

شبیه سازی کاویتاتور سوراخدار در جریان کاویتاسیون گسترده بر روی اجسام سه بعدی به روش المان مرزی

محمود پسندیده فرد¹، محمد غفاری²، هادی افکار³

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

چکیده

در این مقاله، جریان همراه با کاویتاسیون گسترده حول هندسه های سه بعدی متقارن محوری با کاویتاتور سوراخ دار و بدون سوراخ به روش المان مرزی بر مبنای پتانسیل شبیه سازی شده است. به این منظور سطح کاویتی و سطح خیس شده جسم و سطح سوراخ توسط المان هایی تقریب زده می شود و به کمک بیان انتگرالی تئوری گرین با این مضمون که جریان پتانسیل روی هر سطح را می توان با یک توزیع چشمه و دوگان روی سطوح مقید آن شبیه سازی کرد، جریان همراه با کاویتاسیون شبیه سازی می شود. به منظور مدل سازی سوراخ، بر روی گره های مورد نظر بر روی سطح کاویتاتور چشمه با قدرت منفی قرار داده شده است. در این روش طول کاویتی به عنوان ورودی مسأله و هندسه کاویتی و عدد کاویتاسیون از جمله نتایج حاصل از این شبیه سازی می باشد. ایجاد سوراخ بر روی کاویتاتور تأثیرات مختلفی را بر طول کاویتی، ماکزیمم قطر کاویتی، ضریب درگ فشاری و ضریب درگ اصطکاکی پرتابه دارد. جهت ارزیابی میزان دقت نتایج به دست آمده توسط روش المان مرزی و اطمینان از صحت این نتایج و اعتبار سنجی روش استفاده شده مقایسه ای بین نتایج تحقیق حاضر و نتایج تجربی و همچنین کد تجاری فلوئنت صورت پذیرفته است. از نتایج قابل توجه این تحقیق می توان به کاهش طول و ماکزیمم قطر کاویتی در حین استفاده از کاویتاتور سوراخدار نسبت به بدون سوراخ در گستره وسیعی از اعداد کاویتاسیون اشاره کرد. سرعت بالای همگرایی و دقت نسبتاً مطلوب از مزایای قابل توجه این روش به شمار می آید.

واژه های کلیدی: کاویتاسیون گسترده - المان مرزی - کاویتاتور سوراخدار - متقارن محوری

مقدمه

کاویتاسیون به عنوان یکی از گسترده ترین پدیده های به وجود آمده در مایعات به حساب می آید که می توان آن را در ساده ترین حالت تبدیل مایع به بخار در اثر کاهش فشار مایع تا فشار بخار تعریف کرد. خطر به وجود آمدن کاویتاسیون تا زمانی که مناطق با گرادیان بالای سرعت در سیال وجود دارد پا برجاست. این پدیده به طور معمول در بسیاری از سیستم های هیدرولیکی مانند توربین ها، پروانه ها، پمپ ها، سد رودخانه ها، دریچه ها، موتورها، سیستم های لوله کشی و سیستم های سرد کننده راکتور بوقوع می پیوندد. در تمام این موارد کاویتاسیون عموماً یک پدیده نا مطلوب است که ترجیحاً نباید بوقوع بپیوندد یا حداقل کنترل شود. با این وجود کاویتاسیون در برخی موارد مانند تمیز کننده های فراصوت، برش سنگ، کاربردهای پزشکی و پرتابه های زیر سطحی بسیار سودمند خواهد بود.

1- دانشیار، همراه fard_m@um.ac.ir (نویسنده مخاطب)

2- دانشجوی کارشناسی ارشد

3- دانشجوی دکتری

موضوع اصلی مورد بحث در این مقاله شبیه سازی عددی پدیده کاویتاسیون گسترده بر روی کاویتاتور بدون سوراخ و سوراخ دار با تقارن محوری به کمک روش المان مرزی بر مبنای پتانسیل می باشد. مساله جریان پتانسیل می تواند توسط روش المان مرزی حل شود. در این روش توزیعی از عناصر جریان پتانسیل (گردابه، چشمه، چاه، دابلت و دوگان) روی مرز جریان قرار داده می شود. پس از مقاله هس (hess) و اسمیس (smith) (1966) برای محاسبه جریان پتانسیل حول اجسام مختلف با استفاده از روش المان مرزی، کاربرد این روش به سرعت افزایش یافت [1]. باسو (basu) و هانکوک (hancock) (1978) روشی برای جریان های ناپایدار ارائه نمودند [2]. اهلمن (uhlman) (1987) از روش المان های مرزی غیرخطی بر مبنای سرعت (با استفاده از توزیع گردابه در مرز جریان) برای حل جریان کاویتاسیون جزئی بر روی هیدروفویل استفاده نمود [3] و دو سال بعد، از همان روش برای حل جریان سوپر کاویتاسیون استفاده کرد. وروس (vorus) (1991) از بسط سری لورانته برای بررسی ناحیه سوپر کاویتی استفاده نمود [4]. از سال (1994) میلادی تاکنون دو مدل تئوری هیدرودینامیکی برای سوپر کاویتی های متقارن محوری ارائه شده است: مدل جسم کشیده (1997) و مدل المان های مرزی (1995). هر دو مدل اخیر با دقت خوبی ناحیه سوپر کاویتی را شبیه سازی می نمایند. مدل «جسم کشیده» که توسط وارگیز (varghese) ارائه شد [5]، با استفاده از تقریب فالکنر-اسکن (falkner-skan) و تقریب توییتس (thwaites)، اصلاحاتی در مورد اثر لزجت و با استفاده از تابع گرین، اصلاحاتی برای در نظر گرفتن تراکم پذیری به آن اضافه شده است.

بسیاری از پرتابه های هوایی و دریایی برای پیمودن مسیرهای طولانی از سیستم محرکه رمجت (ramjet) استفاده می کنند. رمجت از جریان عبوری استفاده کرده و نیروی جلوبرندگی قابل توجهی تولید می کند. بدین منظور در پرتابه های زیر سطحی تزریق آب پایدار جزو نکات مهمی می باشد که ما را به سمت مطالعه کاویتاتور سوراخدار هدایت می کند. تزریق آب بستگی به فشار محفظه رمجت و اندازه لوله تزریق دارد. این فرایند علاوه بر نیروی وارد شده بر کاویتاتور اندازه کاویتی را نیز تحت تأثیر قرار می دهد [6].

در زمینه بررسی کاویتاتور سوراخدار کار اندکی انجام شده است که از این بین می توان به کار لین (lin) و همکاران (2012) اشاره کرد، آنها با استفاده از کد تجاری ANSYS CFX به بررسی پارامترهای مختلف تزریق آب در یک کاویتاتور سوراخدار تحت کاویتاسیون گسترده طبیعی پرداختند [7].

در این مقاله نیز تاثیر گذر جریان از سوراخ کاپیتاتور بر پارامترهای متنوع جریان با کاپیتاسیون گسترده به کمک روش المان مرزی بررسی شده است.

روش المان مرزی بر پایه پتانسیل

پایه اصلی روش المان مرزی، جریان پتانسیل می باشد. لذا در صورتی می توان از روش المان مرزی برای تحلیل کاپیتاسیون استفاده نمود که ثابت شود جریان کاپیتاسیون پتانسیلی است. آزمایشات تجربی نشان می دهند که جریان در اطراف کاپیتی با تقریب خوبی پتانسیلی است [8]. لذا می توان از تئوری های پتانسیل برای شبیه سازی کاپیتاسیون حول اجسام استفاده نمود. روش المان مرزی حاضر، براساس «تئوری گرین» می باشد. تئوری گرین بیان می کند که «هر جریان غیر چرخشی تراکم ناپذیر را می توان با یک توزیع چشمه، گردابه یا دوگان روی سطوح مقید آن شبیه سازی نمود». به منظور بررسی کاپیتاسیون گسترده به روش المان مرزی سطح کاپیتی و سطح خیس شده جسم توسط پانل هایی تقریب زده می شوند سپس به کمک انتگرال مرتبه سه گرین و بیان این تئوری در جریان پتانسیل با این مضمون که جریان پتانسیل روی هر سطح را می توان به کمک توزیع رنگی از چشمه ها و دوگان های چیده شده روی پانل های مقید آن نشان داد جریان همراه با کاپیتاسیون مدل سازی می شود. در راستای این هدف همانند شکل (1) رینگ چشمه ها روی سطح کاپیتی و رینگ دوگان ها روی سطح کاپیتی و جسم و سوراخ توزیع می شوند. لازم به ذکر است قدرت رینگ چشمه ها و دوگان ها روی هر پانل ثابت و از هر پانل به پانلی دیگر متغیر می باشد. در این کار طول کاپیتی ثابت در نظر گرفته شده و به عنوان ورودی مسئله تلقی می شود. با حل دستگاه معادلات خطی به دست آمده قدرت چشمه های توزیع شده روی سطح کاپیتی به دست می آیند سپس به منظور ارضاء شرط مرزی سینماتیکی بر روی سطح کاپیتی پانل ها جابه جا می شوند تا اینکه سرعت عمودی بر سطح کاپیتی صفر شود و حل تا همگرا شدن شکل کاپیتی (ارضاء شرط سینماتیک) ادامه پیدا می کند.

روابط ریاضی حاکم

همان طور که قبلاً ذکر شد به منظور تحلیل جریان همراه با کاپیتاسیون حول اجسام سه بعدی با تقارن محوری از تئوری گرین مرتبه سه استفاده می شود که در زیر به آن اشاره گردیده است [9].

$$2\pi\phi(r, x) = \quad (1)$$

$$\iint_S \left\{ \frac{\partial\phi}{\partial n} G(x, r; \xi, \rho) - \phi(r, x) \frac{\partial G(x, r; \xi, \rho)}{\partial n} \right\} \rho d\phi ds$$

که در آن n بردار عمود بر سطوح، S طول کمان طی شده روی سطوح، x و r مولفه های دستگاه مختصات متقارن محوری و توابع G و $\partial G/\partial n$ به ترتیب توابع پتانسیل یک رینگ چشمه و دوگان و ϕ پتانسیل اختلالی توزیع شده روی سطوح حل هستند. تابع پتانسیل اختلالی ϕ ، تابع پتانسیلی است که اثر همه اجزای پتانسیل در یک نقطه به جز اثر پتانسیل جریان آزاد را در خود دارد. در روابط فوق، رابطه توزیع پتانسیل کلی ϕ و توزیع پتانسیل اختلالی ϕ به صورت زیر است:

$$\phi = \bar{U}_\infty \cdot \bar{X} + \phi \quad (2)$$

که در آن U_∞ ، سرعت جریان آزاد گذرنده از روی سطح هندسه است.

شرایط مرزی

الف) شرط مرزی سینماتیکی بر روی سطح جسم و کاپیتی: بر اساس شرط نفوذ ناپذیری می دانیم که جریان هیچ مولفه عمودی بر سطح جسم ندارد.

همچنین فرض می شود که جریان هیچ مولفه عمودی بر سطح کاپیتی نداشته باشد. این مساله «شرط مرزی سینماتیکی» نامیده می شود. این شرط بیان می کند که مولفه عمودی جریان بر $S_b \& S_d \cup S_c$ (سطح خیس شده فویل - کاپیتی) باید برابر صفر باشد. بنابراین:

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = -\frac{\partial x}{\partial n} = -x_n \quad \text{on } S_b \& S_d \cup S_c \quad (3)$$

که در رابطه فوق، x_n مولفه عمودی سطح است. شرط سینماتیکی روی سطح کاپیتی بر معادلات انتگرالی جهت حل دستگاه معادلات خطی اعمال نمی شود و صرفاً جهت اصلاح موقعیت المان های کاپیتی در هر تکرار مورد استفاده قرار می گیرد. در واقع، حل زمانی همگرا می شود که شرط مرزی سینماتیکی روی کاپیتی ارضا شده باشد.

ب) شرط مرزی دینامیکی روی سطح کاپیتی: چون جریان حول کاپیتی تا حد زیادی غیر چرخشی است، می توان با استفاده از معادله برنولی، سرعت ثابتی برابر $U_\infty \sqrt{1+\sigma}$ برای جریان روی سطح کاپیتی به دست آورد که σ عدد بدون بعد کاپیتاسیون است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\sigma = \frac{P_\infty - P_c}{0.5\rho U_\infty^2} \quad (4)$$

در رابطه (4) U_∞ و P_∞ به ترتیب سرعت و فشار جریان آزاد و P_c فشار بخار مایع می باشد. با بی بعد سازی سرعت با U_∞ ، مولفه مماسی سرعت روی سطح کاپیتی به صورت زیر است:

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

با انتگرال گیری از آن خواهیم داشت:

$$\phi = \phi_0 + \sqrt{1+\sigma}(s-s_0) - (x-x_0) \quad \text{on } S_c \quad (6)$$

که ϕ_0 ، S_0 و x_0 به ترتیب پتانسیل، طول قوس و موقعیت نقطه شروع کاپیتی روی جسم می باشند.

ج) شرط مرزی سوراخ کاپیتاتور: فرض می شود که سیال با سرعت A وارد سوراخ می شود به گونه ای که نسبت به سرعت جریان آزاد بدون بعد می شود. لذا داریم:

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = -x_n - A \quad \text{on } S_r \quad (7)$$

فرم انتگرالی معادلات گرین روی مرزهای مساله

در رابطه (1) قدرت دوگان ها (ϕ) روی سطح جسم و سوراخ $S_b \& S_r$ و قدرت چشمه ها $\left(\frac{\partial\phi}{\partial n}\right)$ روی سطح کاپیتی (S_c) مجهول است. با توجه به شرایط مرزی ارائه شده، در صورت معلوم شدن عدد کاپیتاسیون، ϕ بر روی کاپیتی مطابق رابطه (6) و $\frac{\partial\phi}{\partial n}$ بر روی جسم و سوراخ مطابق روابط (5) و (7) معلوم خواهد بود. با اعمال شرایط مرزی سینماتیکی و دینامیکی رابطه (1) روی مرز جسم و سوراخ به صورت

$$2\pi\phi + \iint_{S_b+S_r+S_d} \phi \frac{\partial G}{\partial n} dS - \iint_{S_c} \frac{\partial\phi}{\partial n} G dS + \phi_0 \iint_{S_c} \frac{\partial G}{\partial n} dS \quad (8)$$

$$+ \sqrt{1+\sigma} \left[\iint_{S_c} (s-s_0) \frac{\partial G}{\partial n} dS \right] \quad \text{on } S_b \& S_r \& S_d$$

$$= - \iint_{S_b+S_d} x_n G dS + \iint_{S_c} (x-x_0) \frac{\partial G}{\partial n} dS + \iint_{S_r} (-x_n - A) G dS$$

و روی سطح کاپیتی به صورت

$$\begin{aligned} & \iint_{S_b+S_r+S_d} \phi \frac{\partial G}{\partial n} dS - \iint_{S_c} \frac{\partial \phi}{\partial n} G dS + \phi_0 \left[2\pi + \iint_{S_c} \frac{\partial G}{\partial n} dS \right] \\ & + \sqrt{1+\sigma} \left[2\pi(s-s_0) + \iint_{S_c} (s-s_0) \frac{\partial G}{\partial n} dS \right] \quad \text{on } S_c \quad (9) \\ & = - \iint_{S_b+S_d} x_n G dS + \iint_{S_r} (-x_n - A) G dS \\ & + \left[2\pi(x-x_0) + \iint_{S_c} (x-x_0) \frac{\partial G}{\partial n} dS \right] \end{aligned}$$

بازنویسی می‌شود.

به منظور استفاده از متدهای حل عددی معادلات انتگرالی می‌بایست این معادلات را با گسسته‌سازی به صورت گروهی از معادلات جبری درآورد. با حل این دستگاه معادلات، قدرت چشمه‌ها و دوگان‌ها به دست می‌آید. برای این کار ابتدا می‌بایست شکل اولیه کاویتی را به عنوان حدس اولیه تعریف کرد، سپس سطح جسم، کاویتی و سوراخ کاویتاتور به المان‌های مستقیم-الخطی تقریب زده می‌شود. برای نمونه، نحوه المان‌بندی جریان کاویتاسیون جزئی حول یک استوانه سرتخت در شکل (2) نشان داده شده است. در هنگام بررسی کاویتاسیون گسترده N_c تا نقطه مورد نظر پشت شکل ادامه پیدا می‌کند.

همان‌گونه که در شکل (2) مشاهده می‌شود سطوح جسم، کاویتی و سوراخ کاویتی به ترتیب با N_b ، N_c و N_r المان تقریب زده می‌شوند که در مجموع تعداد $N = N_b + N_c + N_r$ المان، سطوح S_b ، S_c و S_r را به وجود می‌آورند. با بسط معادلات (8) و (9) تعداد N معادله جبری به دست می‌آید. مجهولات مساله شامل $N_b + N_r$ قدرت دوگان روی سطح جسم و سوراخ، N_c قدرت چشمه روی سطح کاویتی و یک عدد کاویتاسیون (سرعت روی سطح کاویتی)، یعنی $\sqrt{1+\sigma}$ می‌باشد. بنابراین تعداد مجهولات $N+1$ است که یکی از تعداد معادلات بیشتر است. برای رفع این مشکل و حل دستگاه معادلات نیاز به یک معادله دیگر داریم. برای کامل شدن تعداد معادلات در دستگاه معادلات خطی، از این تعریف که باید قدرت خالص چشمه‌ها روی سطح کاویتی صفر شوند استفاده می‌شود، فرم انتگرالی این معادله به شکل زیر می‌باشد:

$$\iint_{S_c} \frac{\partial \phi}{\partial n} dS = \int_{S_b} x_n dS \quad (10)$$

هندسه مسئله

الف) جسم: در این مقاله، برای تحلیل کاویتاسیون جزئی، دو هندسه متقارن محوری یعنی استوانه سرتخت و استوانه سرمخروطی (با زاویه راس 60 درجه) مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (3) نمای سه بعدی هندسه های مذکور و نحوه المان بندی روی آن‌ها نشان داده شده است.

ب) کاویتی: در هندسه‌های با لبه تیز، کاویتاسیون از نقطه شکستگی شروع می‌شود و در هندسه‌های هموار، مطابق آزمایشات واشیو و همکاران، نقطه شروع کاویتاسیون از نقطه جدایش جریان آغاز می‌گردد [10]. بنابراین در هندسه سرتخت و سرمخروطی و نیز کاویتاتور دایروی تخت، شروع کاویتی از نقطه شکستگی آنها (لبه پیشانی) در نظر گرفته می‌شود. نقطه انتهایی کاویتی که طول کاویتی را نیز مشخص می‌کند کاملاً اختیاری است و به صورت کسری از طول جسم در نظر گرفته می‌شود.

تصحیح شکل کاویتی

شرط سینماتیکی روی سطح کاویتی یعنی رابطه (3)، بر معادلات (8) و (9)، اعمال نگرددید و صرفاً شرط دینامیکی آن مورد استفاده قرار گرفت. از شرط سینماتیکی روی سطح کاویتی برای تصحیح شکل کاویتی استفاده می‌شود. برای ارضای این شرط، می‌بایست سرعت عمود بر المان‌های کاویتی نداشته باشیم و شیب بردار سرعت و شیب مرز کاویتی در هر نقطه روی آن، با هم برابر باشند و هیچ جریانی به مرز وارد و یا از آن خارج نشود [11].

جنبه های عددی

پس از گسسته سازی معادلات (8) و (9) و معادله کمکی (10) برای حل آنها از متد حل تکراری که توسط کیناس (kinnas) (1990) ارائه شد استفاده می‌شود [12]. مراحل این شیوه حل به شرح زیر است:

- 1- ابتدا طول اولیه‌ای برای کاویتی در نظر گرفته می‌شود که بر اساس آن شکل اولیه مساله تعیین می‌شود.
- 2- سوراخ بر روی کاویتاتور قرار می‌گیرد و بدین ترتیب مقطع سوراخ تشکیل می‌شود. بدیهی است که این قسمت نیز می‌بایست المان بندی شود.
- 3- با به دست آوردن مولفه‌های معادلات (8) و (9) که شرایط مرزی سینماتیکی و دینامیکی بر آن اعمال گردیده است و هم‌چنین معادله کمکی (10)، به صورت عددی دستگاه معادلات خطی $N+1$ معادله $N+1$ مجهولی تشکیل می‌شود.
- 4- دستگاه معادلات به دست آمده به روش حذفی گوس حل می‌شود و مجهولات مساله شامل $N_b + N_r$ قدرت دوگان روی سطح جسم و سوراخ، N_c قدرت چشمه روی سطح کاویتی و یک عدد کاویتاسیون (سرعت روی سطح کاویتی)، یعنی $\sqrt{1+\sigma}$ به دست می‌آیند.

نتایج

در ادامه تعدادی از نتایج انتخابی این کار تحقیقاتی در دو بخش مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند.

بخش اول به بررسی صحت نتایج روش المان مرزی و مقایسه آنها با داده های تجربی پرداخته است و بخش دوم نیز به بررسی مقادیر طول، ماکزیمم قطر کاویتی و اثر تغییرات دبی در کاویتاتور سوراخدار دیسکی شکل و مخروطی اختصاص یافته است.

نکات مهم در مورد مدل انتخاب شده و شرایط مسئله :

- 1- در این تحقیق از پرتابه ای استوانه ای شکل از دو بخش سیلندر و کاویتاتور به قطر 1 متر (m) استفاده شده است.
- 2- در کاویتاتور سوراخدار قطر سوراخ برابر با 0.4 متر (m) می باشد.
- 3- در مورد سر مخروط از زاویه راس 60 درجه استفاده شده است.
- 4- اعداد جدول (1) به کمک قطر کاویتاتور ($D_n = 1$ m) بدون بعد شده اند.
- 5- در تحلیل نرم افزاری (فلوئنت) از مدل توربولانسی RSM و مدل دو فازي mixture استفاده شده است.
- 6- دبی سیال عبوری از سوراخ کاویتاتور به شکل زیر بدون بعد شده است:

$$q_r = Q_r / V_\infty D_n^2 \quad (11)$$

که در این رابطه q_r دبی بدون بعد عبوری از سوراخ کاویتاتور، Q_r دبی عبوری از سوراخ کاویتاتور بر حسب متر مکعب بر ثانیه، V_∞ سرعت جریان آزاد بر حسب متر بر ثانیه و D_n قطر کاویتاتور بر حسب متر می باشد.

7- سرعت جریان آزاد برابر 1 متر بر ثانیه (m/s) می باشد.

بخش اول: اعتبارسنجی نتایج

در ابتدا به منظور ارزیابی صحت نتایج روش المان مرزی تغییرات ضریب فشار کاویتاسیون جزئی تشکیل شده روی بدنه استوانه سر تخت حاصل از این روش با نتایج تجربی روس (rous) [13] در شکل (4) مقایسه شده است. برای محاسبه ضریب فشار پس از تعیین سرعت در نقاط کنترل هر المان از رابطه (12) استفاده می شود:

$$C_p = 1 - \left(\frac{V_i}{V_\infty} \right)^2 \quad (12)$$

با این وجود شکل کاویتی، عدد کاویتاسیون، توزیع فشار و ضریب پسایی که پیش بینی می کند با مدل های دیگر تفاوت چندانی نداشته و از حیث همگرایی و تعداد تکرار جهت همگرا شدن، نسبت به آنها برتری دارد. در این پرتابه مرکز کاویتاتور نقطه سکون است پس ماکزیمم فشار را داشته و دارای ضریب فشار یک می باشد. با دور شدن از مرکز و نزدیک شدن به لبه کاویتاتور فشار کاهش می یابد. از لبه کاویتاتور به بعد و در روی کاویتی فشار کمترین و برابر فشار لبه کاویتاتور می باشد. به دلیل استفاده از روش بستن ساده بعد از اتمام کاویتی و در نقطه بسته شدن کاویتی توزیع فشار اختلاف چشمگیری با نتایج روس (rous) دارد که این از معایب روش بستن ساده می باشد و به منظور برطرف کردن آن می توان از مدل جت بازگشتی در انتهای کاویتی استفاده کرد [14]. همانطور که در شکل (4) مشاهده می شود نتایج با دقت قابل قبولی بر یکدیگر منطبق می باشند.

اگرچه کاویتاسیون پدیده دوفازی و پیچیده است، اما روابط تجربی و تحلیلی برای کاویتاسیون گسترده پشت اجسام ساده مثل دیسک موجود است. رابطه تجربی ریچارد [15] (reichardt) برای کاویتاسیون گسترده پشت دیسک به صورت زیر می باشد:

$$\frac{L_c}{D_{cav_{max}}} = \frac{\sigma + 0.008}{\sigma(1.7\sigma + 0.066)} \quad (13)$$

$$\frac{D_{cav_{max}}}{d_{cav}} = \left[\frac{C_d}{\sigma(1 - 0.132\sigma^{0.5})} \right]^{0.5} \quad (14)$$

که L_c ماکزیمم طول کاویتی، σ عدد کاویتاسیون، C_d ضریب پسای دیسک، $D_{cav_{max}}$ ماکزیمم قطر کاویتی و d_{cav} قطر دیسک (کاویتاتور) می باشد.

رابطه پلاست - شافر (plaset-schaffer) [15] ضریب پسای دیسک برای اعداد کاویتاسیون کوچکتر از 1.5 را به صورت زیر ارائه می کند:

$$C_d = C_{D_0}(1 + \sigma + 0.028\sigma^2) \quad , \quad C_{D_0} = 0.80533 \quad (15)$$

در شکل (5) طول و ماکزیمم قطر کاویتی بر حسب عدد کاویتاسیون برای کاویتاسیون گسترده ایجاد شده پشت کاویتاتور دیسکی شکل بدون سوراخ نشان داده شده است. در این شکل ها نتایج به دست آمده از روش المان مرزی با نتایج رابطه ریچارد [15] مقایسه شده اند که نشان از دقت بالای روش المان مرزی می باشند.

در شکل (6) نیز نمایی سه بعدی از کاویتاسیون گسترده تشکیل شده پشت کاویتاتور دیسکی شکل بدون سوراخ به تصویر کشیده شده است.

بخش دوم:

الف) کاویتاتور دیسکی شکل: شکل (7) طول کاویتی به دست آمده با استفاده از روش المان مرزی ما بین کاویتاتور سوراخدار و بدون سوراخ دیسکی را نسبت به رنج وسیعی از اعداد کاویتاسیون مقایسه می نماید. با توجه به شکل مشاهده می شود که طول کاویتی ایجاد شده بر روی کاویتاتور

سوراخدار در اعداد کاویتاسیون مختلف همواره از کاویتاتور بدون سوراخ کوچکتر است.

ماکزیمم قطر کاویتی ایجاد شده بر روی پرتابه برای کاویتاتور سوراخدار و بدون سوراخ نیز در شکل (8) نسبت به اعداد کاویتاسیون مختلف ترسیم شده است. همچنین داده های تجربی [15] که مربوط به کاویتاتور بدون سوراخ نیز می شود به منظور مقایسه بهتر در این نمودار آورده شده اند. کوچکتر بودن قطر ماکزیمم کاویتی در کاویتاتور سوراخدار نسبت به بدون سوراخ از مهمترین نکاتی است که از این شکل می توان دریافت کرد.

از دیگر مسائل قابل توجه در بررسی پرتابه های زیر سطحی با کاویتاتور سوراخدار تاثیر تغییر دبی بر طول کاویتی تشکیل شده می باشد که این مهم نیز در شکل (9) بر اساس رنج متنوعی از دبی های بدون بعد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مقایسه ای هم بین نتایج کد تجاری و روش المان مرزی صورت گرفته است. در این مرحله از کاویتاتور سوراخدار با شعاع 0/5 متر و شعاع سوراخ 0/2 متر استفاده شده است. با توجه به شکل، مشاهده می شود که با ایجاد سوراخ و افزایش دبی عبوری از سوراخ کاویتاتور طول کاویتی کاهش می یابد.

ب) کاویتاتور مخروطی شکل: شکل (10) طول بدون بعد کاویتی پشت کاویتاتور مخروطی شکل با زاویه راس 60 درجه سوراخ دار به روش المان مرزی را با طول بدون بعد کاویتی پشت کاویتاتور مخروطی شکل بدون سوراخ و نتایج مرجع [15] نسبت به عدد کاویتاسیون مقایسه می نماید. همانطور که مشاهده می شود نتایج مربوط به کاویتاتور بدون سوراخ و نتایج تجربی با دقت قابل قبولی نسبت به یکدیگر قرار گرفته اند. همچنین مشاهده می شود که مانند کاویتاتور دیسکی شکل با سوراخ کردن کاویتاتور طول کاویتی کاهش می یابد.

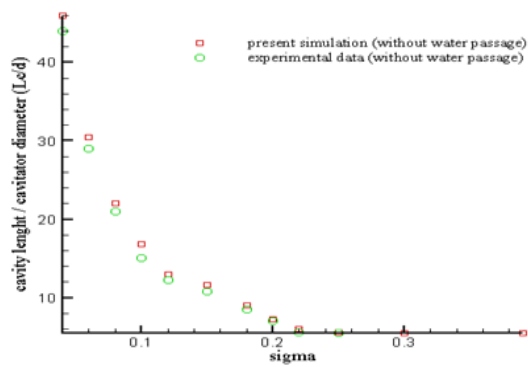
در جدول (1) نتایج مربوط به طول بدون بعد کاویتی برای حالت های مختلف به منظور مقایسه آورده شده است. از نکات مهم این جدول می توان به کاهش طول کاویتی به ازای استفاده از کاویتاتور سوراخدار و همچنین دو برابر بودن طول کاویتی در هنگام استفاده از کاویتاتور دیسکی نسبت به مخروطی اشاره کرد.

جدول (1). طولهای کاویتی ایجاد شده بوسیله کاویتاتورهای مختلف سوراخدار و بدون سوراخ در عدد کاویتاسیون 0/21 (بی بعد شده بر اساس قطر کاویتاتور)

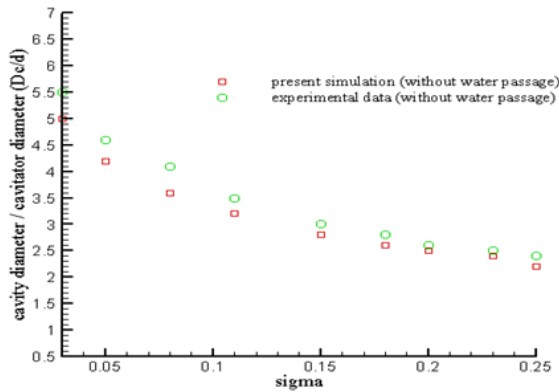
سر مخروطی	سر تخت	L_{cav} / D_n
2/4	5	بدون سوراخ - BEM
2/2	4/2	سوراخدار - BEM

نتیجه گیری و جمع بندی

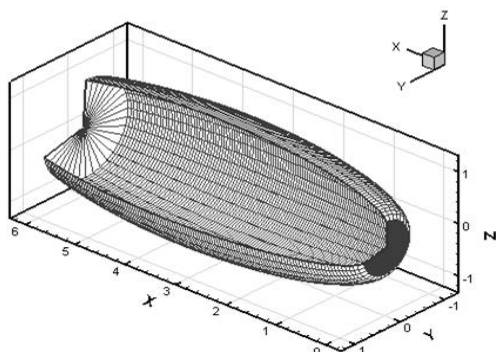
در این مقاله، با استفاده از روش المان مرزی بر پایه پتانسیل، جریان همراه با کاویتاسیون جزئی بر روی هندسه های سه بعدی متقارن محوری با کاویتاتور سوراخدار و بدون سوراخ شبیه سازی شده است. ضمن انطباق مناسب نتایج این روش با نتایج تجربی و عددی دیگر، استفاده از این مدل سرعت همگرایی را افزایش و تعداد تکرار های مورد نیاز را کاهش می دهد. از نتایج قابل توجه این تحقیق علاوه بر کاهش طول کاویتی در حین استفاده از کاویتاتور سوراخدار نسبت به بدون سوراخ می توان به کم شدن طول کاویتی به ازای افزایش دبی عبوری از سوراخ کاویتاتور در یک عدد کاویتاسیون ثابت اشاره کرد که این کاهش طول فقط به دبی عبوری از سوراخ وابسته است.



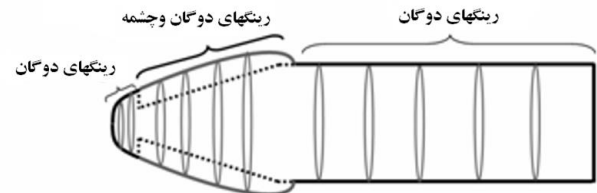
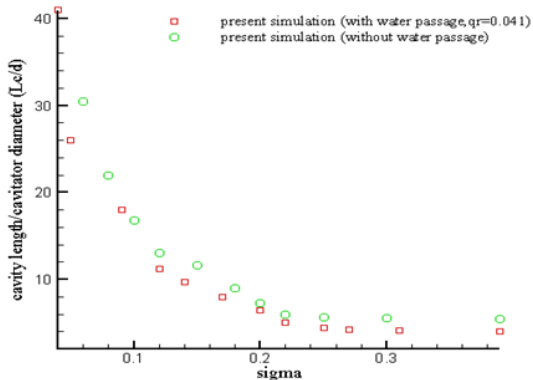
(ب)



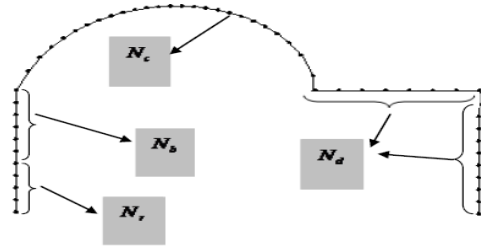
شکل 5- مقایسه نتایج عددی حاضر (BEM) با نتایج آزمایشگاهی [15] برای کاویتاسیون گسترده در کاویتاتور دیسکی شکل بدون سوراخ (الف) تغییرات طول بدون بعد کاویتا (ب) تغییرات ماکزیمم قطر بدون بعد کاویتا



شکل 6- کاویتاسیون گسترده پشت کاویتاتور دیسکی شکل بدون سوراخ

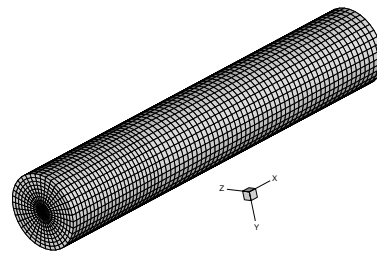


شکل 1- استفاده از برهم نهی جریان آزاد با توزیعی از رینگ دوگان و چشمه در مرز جسم و کاویتا جهت حل جریان کاویتاسیونی.



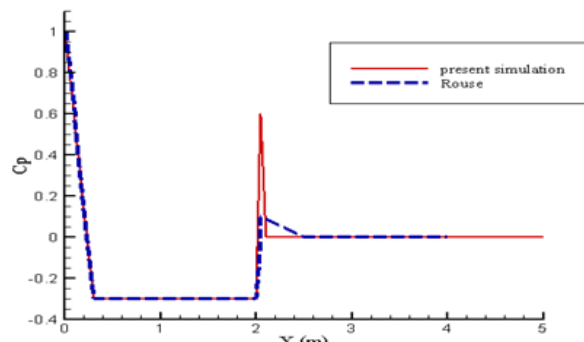
شکل 2- چگونگی توزیع نقاط روی مرز جسم، کاویتا و سوراخ جسم

(الف)



(ب)

شکل 3- نمای سه بعدی هندسه استوانه‌ای شکل (الف) سرتخت و (ب) سرمخروطی با زاویه راس 60 درجه به همراه توزیع المان‌های روی سطح آن‌ها



شکل 4- تغییرات ضریب فشار بر روی استوانه سرتخت و مقایسه نتایج عددی حاضر (BEM) با نتایج روس [13]

(الف)

[1] Hess J.L., Smith A.M.O., "Calculation of potential flow about arbitrary three-dimensional bodies", Progress in Aeronautical Science, Vol. 8, pp. 1-138, Pergamon Press, New York, 1966

[2] Basu B.C. and Hancock, G.J., "The unsteady motion of a two-dimensional hydrofoil in incompressible inviscid flow", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 87, Part 1, pp. 159-178, 1978

[3] Uhlman J.S., "The surface singularity method applied to partially cavitating hydrofoils", Journal of Ship Research, Vol. 31, No. 2, pp. 107-124, 1987

[4] Vorus W.S., "A theoretical study of the use of supercavitation/ ventilation for underwater body drag reduction", VAI Technical Report, Vorus & Associates, Inc., MI, USA, 1991.

[5] Varghese A.N., Uhlman J.S., and Kirschner I.N., "Axisymmetric slender-body analysis of supercavitating high-speed bodies in subsonic flow", Proceedings of the 3rd International Symposium on Performance Enhancement for Marine Applications, RI, USA, 1997.

[6] Savchenko Y N. Supercavitating object propulsion[Z]. France: 2002.

[7] M.D., Xiang M., Zhang S., Yang X.X., Lin "Hydrodynamic influence of water injection on ringed cavitator." , in proceeding of 8th international symposium on cavitation, CAV2012, The Singapore.

[8] Labertaux K.R., and Ceccio S.L., "Partial cavity flows. Part 1. Cavities forming on models without spanwise variation", J. Fluid Mech., Vol. 431, pp. 1-41, 2001.

[9] Fine N.E., and Kinnas, S.A., "A boundary element method for the analysis of the flow around 3-D cavitating hydrofoils", Journal of Ship Research, Vol. 37, No. 1, 1993.

[10] Washio S., Takahashi S., and Yoshimori S., 2003. "Study on cavitation starting at the point of separation on a smooth wall in hydraulic oil flow", Proceedings of the I MECH E Part C, Journal of Mechanical Engineering Science, Volume 217, Number 6, 1 June 2003, pp. 619-630(12)

[11] Uhlman J. S., "A note on the development of a nonlinear axisymmetric reentrant jet cavitation model", Engineering Technology Center, Anteon Corp., 2002.

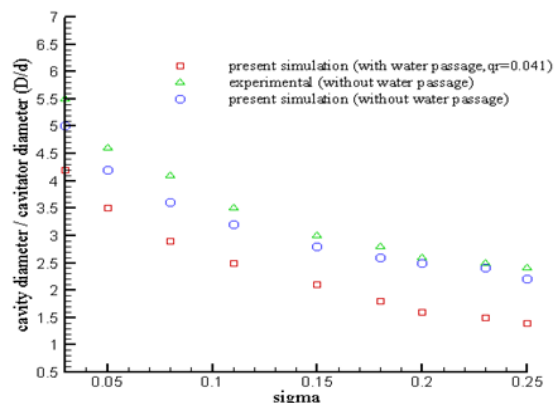
[12] Kinnas S.A. and Fine N.E., "Non-linear analysis of the flow around partially or supercavitating hydrofoils by a potential based panel method", In Proceedings of the IABEM-90 Symposium of the International Association for Boundary Element 1990. Methods, Rome, Italy,

[13] Rouse, H. and McNown, J. S., 1948, "Cavitation and Pressure Distribution, Head Forms at Zero Angle of Yaw," Studies in Engineering Bulletin 32, State University of Iowa.

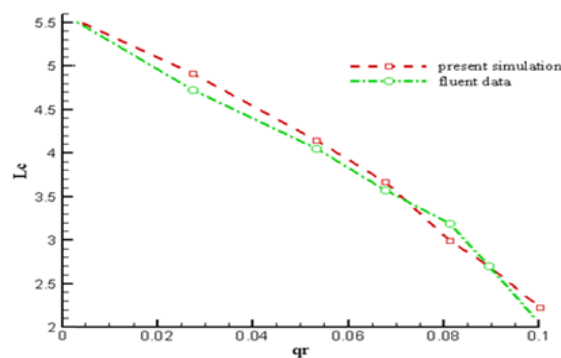
[14] [14] پسندیده فرد و نوروزی، استفاده از مدل جت بازگشتی در انتهای حفره در شبیه سازی جریان همراه با کاویتاسیون حول هندسه های متقارن محوری به روش المان مرزی. مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز ، جلد 61 ، شماره 1 ، بهار و تابستان 1390 ، ص 12-23

[15] J.P. Franc and J.M. Michel. Fundamentals of Cavitation, Section: 6. Kluwer Academic Publisher, Netherlands, 2004.R.E

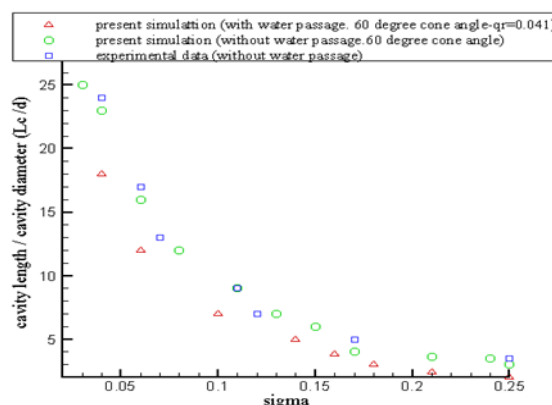
شکل 7- طول بدون بعد کاویته بر حسب عدد کاویتاسیون در کاویتاسیون گسترده پشت کاویتاتور دیسکی شکل در دو حالت سوراخ دار و بدون سوراخ



شکل 8- ماکزیمم قطر بدون بعد کاویته بر حسب عدد کاویتاسیون در کاویتاسیون گسترده پشت کاویتاتور دیسکی شکل در دو حالت سوراخ دار و بدون سوراخ و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بدون سوراخ [15]



شکل 9- مقایسه تغییرات طول کاویته بر حسب دبی بدون بعد عبوری از سوراخ کاویتاتور دیسکی شکل به وسیله روش المان مرزی و فلوننت در عدد کاویتاسیون ثابت 0.2



شکل 10- مقایسه طول کاویته گسترده تشکیل شده پشت کاویتاتور سوراخ دار و بدون سوراخ مخروطی شکل با زاویه راس 60 درجه و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بدون سوراخ [15]

۱۳۹۴

اسفند ماه

به ناه خکار و ناک جان و ناک



کرامتنامه

بین و بیگانه ای بی تردید

محمد عفتاری

دبیر هیئت مدیره هیئت مدیران آیین ادبی و فرهنگی ایران به عنوان

شیرازی که با پیغمبر و خاندان او چنان گویا سخن گفته و در وی اجرام سه جبهه بی روش الهی برتری

پایته: AMQZD1RPOSTY بهرست های پلاک نامند.

زینکله: کوه سینه زوری و شاهی باقی نظر

