاویتی مانند حالت طول ثابت بر روی هیدروفویل بدست می آید.

ب: با استفاده از روابط و مقادیر پتانسیل و سرعت عمودی بر هر پانل بدست می آید

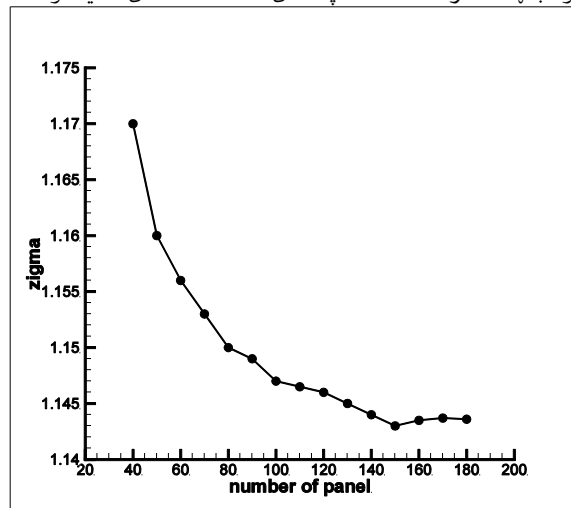
ج: در این مرحله از شرط مرزی سینماتیکی برای اصلاح شکل کاویتی استفاده می شود. چنانچه طول کاویتی درست حدس زده شده باشد می بایست ارتفاع کاویتی نسبت به سطح جسم در نقطه انتهایی کاویتی برابر صفر باشد. اگر این طول کمتر از طول واقعی باشد ارتفاع کاویتی در نقطه انتهای کاویتی بالای سطح جسم قرار میگیرد و در حالتی که طول کاویتی بیشتر حدس زده شده باشد عکس این مساله اتفاق می افتد.

د: در صورت صفر نبودن ارتفاع نسبی بدست آمده در نقطه انتهایی کاویتی، با توجه به مثبت یا منفی بودن این ارتفاع حدس اولیه طول کاویتی را اصلاح می کنیم تا این ارتفاع نسبی برابر صفر شود.

### الگوریتم ترکیبی

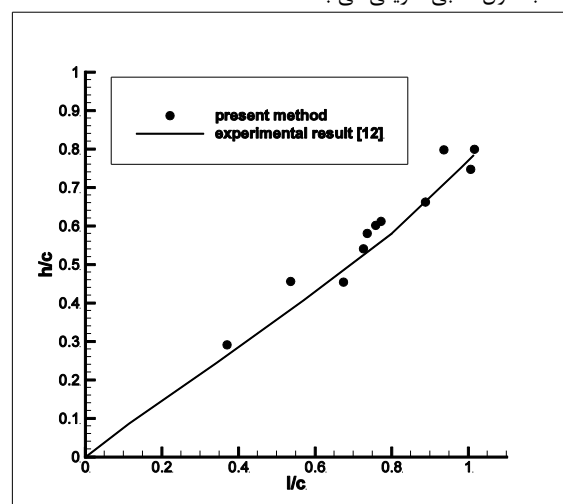
برای مدل کردن جت بازگشتی از یک الگوریتم دو مرحله ای استفاده می کنیم به طوری که در مرحله اول با استفاده از الگوریتم طول ثابت عدد کاویتاسیون، توزیع فشار و شکل کاویتی بدست می آید. سپس با استفاده از رابطه تحلیلی کالندر ارتفاع جت بازگشتی به دست می آید. در مرحله بعد که

است. مشاهده می شود که در ۱۵۰ پانل جوابها از تعداد پانل ها مستقل میشود.



شکل ۳- نمودار عدد کاویتاسیون هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در زاویه حمله ۵ درجه و  $(\alpha=0,5)$  بر حسب تعداد پانل های مختلف

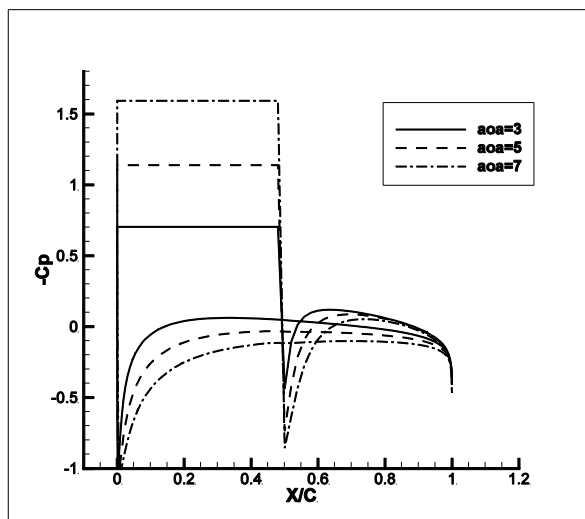
به منظور تایید درستی روش ارائه شده در این مقاله مقادیر محاسبه شده برای هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در زاویه حمله ۵ درجه با نتایج تجربی لابرکس [۱۲] مقایسه شده است. شکل (۴) نمودار ضخامت نسبی کاویتی بر حسب طول نسبی کاویتی می باشد.



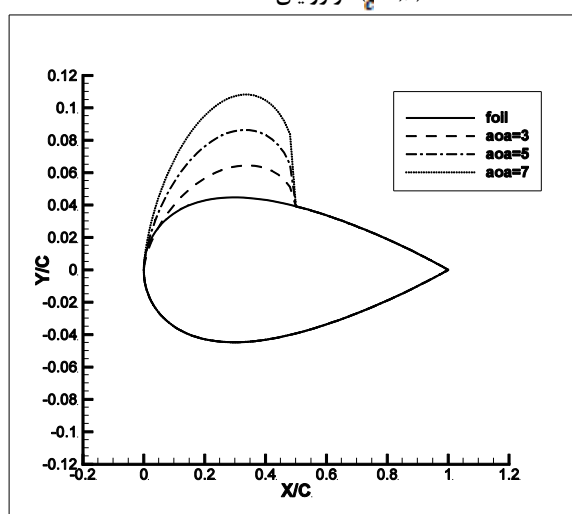
شکل ۴- نمودار ضخامت نسبی بر حسب طول نسبی کاویتی برای هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در زاویه حمله ۵ درجه

شکل های (۵) و (۶) به ترتیب نمودار ضریب فشار و شکل همگرا شده کاویتی برای هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ به ازای طول نسبی کاویتی برابر (۰,۵) در زوایای حمله مختلف به روش طول ثابت و با مدل بستن ساده میباشد. همچنین جدول (۱) مقادیر ضریب برا برای این هیدروفویل در زوایای حمله مختلف می باشد.

مشاهده می شود که با افزایش زاویه حمله فشار در سطح بالای هیدروفویل کاهش و در سطح پایین افزایش می یابد بنابراین مطابق جدول (۱) مشاهده می شود که با افزایش زاویه حمله نیروی لیفت افزایش می یابد. همچنین مشاهده می شود که با افزایش زاویه حمله عدد کاویتاسیون افزایش می یابد که این به این معنی است که با زاویه حمله بیشتر، در سرعت های کمتری شاهد رخ دادن کاویتاسیون هستیم همچنین مشاهده می شود با افزایش زاویه حمله کاویتی شکل گرفته روی هیدروفویل بزرگتر می شود.



شکل ۵- نمودار توزیع ضریب فشار برای هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ به ازای  $(\alpha=0,5)$  در زوایای حمله مختلف



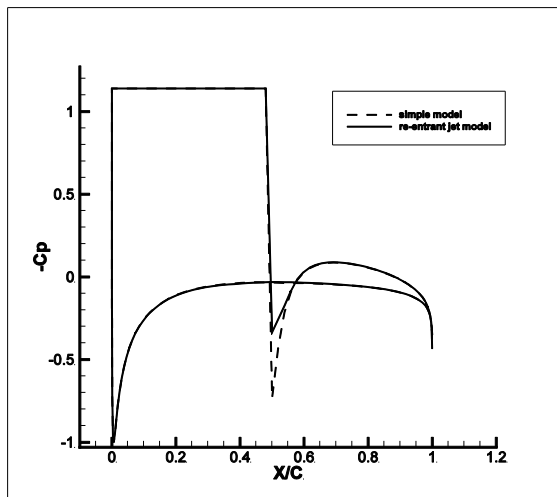
شکل ۶- نمودار شکل کاویتی ایجاد شده بر روی هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ به ازای  $(l/c=0,5)$  در زوایای حمله مختلف

جدول ۱: مقایسه ضریب برا برای هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در  $(l/c=0,5)$  و زاویه حمله های مختلف

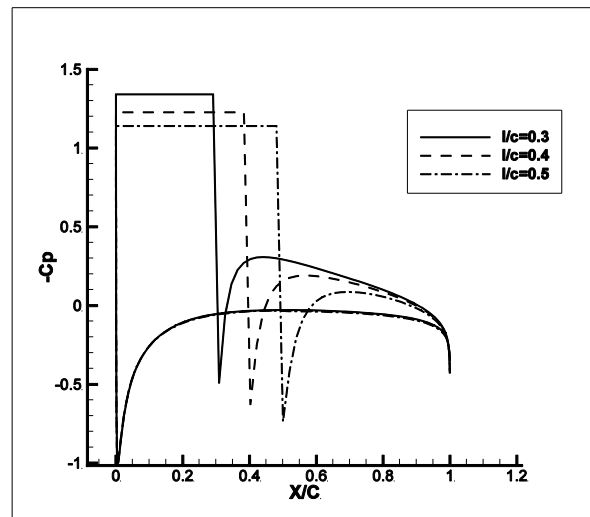
Cl	$\alpha(^{\circ})$
۰,۳۷۷	۳
۰,۶۵۸	۵
۰,۹۴۰	۷

شکل های (۷) و (۸) به ترتیب نمودار های توزیع ضریب فشار و شکل همگرا شده کاویتی برای هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ با زاویه حمله (۵) درجه و طولهای نسبی کاویتی مختلف به روش طول ثابت و با مدل بستن ساده می باشد. همچنین جدول (۲) مقادیر ضریب برا برای این هیدروفویل در طولهای نسبی کاویتی مختلف می باشد.

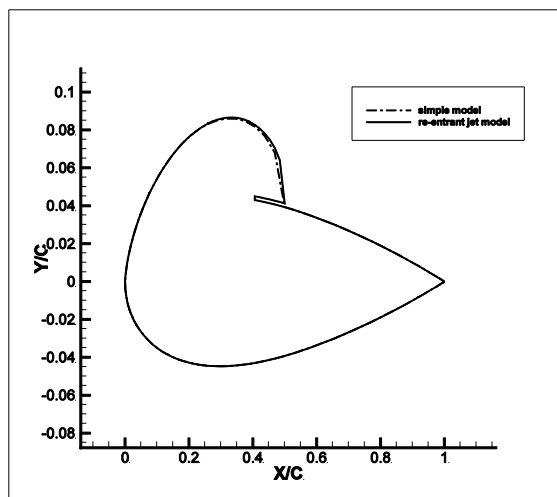
مشاهده می شود که با افزایش طول نسبی کاویتی فشار کاویتی افزایش می یابد ولی فشار کلی سطح بالا کاهش می یابد چون طول ناحیه کم فشار روی سطح بالایی کاویتی افزایش می یابد. بنابراین مطابق با جدول (۲) ملاحظه می شود که ضریب لیفت افزایش می یابد. همچنین مشاهده می شود با افزایش طول نسبی کاویتی شکل کاویتی ایجاد شده روی سطح هیدروفویل بزرگتر می شود.



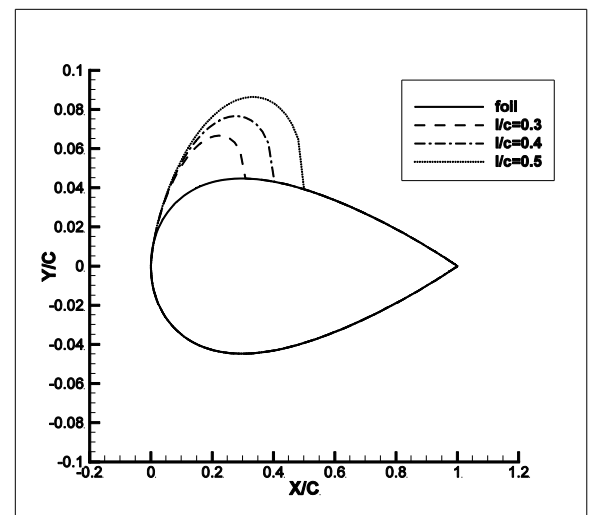
شکل ۹- نمودار توزیع ضریب فشار هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در زاویه حمله (۵) درجه و عدد کاونتاسیون برابر (۱,۱۴) ( $h_{jet} = 0,02$ ) و ( $l_{jet} = 0,93$ ) با دو مدل ساده و جت بازگشتی



شکل ۷- نمودار توزیع ضریب فشار برای هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در زاویه حمله (۵) درجه و طولهای نسبی کابیتی مختلف



شکل ۱۰- نمودار شکل کابیتی ایجاد شده رو سطح هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در زاویه حمله (۵) درجه و عدد کاونتاسیون برابر (۱,۱۴) با دو مدل ساده و جت بازگشتی



شکل ۸- نمودار شکل کابیتی ایجاد شده بر روی هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در زاویه حمله (۵) درجه و طولهای نسبی کابیتی مختلف

جدول ۲: مقایسه ضریب برا برای هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در زاویه حمله (۵) درجه در طولهای نسبی کابیتی مختلف

Cl	l/c
۰,۶۱	۰,۳
۰,۶۳	۰,۴
۰,۶۵۸	۰,۵

**نتیجه‌گیری**  
 یکی از پدیده‌هایی که بررسی و تحقیق بسیاری از محققان در مهندسی را به خود جلب کرده است، پدیده کاونتاسیون می‌باشد. در این مقاله به شبیه سازی جریان همراه با کاونتاسیون جزئی حول هیدروفویل پرداخته شده است، برای این شبیه سازی از روش المان مرزی مبتنی بر تئوری گرین استفاده شده است. برای این منظور از یک الگوریتم دو مرحله ای استفاده شده تا انتهای کابیتی با استفاده از مدل جت بازگشتی مدل شود. در مرحله اول طول کابیتی ورودی مساله است و عدد کاونتاسیون و شکل کابیتی بدست می‌آید، سپس با محاسبه ارتفاع جت بازگشتی، با الگوریتم عدد کاونتاسیون ثابت و شکل اولیه حاصل از مرحله قبل، مساله حل می شود تا به شکل نهایی همگرا شود. نتایج برای دو مدل بستن ساده و مدل جت بازگشتی بدست آمد. ابتدا با استفاده از مدل بستن ساده تاثیر زاویه حمله و طول بی بعد کابیتی بررسی شد و مشاهده شد که با افزایش زاویه حمله و طول بی بعد کابیتی ضریب لیفت افزایش می یابد. سپس با الگوریتم ترکیبی جت بازگشتی در انتهای کابیتی مدل شد و مشاهده شد که با بکارگیری مدل جت بازگشتی پرش نا متعارفی که در مدل بستن

شکل های (۹) و (۱۰) به ترتیب نمودارهای توزیع ضریب فشار و شکل کابیتی برای هیدروفویل ناکا ۰۰۰۹ در زاویه حمله (۵) درجه به ازای عدد کاونتاسیون برابر (۱,۱۴) و طول جت بازگشتی برابر با (۰,۹۳) با استفاده از دو مدل ساده و جت بازگشتی می‌باشد. با بدست آوردن توزیع فشار مقدار ارتفاع جت بازگشتی بدست می‌آید ( $h_{jet} = 0,02$ ) بدست می‌آید مشاهده می شود که با بکار بردن مدل بستن ساده، در انتهای کابیتی شاهد یک پرش نا متعارف هستیم که با بکارگیری مدل جت بازگشتی این پرش تا حدی اصلاح و به مقادیر واقعی نزدیک تر می شود.

ساده در نمودار توزیع فشار بدست می‌آید تا حدی اصلاح و به مقادیر واقعی نزدیک تر می‌شود.

#### مراجع

1. Franc J.P., and Michel J.M., *Fundamental Of Cavitation*. Kluwer Academic Publisher, 2004 , pp. 131-161.
2. Birkhoff G. and Zarantonello E.H., *Jets Wakes and cavities*. Academic Press, New York, 1957.
3. Gilbarg D. *Jets and cavities*. Handbuch der Physik, vol. 9, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1960.
4. Furness R. A., Hutton S. P., *Exprimental and theoretical studies of two-dinentional fixed-type cavities*., ASME: *Journal of the Fluids Engng*, 1975, pp. 515-522,
5. Pellone E. and Rowe A., *Supercavitating hydrofoils in nonLinear theory*, in Proceedings, Third International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, 1981.
6. Fine, N.E., Kinnas, S.A., A boundary element method for the analysis of the flow around 3-D cavitating hydrofoils, *Journal of Ship Research*, Vol. 37, n.3, 1993, pp. 213-224.
7. Krishnaswamy P., *Flow modeling for partially cavitating hydrofoils*, Ph.D. thesis, Technical University of Denmark, ch.4, p.45, 2000.
8. Uhlman J. S., *A Note On The Development Of A Nonlinear Axisymmetric Reentrant Jet Cavitation Model*, Engineering Technology Center, Anteon Corp., 2006.
9. پسندیده فرد و نوروزی، استفاده از مدل جت بازگشتی در انتهای حفره در شبیه سازی جریان همراه با کاویتاسیون حول هندسه های متقارن محوری به روش المان مرزی. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز ، جلد ۶۱ ، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۰، ص ۱۲-۲۳.
10. Callenaere M., Franc J.P., Michel J.M., and Riondet M., "The cavitation instability induced by the development of a re-entrant jet", *J. Fluid Mech.*, Vol. 444, 2001, pp. 223-256.
11. Franc J.P and Michel J.M., "Fundamental Of Cavitation", Kluwer Academic Publisher, Netherlands, 2004. pp. 131-161.
12. K.R. Laberteaux, S.L. Ceccio," Partial cavity flows. Part 2: cavities forming on test objects with spanwise variation", *J. Fluid Mech.* 431. 2001.pp. 43-63.