



شبیه‌سازی جریان بر روی پرتابه‌های متقارن محوری با کاویتاتور دیسکی و نوک سوراخ‌دار به کمک روش‌های المان مرزی و حجم محدود

محمد غفاری¹، محمود پسندیده فرد^{2*}، محمود تباهی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، صندوق پستی 91755-1111، fard_m@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 شهریور 1395

پذیرش: 06 آبان 1395

ارائه در سایت: 29 آبان 1395

کلید واژگان:

روش عددی

روش المان مرزی

کاویتاتور سوراخ‌دار

پرتابه

چکیده

در این مقاله جریان همراه با کاویتاسیون بر روی پرتابه‌های متقارن محوری با کاویتاتور سوراخ‌دار و بدون سوراخ با استفاده از روش‌های حجم کنترل و المان مرزی شبیه‌سازی شده است. در روش عددی از رویکرد جریان تعادلی همگن استفاده شد، همچنین از مدل زوارت برای تکمیل دستگاه معادلات و مدل‌سازی انتقال جرم بهره گرفته شده است. در روش المان مرزی با توزیع دوگان روی سطح جسم و کاویتی و توزیع چشمه روی سطح کاویتی شرایط برای استفاده از تئوری گرین در حل جریان‌های پتانسیل فراهم گشت، همچنین جهت اضافه کردن اثرات سوراخ تعدادی چشمه بر روی سطح کاویتاتور قرار داده شد. اعتبارسنجی نتایج برای هر دو روش به وسیله روابط تحلیلی و داده‌های آزمایشگاهی صورت پذیرفته است. به طور کلی نتایج این کار تحقیقاتی در دو بخش ارائه می‌شود. در قسمت اول خواص هیدرودینامیک کاویتاتور سوراخ‌دار همچون ابعاد کاویتی، نیروی‌های هیدرودینامیکی و رفتار جریان با استفاده روش‌های مبتنی بر حل معادلات ناویر استوکس مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. سپس در بخش بعد از روش المان مرزی برای تحلیل جریان کاویتاسیونی همراه با کاویتاتور سوراخ‌دار بر روی هندسه‌های کاربردی در ابعاد واقعی استفاده می‌شود. از مهمترین نتایج این پژوهش می‌توان به کاهش ابعاد کاویتی و همچنین افزایش نیروی وارد بر پرتابه در حین استفاده از کاویتاتور سوراخ‌دار اشاره کرد. همچنین روابطی نیز برای حداکثر طول و قطر کاویتی تشکیل شده بر روی هندسه استوانه سرتخت نسبت به عدد کاویتاسیون و قطر سوراخ ارائه شده است.

Simulation of flow around axisymmetric projectiles with circular cavitator and ringed tip using control volume and boundary element methods

Mohammad Ghaffari, Mahmoud Pasandideh Fard*, Mahmoud Tabaki

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* P.O.B. 91755-1111 Mashhad, Iran, fard_m@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 11 September 2016
Accepted 27 October 2016
Available Online 19 November 2016

Keywords:
Numerical Method
Boundary Element Method
Ringed Cavitator
Projectile

ABSTRACT

In this article, cavitation flow around axisymmetric projectiles with ringed and non-ringed cavitator has been investigated using control volume and boundary element methods. In the numerical method, the homogeneous equilibrium approach as well as the zwart model, for modeling the mass transfer and forming the system of equation, have been used. In the boundary element approach with dipole distribution on the body and cavity surfaces and source distribution on the cavity surface, the right conditions were set for using the Green's theorem in solving the potential flow. Moreover, some source components were imposed on the cavitator surface in order to add the hole effects. The validation procedure for both methods has been done by analytical and experimental data. In general, the results of this research are presented in two parts. In the first part, hydrodynamic properties of ringed cavitator such as cavity dimensions, intended forces, flow behavior, etc are analysed deploying the numerical methods based on Navier Stokes equations. In the second part, the boundary element method has been used for analysis of the cavitation flow around practical geometries with ringed cavitator. The most important finding of this study is reduction of the cavity dimensions and also an increase in the force on the projectile during the use of annular cavitator. In addition, as a result of this study, two equations for maximum length and maximum diameter of the formed cavity on the cylindrical body in relation to the cavitation number and hole diameter have been provided.

1- مقدمه

دانشمندان مهندسی را به خود جلب کرده است. این پدیده هنگامی که فشار

استاتیکی محلی، در یک سیال سطحی به پایین‌تر از فشار بخار مایع در درجه

کاویتاسیون از جمله پدیده‌های فیزیکی است که توجه و تحقیق بسیاری از

Please cite this article using:

M. Ghaffari, M. Pasandideh Fard, M. Tabaki, Simulation of flow around axisymmetric projectiles with circular cavitator and ringed tip using control volume and boundary element methods, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 67-78, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

حرارت واقعی برسد، رخ می‌دهد. خطر به وجود آمدن کاویتاسیون تا زمانی که مناطق با گرادیان بالای سرعت در سیال وجود داشته باشد، پا برجاست. نیوتن نخستین کسی بود که در سال 1754 در حین آزمایش عدسی‌های محدب این پدیده را مشاهده نمود. برای اولین بار فرود به منظور بررسی نیروی پیشران در کشتی‌های جنگی و افزایش سرعت پروانه‌ها آزمایش‌هایی انجام داده و این پدیده را کاویتاسیون نامید که از ریشه‌ای یونانی به معنای حفره گرفته شده است. این پدیده به طور معمول در بسیاری از سیستم‌های هیدرولیکی مانند توربین‌ها، پروانه‌ها، پمپ‌ها، سد رودخانه‌ها، دریچه‌ها، موتورهای لوله‌کشی و سیستم‌های سرد کننده راکتور بوقوع می‌پیوندد. در تمام این موارد کاویتاسیون عموماً یک پدیده نامطلوب است که ترجیحاً نباید تشکیل شده یا حداقل کنترل شود. با این وجود کاویتاسیون در برخی موارد مانند تمیز کننده‌های فراصوت، برش سنگ، کاربردهای پزشکی و پرتابه‌های زیر سطحی بسیار سودمند خواهد بود.

به طور کلی پدیده کاویتاسیون، مانند هر پدیده دیگری، توسط روش‌های تئوری، تجربی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از این بین روش‌های تجربی هزینه بالایی داشته و نیاز به تجهیزات و امکانات خاصی دارد، همین امر باعث شده است که استفاده از این روش‌ها محدود به برخی مراکز خاص گردد. به همین دلیل در سال‌های اخیر شبیه‌سازی با استفاده از روش‌های عددی و تئوری پیشرفت چشمگیری داشته و مورد توجه محققان قرار گرفته است. روش‌های عددی که به نوعی همان روش‌های مبتنی بر حل معادلات ناویر استوکس در حوزه اطراف هندسه می‌باشند، می‌توانند با دقت بالایی جزئیات کاملی را نسبت به اثرات مختلف اعمال سوراخ، بر خواص جریان کاویتاسیونی ارائه داده و ما را در دستیابی به درک درستی از این پدیده یاری کنند. در کنار این مزیت منحصر به فرد، استفاده از این روش‌ها از لحاظ زمانی بسیار پرهزینه می‌باشد. به عنوان مثال در تحلیل جریان همراه با کاویتاسیون با استفاده از روش‌های عددی، به ازای هر عدد کاویتاسیون خاص یک دور فرایند استقلال از شبکه باید انجام گیرد و شبیه‌سازی به صورت جداگانه صورت پذیرد. از طرف دیگر، روش‌های تئوری دقیقاً دارای عکس این خواص هستند، چرا که این روش‌ها می‌توانند در مدت زمان بسیار کمتری (کمتر از 1%) جریان کاویتاسیونی را در دامنه وسیعی از اعداد کاویتاسیون حل کنند، اما از سوی دیگر اطلاعات کمتری نیز در اختیار ما قرار می‌دهند.

بسیاری از پرتابه‌های هوایی و دریایی برای پیمودن مسیرهای طولانی از سیستم محرکه رمجت استفاده می‌کنند. رمجت از جریان عبوری استفاده کرده و نیروی جلوبرندگی قابل توجهی تولید می‌کند. همچنین، در پرتابه‌های زیر سطحی که از موتورهای احتراق داخلی جهت تأمین نیروی مورد نیاز برای حرکت خود استفاده می‌کنند، از سیال ورودی در مصارفی همچون تأمین مکمل‌های مورد نیاز سوخت، تولید بخار برای تزریق در اطراف کاویتی و خنک کاری سیستم احتراقی استفاده می‌شود. بدین منظور در این گونه از پرتابه‌ها تزریق آب پایدار از مرکز کاویتاتور به داخل پرتابه جزو نکات بسیار مهم و قابل توجه می‌باشد.

با توجه به مطالب ذکر شده، هدف از این تحقیق بررسی خواص هیدرودینامیک کاویتاتور سوراخ‌دار می‌باشد. به این منظور با توجه به مزیت‌های دو رویکرد عددی و تئوری که به نحوی تکمیل کننده یکدیگر می‌باشند، از هر دو روش در این پژوهش استفاده شده است.

1-1 روش عددی

یکی از روش‌های حل عددی معادلات ناویر- استوکس برای جریان‌های

شامل کاویتاسیون روش جریان تعادلی همگن می‌باشد [1]. روش‌های جریان تعادلی همگن از مدل‌سازی یک سیال همگن برای دو فاز بهره می‌گیرند و یک مجموعه از معادلات را برای هر دو فاز (با خواص متفاوت در هر فاز) حل می‌کنند. شرط جریان تعادلی همگن معادل با شرط هم سرعت بودن (عدم لغزش بین دو فاز) و هم‌دما بودن در ناحیه تماس دو فاز است که برای مسائل مهندسی، این ساده‌سازی منطقی می‌باشد. روش‌های تعادلی همگن طیف وسیعی از مدل‌سازی کاویتاسیون را شامل می‌شوند. اختلاف کارهایی که بر مبنای مدل سیال همگن انجام شده بیشتر به دلیل روابط مختلفی است که برای تعریف میدان چگالی متغیر دو فاز استفاده شده‌اند. یک روش متداول برای محاسبه میدان چگالی، استفاده از معادله حالت ترمودینامیکی بخار - مایع می‌باشد. روش دیگر، حل معادله انتقال برای نسبت حجمی مایع (یا بخار) به همراه جمله چشمه برای مدل‌سازی انتقال جرم بوده که در این روش چگالی مخلوط بر اساس نسبت حجمی هر فاز محاسبه می‌شود و در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله مواردی که توجه به آن در این روش ضروری می‌باشد عبارتند از:

- انتخاب مدل مناسب انتقال جرم بین دو فاز که به صورت جمله‌ی چشمه در معادله‌ی انتقال ظاهر می‌شود. این مدل‌ها در فرض جمله چشمه تبادل جرم با هم تفاوت دارند و بر این اساس به دو دسته تقسیم می‌شوند. در دسته اول جمله چشمه بر مبنای تئوری رایلی محاسبه می‌گردد و در دسته دوم جمله چشمه بر اساس روابط تحلیل- عددی استخراج می‌شود. رابطه رایلی بر مبنای تعادل دینامیکی مکانیزم‌های فیزیکی مؤثر بر محیط حباب‌های کروی استخراج شده است و پدیده‌هایی مانند تبادل جرم و مومنتم موضعی در اطراف مرز مشترک مایع- بخار در آن لحاظ نشده‌اند. برای اینکه مدل ریاضی کاویتاسیون قابلیت پیشگویی دقیق‌تری از این پدیده را داشته باشد، مدل‌هایی بر اساس روابط تحلیلی- عددی استخراج شده‌اند. در این مدل‌ها نرخ انتقال جرم متناسب با نسبت حجمی بخار و تفاضل فشار مایع و فشار بخار می‌باشد. به طور نمونه در مدل کاویتاسیون مرکل [2] جملات تبخیر و چگالش هر دو تابعی خطی از فشار فرض شده‌اند. در مدل انتقال جرم کانز [3] جمله تبخیر تابعی از فشار فرض شده اما جمله چگالش به صورت تابعی از نسبت حجمی مایع تعریف شده است. در این پژوهش از مدل زوارت- گرب- بلماری [4] استفاده شده است که در قسمت بعد شرح داده می‌شود.

- انتخاب روش عددی حل معادله‌ی انتقال: دو روش کلی برای حل معادله‌ی انتقال نسبت حجمی وجود دارد که عبارتند از: (1) حل معادله انتقال فاز به همراه معادلات جریان و با روش عددی مشابه که به اختصار آن را روش مخلوط می‌نامند. (2) حل معادله انتقال با استفاده از تکنیک‌های خاص ردیابی سطح مشترک مانند روش نسبت حجمی سیال. روش‌های گفته شده هم برای کاویتاسیون طبیعی و هم کاویتاسیون هوادهی شده قابل استفاده می‌باشند. در این پژوهش از روش مخلوط استفاده شده است. این روش از مدل جریان تعادلی همگن که در آن دو فاز به صورت یک سیال همگن در نظر گرفته می‌شوند استفاده می‌کند؛ بنابراین یک مجموعه از معادلات برای هر دو فاز حل می‌شود.

بسیاری از روش‌های پرکاربرد مدل‌سازی جریان کاویتاسیونی در

همکاران [16] در سال 2008 مقایسه‌ای بین روش نسبت حجمی سیال و المان مرزی در شبیه‌سازی کاویتاسیون بر روی اجسام متقارن محوری انجام دادند. آنها نتایج کار خود را با داده‌های تجربی مقایسه کرده و دقت بالای روش المان مرزی را گزارش دادند. نوروزی و همکاران [17] نیز در سال 2016 جریان همراه با کاویتاسیون را بر روی هندسه‌هایی با مقاطع دایروی و بیضوی با زوایای حمله مختلف شبیه‌سازی کرده و قابلیت این روش را در برخورد با مسائل سه بعدی اثبات کردند.

با توجه به دانش نگارنده، تاکنون از روش المان مرزی برای بررسی اثرات سوراخ استفاده نشده است. از طرفی سرعت بالای همگرایی این روش و کارایی بالای آن در برخورد با مسائل صنعتی در ابعاد واقعی می‌تواند بسیار مفید باشد. بنابراین در این پژوهش از روش المان مرزی در کنار روش عددی برای بررسی خواص هیدروپنماتیک کاویتاتور سوراخ‌دار استفاده شده است.

2- معادلات حاکم و شیوه حل آنها

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد روش‌های متداول در بررسی پدیده کاویتاسیون روش‌های بر پایه جریان پتانسیل و روش‌های عددی مبتنی بر حل معادلات ناویر-استوکس می‌باشند. ملاحظه شد که در میان روش‌های بر پایه جریان پتانسیل، روش المان مرزی به دلیل سرعت و دقت بالا مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. همچنین با توجه به پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای دینامیک سیالات محاسباتی در حل مسایل مختلف و افزایش توانایی محاسباتی رایانه‌ها، محققان زیادی از روش‌های عددی برای حل جریان کاویتاسیونی استفاده کرده‌اند. در این بخش معادلات حاکم و شیوه حل برای هر دو روش ذکر خواهد شد.

2-1- روش عددی

در رویکرد جریان تعادلی همگن مجموعه‌ای از معادلات برای هر دو فاز حل می‌شود. معادله بقای جرم برای مخلوط مطابق رابطه (1) می‌باشد:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_m \vec{U}_m) = 0 \quad (1)$$

که $\vec{U}_m$ بردار سرعت متوسط سیال است و ρ_m چگالی مخلوط که به صورت رابطه (2) تعریف می‌شود:

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

در این رابطه α_v کسر حجمی بخار، α_g کسر حجمی گازهای غیرقابل چگالش، ρ_v چگالی بخار، ρ_g چگالی گازهای غیرقابل چگالش و ρ_l چگالی مایع هستند. معادله مومنتم برای مخلوط از جمع مومنتم هر یک از فازها بدست می‌آید و به صورت معادله (3) نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial (\rho_m \vec{U}_m)}{\partial t} + \rho_m (\vec{U}_m \cdot \vec{\nabla}) \vec{U}_m = -\vec{\nabla} (p_m) + \vec{\nabla} \cdot (\vec{\tau} + \vec{\tau}_t) + \vec{g} + \vec{f} \quad (3)$$

که p بیانگر فشار، $\vec{g}$ بیانگر شتاب جاذبه، $\vec{f}$ نیروی حجمی و $\vec{\tau}$ تانسور تنش است. برای شبیه‌سازی کاویتاسیون به همراه معادلات بیان شده، یک معادله انتقال برای فاز بخار یا مایع نیز حل می‌شود. در کاویتاسیون طبیعی انتقال جرم بین فاز بخار و مایع بوسیله ترم‌های چشمه در این معادله در نظر گرفته می‌شوند. یکی از معروف‌ترین و دقیق‌ترین مدل‌ها که در نرم‌افزار تجاری فلوئنت نیز موجود است، مدل زوارت-گربر-بلماری [4] است. در این مدل فرض می‌شود که تمام حباب‌های درون سیستم اندازه یکسانی دارند. زوارت و همکاران، در این مدل نرخ انتقال جرم کلی مرز فاز بر واحد حجم (R) را به صورت معادله (4) پیشنهاد کردند، که با استفاده از نرخ تغییر جرم

نرم‌افزارهای تجاری، همچون سی اف ایکس¹ و فلوئنت قرار داده شده‌اند. در سال‌های اخیر استفاده از این نرم‌افزارها در شبیه‌سازی عددی کاویتاسیون طبیعی و مصنوعی بسیار رایج شده است. از آن جمله می‌توان به کارهای بین و همکاران [5] اشاره نمود که به کمک نرم‌افزار تجاری سی اف ایکس کاویتاسیون طبیعی و مصنوعی را پشت اجسام متقارن محوری با استفاده از یک مدل سه مؤلفه‌ای بر پایه معادله انتقال جرم با موفقیت شبیه‌سازی نمودند. کنستانتین و همکاران [6] معادلات مربوط به انتقال جرم سیال را بهبود بخشیده و آن را درون کد تجاری سی اف ایکس پیاده‌سازی کردند و در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی دقت بیشتری را در مدل‌سازی کاویتاسیون گزارش کردند. روحی و همکاران [7] و پندار و روحی [8] به بررسی مدل‌های انتقال جرم متفاوت با معادلات آشفته‌گی مختلف با نرم‌افزار اپن فوم پرداختند و بیان کردند که مدل انتقال جرم کانز ترکیب شده با مدل آشفته‌گی گردابه‌های بزرگ نتایج مناسبی ارائه می‌دهد.

در زمینه بررسی کاویتاتور سوراخ‌دار کار اندکی انجام شده است که از این بین تنها می‌توان به کار جینگ و همکاران [9] اشاره کرد، آنها با استفاده از کد تجاری سی اف ایکس به بررسی پارامترهای مختلف تزریق آب در یک کاویتاتور سوراخ‌دار تحت کاویتاسیون طبیعی پرداختند. آنها شبیه‌سازی خود را در رژیم کاویتاسیون گسترده انجام دادند. با توجه به اینکه در پرتابه‌های کاربردی واقعی کاویتی بر روی بدنه بسته می‌شود و انتهای جسم در معرض جریان سیال قرار دارد، در پژوهش حاضر اثرات اعمال سوراخ در رژیم کاویتاسیون جزئی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. همچنین پارامترهای جدیدی همچون انحنا در لبه ورودی سوراخ، نوسانات فشار و غیره نیز به مجموعه نتایج اضافه شده است.

2-2- روش المان مرزی

مساله جریان پتانسیل می‌تواند 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 می‌شود. در سال 1987 اهلمن [10] نخستین کسی بود که از روش المان‌های مرزی غیرخطی بر مبنای سرعت (با استفاده از توزیع گردابه در مرز جریان) برای حل جریان کاویتاسیون جزئی بر روی هیدروفویل استفاده نمود و دو سال بعد [11]، همان روش را برای حل جریان سوپرکاویتاسیون به کار برد. کیناس و فاین [12] در سال 1991 یک روش المان مرزی غیر خطی بر مبنای پتانسیل برای حل جریان کاویتاسیون جزئی بر روی هیدروفویل ارائه نمودند. آنها با توزیع چشمه و چاه در مرز جریان و استفاده از انتگرال گرین به حل این مسأله پرداختند. این روش از حیث همگرایی بر روش مبتنی بر سرعت برتری دارد.

نتایج عمده برای مدل‌سازی کاویتاسیون سه بعدی در نهایت توسط فاین و کیناس [13] در سال 1993 به دست آمد. آن‌ها تحقیق اولیه خود را روی کاویتی جزئی انجام دادند. اثرات ویسکوزیته نیز در همان سال توسط کیناس [14] با بکارگیری روش المان مرزی غیر خطی در شبیه‌سازی سوپرکاویتاسیون لحاظ گردید. در این تحقیق نقطه جدایی کاویتی با توجه به ویسکوزیته و عدد رینولدز روی طول آن، پیش‌بینی شده و حجم کاویتی بر اساس عدد کاویتاسیون داده شده بررسی گردید. او تحقیق خود را بر روی کاویتی‌های دو بعدی و سه بعدی انجام داد. از مدل المان مرزی با استفاده از تابع گرین برای بررسی کاویتاسیون جزئی بر روی هندسه‌های متقارن محوری توسط وارگیز و همکارانش [15] در سال 2003 استفاده شده است. رشیدی و

¹ CFX

یک حباب محاسبه می‌شود.

$$R = F \frac{3\alpha\rho_v}{\Re_B} \sqrt{\frac{2|P_B - P|}{3\rho_l}} \text{sign}(P_B - P) \quad (4)$$

که در آن $\Re_B$ شعاع حباب، P_B فشار حباب و P_l فشار سیال می‌باشند. F نیز یک ضریب اصلاح تجربی است که چگونگی تعیین آن برای کاویتاسیون طبیعی در پژوهش‌های دیگر [18] گزارش شده است.

برای تکمیل دستگاه معادلات نیاز به یک مدل جریان مغشوش نیز می‌باشد که در این پژوهش از مدل $k - \varepsilon$ استاندارد استفاده شده است. در این مدل معادلات ترانسپورت مربوط به انرژی جنبشی (k) و نرخ اتلافات (ε) به ترتیب به صورت معادلات (5) و (6) محاسبه می‌شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

که در آنها G_k نمایانگر تولید انرژی جنبشی توربولانسی به دلیل گرادیان سرعت متوسط، G_b نمایانگر تولید انرژی جنبشی توربولانسی به دلیل اثرات بویانسی، Y_M نشان دهنده سهم نوسانات در جریان اغتشاشی تراکم پذیر نسبت به اتلافات کلی و $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ ، $C_{3\varepsilon}$ مقادیر ثابت می‌باشند.

2-2- روش المان مرزی

پایه اصلی روش المان مرزی، جریان پتانسیل می‌باشد، لذا در صورتی می‌توان از روش المان مرزی برای تحلیل کاویتاسیون استفاده نمود که ثابت شود جریان کاویتاسیون پتانسیلی است. آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهند که جریان در اطراف کاویتا با تقریب خوبی پتانسیلی است [19]. لذا می‌توان از تئوری‌های پتانسیل برای شبیه‌سازی کاویتاسیون حول اجسام استفاده نمود. روش المان مرزی حاضر، براساس تئوری گرین [20] بنا شده است. تئوری گرین بیان می‌کند که: هر جریان غیرچرخشی تراکم‌ناپذیر را می‌توان با یک توزیع چشمه، گردابه یا دوگان روی سطوح مقید آن شبیه‌سازی نمود. این تئوری در تحلیل جریان همراه با کاویتاسیون حول اجسام سه بعدی با تقارن محوری به صورت معادله (7) نوشته می‌شود:

$$2\pi\varphi(r, x) = \iint \left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial n} G(x, r; \xi, \rho) - \varphi(r, x) \frac{\partial G(x, r; \xi, \rho)}{\partial n} \right\} \rho d\varphi ds \quad (7)$$

که در آن n بردار عمود بر سطوح، s طول کمان طی شده روی سطوح، x و r مؤلفه‌های دستگاه مختصات متقارن محوری و توابع G و $\partial G/\partial n$ به-ترتیب توابع پتانسیل یک رینگ چشمه و دوگان و φ پتانسیل احتمالی توزیع شده روی سطوح حل هستند. تابع پتانسیل احتمالی φ ، تابع پتانسیلی است که اثر همه اجزای پتانسیل در یک نقطه به‌جز اثر پتانسیل جریان آزاد را در خود دارد. در روابط فوق، رابطه توزیع پتانسیل کلی Φ و توزیع پتانسیل احتمالی φ به صورت معادله (8) در نظر گرفته شده است:

$$\Phi = \vec{U}_\infty \vec{X} + \varphi \quad (8)$$

که در آن U_∞ سرعت جریان آزاد گذرنده از روی سطح هندسه می‌باشد. انتگرال گرین که در فوق به آن اشاره شد گویای این مطلب است که می‌توان جریان همراه با کاویتاسیون حول اجسام متقارن محوری را از برهم‌نهی توزیع رینگ دوگان و چشمه با جریان آزاد شبیه‌سازی کرد. برای این منظور

همان‌طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود بر روی سطح جسم توزیعی از رینگ دوگان و بروی سطح کاویتا توزیعی از رینگ دوگان و چشمه استفاده می‌شود، همچنین برای شبیه‌سازی سوراخ از توزیع چشمه با قدرت منفی بر روی کاویتاتور استفاده می‌شود. از آنجا که این عناصر جریان پتانسیل معادله خطی لاپلاس را ارضا می‌کنند، برای حل مساله نیازی به حل معادله لاپلاس نیست، فقط کافی است که شرایط مرزی را در انتگرال گرین اعمال نمود.

2-2-1- شرایط مرزی

الف) شرط مرزی سینماتیکی بر روی سطح جسم و کاویتا: بر اساس شرط نفوذ ناپذیری سطح، جریان هیچ مؤلفه عمودی بر سطح جسم ندارد. همچنین فرض می‌شود که جریان هیچ مؤلفه عمودی بر سطح کاویتا نیز نداشته باشد. این بدان معناست که جهت جریان بر روی سطح جسم و کاویتا، صرفاً در راستای موازی این سطوح است. بنابراین روی سطح جسم و سطح کاویتا می‌توان رابطه (9) را نوشت:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

ب) شرط مرزی دینامیکی: چون جریان حول کاویتا به مقدار زیادی غیر چرخشی می‌باشد، می‌توان معادله برنولی را برای محاسبه فشار استفاده کرد. بنابراین با فرض فشار کاویتا ثابت و اعمال معادله برنولی بین یک نقطه جریان آزاد و نقطه‌ای روی مرز کاویتا و سپس انتگرال‌گیری از آن و اعمال رابطه $x_s = \cos(\theta_j)$ در راستای s ، می‌توان رابطه (10) را نوشت:

$$\varphi = \varphi_0 + \sqrt{1 + \sigma} (s - s_0) - (x - x_0) \quad (10)$$

که φ_0 ، s_0 و x_0 به ترتیب پتانسیل، طول قوس و موقعیت نقطه شروع کاویتا روی جسم می‌باشند. نکته‌ای که ذکر آن مناسب می‌باشد این است که با توجه به اینکه ضریب فشار روی کاویتا به‌صورت $C_p = (p - p_\infty)/0.5\rho V_\infty^2$ تعریف می‌شود و با در نظر گرفتن تعریف عدد کاویتاسیون، ملاحظه می‌شود که روی مرز کاویتا ضریب فشار قرینه عدد کاویتاسیون می‌باشد:

$$\sigma = -C_p \quad (11)$$

ج) شرط مرزی سوراخ: برای شبیه‌سازی سوراخ بر روی کاویتاتور چشمه با قدرت معلوم قرار داده می‌شود، که همان معرف سرعت باشد. بنابراین فرض می‌شود که سیال با سرعت V_{ring} وارد سوراخ شود، به گونه‌ای که نسبت به سرعت جریان آزاد بدون بعد شده باشد. بنابراین:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = -x_n - V_{ring} \quad (12)$$

2-2-2- صورت انتگرالی معادله حاکم

با اعمال شرایط مرزی سینماتیکی و دینامیکی و همچنین شرط مرزی سوراخ، معادله (7) برای سطح جسم و کاویتا به ترتیب به صورت معادلات (13) و (14) نوشته می‌شود:

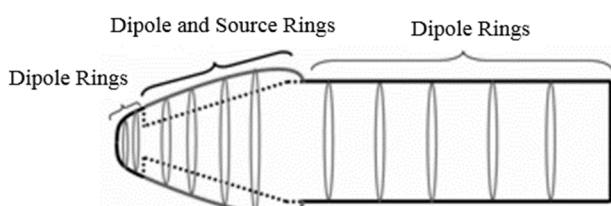


Fig.1 Source and dipole distribution on the body and cavity boundaries
شکل 1 توزیعی از رینگ دوگان و چشمه در مرز جسم و کاویتا

سرتخت، مقایسه شده است. رابطه تجربی مذکور به صورت معادله (15) نوشته می‌شود:

$$L_c = \left(\frac{0.751}{\sigma} \right)^{1/0.75} \quad (15)$$

ملاحظه می‌شود که نتایج روش المان مرزی با نتایج تجربی مطابقت مناسبی دارد و توانایی آن را جهت مدل‌سازی کاپیتاسیون جزئی در اطراف اجسام متقارن محوری و پیش‌بینی طول کاپیتی با دقت مناسب، تأیید می‌کند. روند افزایش طول کاپیتی با کاهش عدد کاپیتاسیون در این شکل را می‌توان این گونه توجیه نمود که کاهش عدد کاپیتاسیون منجر به کاهش اختلاف فشار جریان آزاد و فشار درون کاپیتی می‌گردد و این باعث می‌شود که گرادیان فشار کمتری در جریان ایجاد شده و خطوط جریان انحنای کمتری داشته باشند؛ لذا تمایل دارند موازی خطوط جریان بالادست رفتار کنند. بنابراین طول کاپیتی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد کاپیتاسیون یا کاهش طول کاپیتی رفتار کاپیتی به سمت کاپیتاسیون ابری میل می‌کند و باعث رفتار نوسانی در طول کاپیتی می‌شود. با توجه به اینکه روش المان مرزی حاضر توانایی مدل‌سازی کاپیتاسیون به صورت ناپایا را ندارد، مشاهده می‌شود در اعداد کاپیتاسیون بزرگ نتایج حاضر در مقایسه با نتایج تجربی کمی خطا دارد و در اعداد کاپیتاسیون کوچکتر به دلیل رفتار نسبتاً پایدار کاپیتی، خطا کمتر می‌شود.

همچنین نتایج دو روش المان مرزی و عددی با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط رز [22] برای طول کاپیتی تشکیل شده در اطراف استوانه سر تخت در عدد کاپیتاسیون 0.3 در شکل 3 مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که هر دو روش تغییرات فشار را به خوبی نشان داده و طول کاپیتی (طول ناحیه با ضریب فشار -0.3) را بدقت شبیه‌سازی می‌کنند. در روش المان مرزی به دلیل استفاده از مدل بستن ساده در انتهای کاپیتی یک افزایش فشار در انتهای کاپیتی دیده می‌شود که این اتفاق در روش حجم کنترل دیده نمی‌شود. البته این افزایش فشار تا زمانی که کاپیتی روی بخش افقی اجسام بسته شود خطایی در محاسبه ضریب پسا ایجاد نمی‌کند.

2-3- بررسی کاپیتاتور سوراخ‌دار با استفاده از روش عددی

در این بخش اثرات سوراخ با استفاده از روش عددی مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد. هندسه مورد بررسی به همراه ابعاد آن در شکل 4 نشان داده شده است. هندسه مورد نظر شامل یک بخش استوانه‌ای به همراه یک مخروط ناقص و همچنین کاپیتاتور دیسکی می‌باشد. به منظور بررسی کاپیتاتور سوراخ‌دار لوله‌ای با ابعاد متغیر در مرکز کاپیتاتور نصب می‌شود که در شکل نیز نشان داده شده است.

با توجه به متقارن محوری بودن مسأله از یک صفحه تقارن برای کاهش زمان محاسباتی استفاده شده است. محیط محاسباتی و شرایط مرزی در شکل 5 نشان داده شده‌اند.

دامنه محاسباتی بر اساس تجربیات موجود در منابع مختلف [7, 8] و شبیه‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق انتخاب شده است. از شرط مرزی سرعت برای ناحیه ورودی و از شرط فشار برای قسمت انتهایی حوزه حل بهره گرفته شده است. در بخش خارجی حوزه حل جهت جلوگیری از اضافه شدن اثرات دامنه شرط مرزی تقارن در نظر گرفته شده، چرا که این شرط مرزی در جریان‌های لزج به نحوی همان خصوصیات دیوار بدون تنش برشی را تداعی می‌کند. بدنه اُدر، ناحیه مخروطی و کاپیتاتور نیز دارای شرط مرزی دیوار می‌باشند. صفحه انتهایی لوله نیز به عنوان خروجی در نظر گرفته شده و با

$$\begin{aligned} 2\pi\varphi + \iint_{S_{b1}+S_{b2}+S_r} \varphi \frac{\partial G}{\partial n} dS - \iint_{S_c} \frac{\partial \varphi}{\partial n} G dS \\ + \iint_{S_c} \sqrt{1+\sigma}(s-s_0) \frac{\partial G}{\partial n} dS + \varphi_0 \iint_{S_c} \frac{\partial G}{\partial n} dS \\ = \iint_{S_{b1}+S_{b2}} (-x_n) G dS + \iint_{S_r} (-x_n - V_{ring}) G dS \\ + \iint_{S_c} (x - x_0) \frac{\partial G}{\partial n} dS \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \iint_{S_{b1}+S_{b2}+S_r} \varphi \frac{\partial G}{\partial n} dS - \iint_{S_c} \frac{\partial \varphi}{\partial n} G dS + \varphi_0 \iint_{S_c} \frac{\partial G}{\partial n} dS \\ + \iint_{S_c} \sqrt{1+\sigma}(s-s_0) \frac{\partial G}{\partial n} dS + 2\pi\varphi_0 \\ + 2\pi\sqrt{1+\sigma}(s-s_0) = \iint_{S_{b1}+S_{b2}} (-x_n) G dS \\ + \iint_{S_r} (-x_n - V_{ring}) G dS + \iint_{S_c} (x - x_0) \frac{\partial G}{\partial n} dS \\ + 2\pi(x - x_0) \end{aligned} \quad (14)$$

3- نتایج

در این بخش نتایج مربوط به تحلیل جریان بر روی کاپیتاتور سوراخ‌دار و بدون سوراخ با استفاده از روش‌های تئوری و عددی در دو قسمت ارائه می‌شوند. با توجه به اینکه روش المان مرزی تنها ناحیه سطح جسم و کاپیتی را مدل‌سازی می‌کند، به منظور دستیابی به جزئیات بیشتر از نواحی مختلف جریان، در قسمت اول از حل معادلات حاکم بر جریان به کمک روش‌های عددی در تمام حوزه اطراف جسم استفاده شده است. این امر علاوه بر اینکه راه مدل‌سازی جریان اطراف کاپیتاتور سوراخ‌دار به روش المان مرزی را هموار می‌کند، به نحوی مرجع مناسبی برای اعتبارسنجی نتایج این روش در برخورد با اثرات سوراخ می‌باشد. در قسمت دوم نتایج مربوط به روش المان مرزی ارائه شده و دلیل استفاده از این روش به تفصیل بیان می‌گردد.

لازم به ذکر است که تمام مقادیر ارائه شده در این تحقیق بر اساس پارامترهای ارائه شده در جدول 1 بدون بعد شده‌اند. (به جز نیرو که دارای واحد نیوتون N می‌باشد)

1-3- اعتبارسنجی

برای ارزیابی میزان دقت نتایج بدست آمده توسط روش‌های المان مرزی و عددی در این پژوهش، اطمینان از صحت این نتایج و اعتبار بخشی به روش استفاده شده، در این قسمت مقایسه‌ای بین نتایج تحقیق حاضر و نتایج تحلیلی و تجربی موجود صورت پذیرفته است. به منظور بررسی توانایی روش المان مرزی بر مبنای پتانسیل در پیش‌بینی طول کاپیتی مربوط به رژیم کاپیتاسیون جزئی، در شکل 2 نتایج این روش با نتایج رابطه تجربی ارائه شده توسط بیلت و ویر [21] برای طول کاپیتی تشکیل شده در اطراف استوانه

جدول 1 بی بعد سازی متغیرها

Table 1 Nondimensionalizing the variables

کمیت	پارامتر بی بعد سازی	پارامتر بدون بعد
حداکثر طول کاپیتی L	قطر کاپیتاتور D_n	$L_c = L/D_n$
حداکثر قطر کاپیتی D	قطر کاپیتاتور D_n	$D_c = D/D_n$
قطر سوراخ D	قطر کاپیتاتور D_n	$D_h = D/D_n$
موقعیت مکانی X	قطر کاپیتاتور D_n	$X_c = X/D_n$
سرعت V	سرعت جریان آزاد V_0	$V_c = V/V_0$
فشار P	فشار کاری P_0	$P_c = P/P_0$
دبی Q	$V_0 D_n^2$	$q = Q/V_0 D_n^2$

شبکه بکار رفته در نزدیکی سطح جسم هم به علت وجود گرادیان‌های شدید در خواص سیال (سرعت، فشار، دانسیته و غیره) ریزتر از سایر قسمت‌ها در نظر گرفته شده است.

مهمترین مسأله‌ای که در انجام شبیه‌سازی‌های عددی بر مبنای معادلات ناویر استوکس باید مد نظر قرار گیرد بحث استقلال از شبکه می‌باشد. در این مقاله مطالعه کاملی بر روی شبکه انجام گرفته که نتایج آن در جدول 2 نشان داده شده است. از دو معیار ابعاد کاویتی و نیروی وارد بر کاویتاتور برای بررسی روند تغییرات استفاده شده است. مشاهده می‌شود اختلاف بین شبکه چهارم و پنجم بسیار کم بوده، بنابراین شبکه چهارم با حدود 2700000 سلول محاسباتی به عنوان شبکه مطلوب انتخاب شده است.

در ادامه از 8 هندسه مختلف به منظور مقایسه نتایج بهره گرفته شده که به ترتیب با حروف A تا G مشخص شده‌اند به گونه‌ای که حالت A مربوط به نمونه اصلی و بدون سوراخ می‌باشد. نمونه‌های بررسی شده همگی دارای هندسه ای یکسان بوده (شکل 4) و فقط در قطر و انحنا ورودی سوراخ با یکدیگر تفاوت دارند. با توجه به اینکه انتهای لوله ورودی جریان به محفظه احتراق متصل می‌شود، فشار در این ناحیه بسیار بالا است و می‌تواند مقادیر مختلفی داشته باشد. بنابراین علاوه بر اعمال تغییرات هندسی، از سه فشار مختلف نیز برای انتهای لوله استفاده شده است.

هندسه‌های مختلف در سه پارامتر قطر، انحنا لوله ورودی سوراخ و فشار انتهای لوله انتقال با یکدیگر تفاوت دارند. مقادیر در نظر گرفته شده برای هرکدام از این سه حالت به همراه کد مشخص کننده آن در جدول 3 آورده شده است. همچنین جزئیات هندسی 8 نمونه انتخاب شده، جهت بررسی اثرات متنوع کاویتاتور سوراخ‌دار در جدول 4 ارائه شده است.

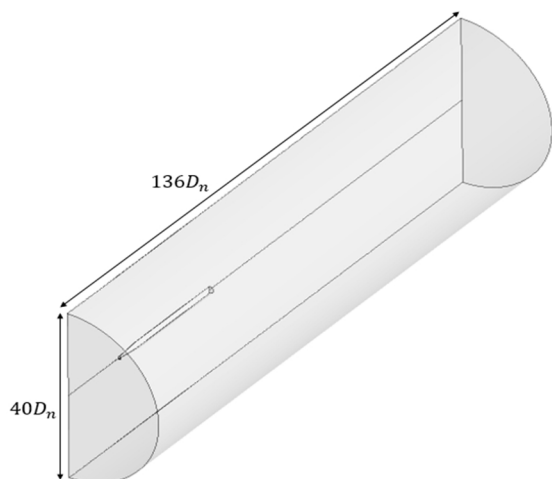


Fig. 5 Computational domain

شکل 5 دامنه محاسباتی

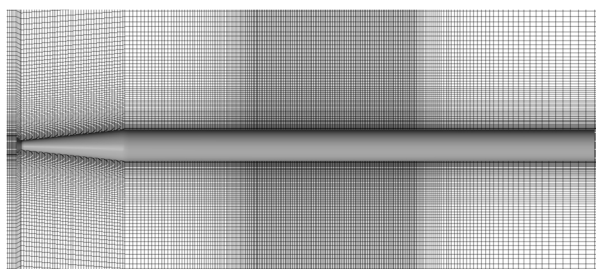


Fig. 6 Computational grids around the projectile

شکل 6 شبکه محاسباتی در اطراف پرتابه

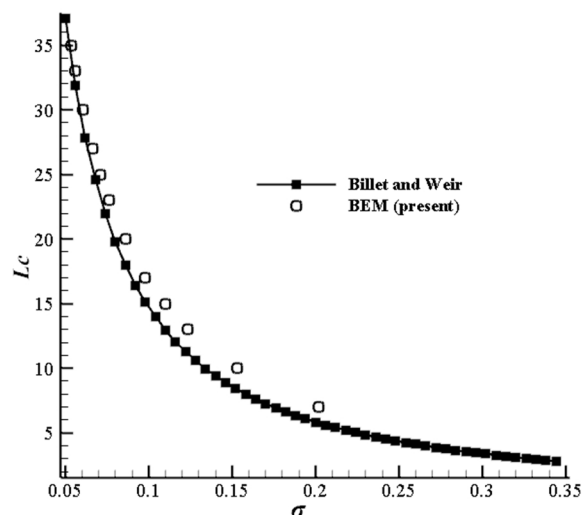


Fig. 2 Comparison of the obtained cavity length from BEM with Billet and Weir analytical equation [21]

شکل 2 مقایسه نتایج روش المان مرزی با رابطه تجربی بیلت و ویر [21] در پیشبینی طول کاویتی

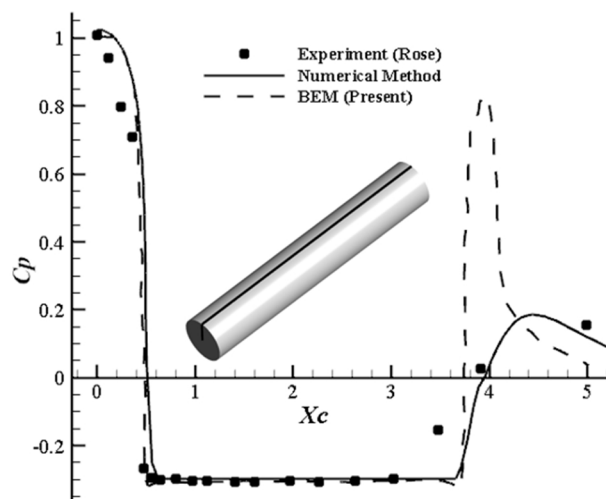


Fig. 3 Variation of the pressure coefficient on the cylinder, comparison of the numerical and theoretical results with the experimental data [22]

شکل 3 تغییرات ضریب فشار بر روی استوانه، مقایسه نتایج روش‌های تئوری و عددی با نتایج تجربی [22]

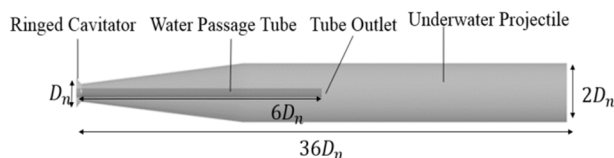


Fig. 4 Geometry of the projectile along with its dimensions

شکل 4 هندسه پرتابه به همراه ابعاد آن

توجه به بالا بودن فشار در این قسمت به علت واکنش‌های احتراقی فشاری معادل چند برابر فشار کاری لحاظ گردیده است.

به منظور بررسی دقیق پدیده کاویتاسیون شبکه‌بندی کاملاً منظم اطراف جسم در نظر گرفته شده است. شبکه استفاده شده در منطقه بسته شدن کاویتی ریزتر از سایر نقاط در نظر گرفته شده، چراکه استفاده از این روش موجب کاهش شدید تعداد شبکه می‌گردد. شبکه استفاده شده در اطراف پرتابه در شکل 6 نشان داده شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود،

افزایش نیروی اصطکاکی می‌شود.

شکل 8 مؤلفه‌های فشاری و اصطکاکی نیرو را برای نمونه‌های مختلف نمایش می‌دهد. در این شکل علاوه بر افزایش نیروی اصطکاکی وارد بر پرتابه به علت کاهش طول کاویتی، افزایش مؤلفه فشاری نیرو به ازای افزایش قطر سوراخ نیز مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه سهم عمده‌ای از نیروی فشاری وارد بر پرتابه مربوط به کاویتاتور می‌باشد، برای بررسی علت افزایش نیرو، تغییرات ضریب فشار بر روی کاویتاتور بررسی می‌شود. توزیع ضریب فشار بر روی کاویتاتور به ازای قطرهای مختلف سوراخ در شکل 9 آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حلقه سکون که مکان هندسی تمرکز نیرو می‌باشد با افزایش قطر سوراخ به سمت لبه کاویتاتور حرکت می‌کند. این امر موجب افزایش گستره اعمال نیرو و در نتیجه افزایش نیروی وارد بر پرتابه می‌شود. کانتور توزیع ضریب فشار نیز که جابجایی حلقه سکون را به خوبی نمایش می‌دهد در شکل 10 آورده شده است. بنابراین به طور کلی استفاده از سوراخ دو اثر منفی کاهش طول کاویتی و افزایش نیروی وارد بر پرتابه را با خود به همراه دارد.

با توجه به تعریف دبی حجمی طبق رابطه

$$Q = V A \quad (16)$$

افزایش سرعت (V) و یا سطح مقطع (A) موجب افزایش دبی می‌گردد. دبی‌های بدون بعد مختلف برای سه هندسه B، C و D به همراه متوسط سرعت بدون بعد عبوری از سوراخ در جدول 6 آورده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش قطر سوراخ موجب افزایش دبی عبوری از لوله انتقال شده است. نکته قابل توجه در این قسمت مربوط به رابطه بین افزایش دبی و سطح مقطع می‌باشد. با توجه به اعداد مندرج در جدول مشاهده می‌شود که با 3 برابر کردن قطر سوراخ دبی حجمی 12 برابر شده است. علت اصلی این پدیده افزایش سرعت در ناحیه ورودی می‌باشد که با افزایش قطر سوراخ رابطه مستقیم دارد. بنابراین در طراحی کاویتاتورهای سوراخ‌دار باید به این نکته

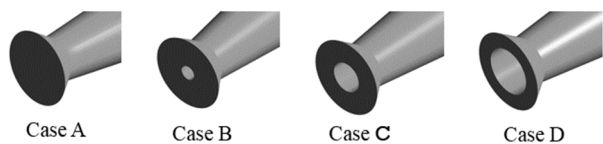


Fig. 7 Cases A, B, C and D cavitators

شکل 7 کاویتاتور نمونه‌های A، B، C و D

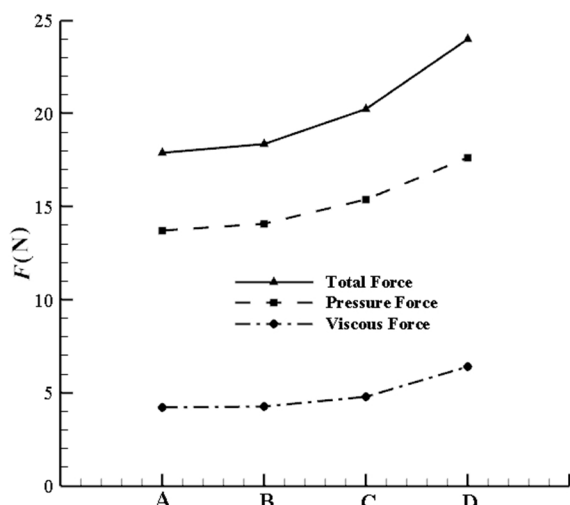


Fig. 8 Different component of the force exerted on cases A, B, C and D

شکل 8 مؤلفه‌های مختلف نیرو وارد بر نمونه‌های A، B، C و D

جدول 2 ابعاد کاویتی و ضریب پسی وارد بر کاویتاتور برای شبکه‌های مختلف

Table 2 Cavity dimensions and drag coefficient on the cavitator for different grids

شبکه	تعداد شبکه	L_c	D_c	C_d
شبکه 1	900000	16.5	3.48	0.9
شبکه 2	1500000	20	4.4	0.886
شبکه 3	2100000	21.4	4.56	0.861
شبکه 4	2700000	23	4.6	0.86
شبکه 5	3300000	23.3	4.62	0.857

جدول 3 مقادیر در نظر گرفته شده برای قسمت‌های مختلف (بدون بعد)

Table 3 Values intended for different parts

کد	1	2	3
قطر سوراخ	0.2	0.4	0.6
شعاع لبه ورودی	0	0.06	0.12
فشار انتهایی لوله	3	6	9

جدول 4 کدهای در نظر گرفته شده برای نمونه‌های مختلف

Table 4 Codes intended for different cases

نمونه	کد قطر ورودی	کد شعاع لبه ورودی	کد فشار انتهایی لوله
Case A	-	-	-
Case B	1	1	1
Case C	2	1	1
Case D	3	1	1
Case E	2	2	1
Case F	2	3	1
Case G	2	1	2
Case H	2	1	3

در ادامه اثر تغییرات اعمال شده در هندسه‌های مختلف بر پارامترهای متنوع جریان کاویتاسیونی همچون ابعاد کاویتی و نیروی وارد بر پرتابه در سه بخش مختلف مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرند.

3-1-2- بررسی اثر تغییر در قطر لوله

در این قسمت سه هندسه B، C و D که به ترتیب دارای سوراخ با اقطار 20%، 40% و 60% قطر کاویتاتور هستند مورد بررسی قرار می‌گیرند. کاویتاتورهای این سه هندسه به همراه نمونه بدون سوراخ در شکل 7 نشان داده شده‌اند.

نتایج مربوط به ابعاد کاویتی در جدول 5 ارائه شده است. با توجه به جدول مشاهده می‌شود با افزایش قطر لوله، طول و قطر کاویتی کاهش پیدا می‌کند به گونه‌ای که با سه برابر کردن قطر لوله در حالت D نسبت به B طول و قطر کاویتی به ترتیب به اندازه 19% و 16% کمتر شده است که مقادیر قابل توجهی می‌باشند، همچنین مشاهده می‌شود که ابعاد کاویتی در حالت‌های مختلف کاویتاتور سوراخ دار همواره کمتر از حالت بدون سوراخ است. این کاهش طول موجب افزایش سطح تماس سیال با بدنه و در نهایت

جدول 5 ابعاد کاویتی برای نمونه‌های A، B، C و D

Table 5 Cases A, B, C and D cavity dimensions

نمونه	Case A	Case B	Case C	Case D
L_c	23	22.3	21	18
D_c	4.6	4.4	4.28	3.7

این پدیده ایجاد انحنا در لبه ورودی سوراخ می‌باشد. با توجه به گزارش منتشر شده توسط انجمن مهندسی آمریکا [23] میزان تلفات در جریان‌هایی با خواص انقباض ناگهانی به ازای نسبت شعاع لبه ورودی به قطر لوله در جدول 7 آورده شده است.

که در آن r شعاع لبه ورودی، D قطر لوله و K پارامتری بی بعد جهت تعیین میزان تلفات می‌باشد. با توجه به جدول کمترین تلفات زمانی است که $r/D > 0.15$ باشد. بنابراین در این تحقیق از مقادیر نشان داد شده در شکل 11 برای جلوگیری از تلفات جریان در ورودی لوله استفاده شده است.

ابعاد کاویته تشکیل شده بر روی هندسه‌های C، E و F در جدول 8 آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ایجاد انحنا در لبه ورودی سوراخ تأثیر اندکی بر طول و قطر کاویته تشکیل شده دارد.

مهمترین موضوع در طراحی کاویتاتور سوراخ‌دار فراهم کردن شرایطی است که سیال به آرامی و با کمترین تلفات به داخل پرتابه منتقل شود. بهترین پارامتری که می‌تواند میزان نوسانات جریان داخل لوله انتقال سیال را نشان دهد، شدت توربولانسی است. این پارامتر به عنوان معیار مناسبی جهت تعیین میزان اغتشاشات جریان شناخته شده و به صورت رابطه (17) تعریف می‌گردد:

$$I = \frac{\dot{u}}{U} \quad (17)$$

که در آن $\dot{u}$ ریشه مربع سرعت‌های نوسانی توربولانسی و U سرعت متوسط جریان است. مقادیر میانگین شدت توربولانسی در طول لوله انتقال، که بر اساس شدت تلاطم جریان ورودی بدون بعد شده است برای نمونه‌های C و E به ترتیب 0.55 و 0.25 می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با ایجاد انحنا در لبه ورودی شدت اغتشاشات در داخل لوله حدود 54% کمتر شده است که مقدار قابل توجهی می‌باشد.

3-2-3- بررسی اثر فشار در انتهای لوله

در پرتابه‌های زیر سطحی از سیال کاری برای انجام امور مختلفی مانند خنک‌کاری سیستم پیش‌ران، تأمین مکمل‌های مورد نیاز جهت احتراق و تأمین بخار برای تزریق در ابر کاویته استفاده می‌شود. آن دسته از پرتابه‌هایی

جدول 7 ضریب تلفات در جریان‌هایی با خواص انقباضی نسبت به هندسه [23]

r/D	0.02	0.06	$0.15 \leq$
K	0.28	0.15	0.04

جدول 8 ابعاد کاویته برای نمونه‌های C، E و F

Table 8 Cases C, E and F cavity dimensions

نمونه	Case C	Case E	Case F
L_c	21	20.8	20.8
D_c	4.28	4.28	4.28

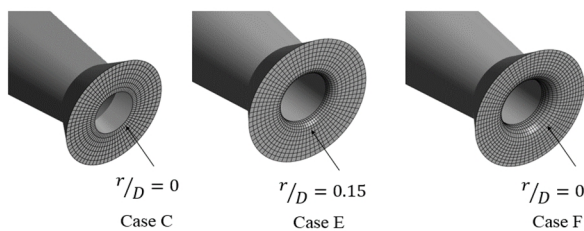


Fig. 11 Cases C, E and F cavitators

شکل 11 کاویتاتور نمونه‌های C، E و F

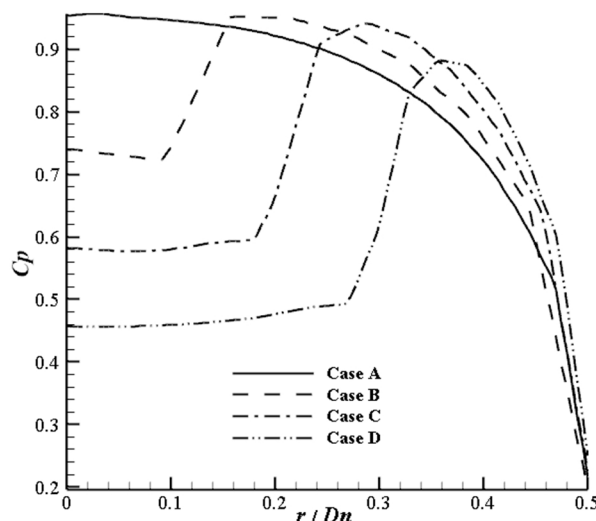


Fig. 9 Pressure coefficient on the cavitator of cases A, B, C and D

شکل 9 ضریب فشار بر روی کاویتاتور نمونه‌های A، B، C و D

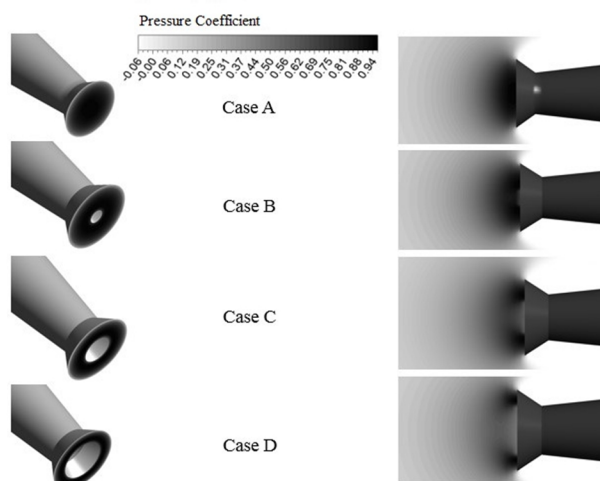


Fig. 10 Pressure coefficient contour on the cavitator and around it for cases A, B, C and D

شکل 10 کانتور ضریب فشار بر روی کاویتاتور و اطراف آن برای نمونه‌های A، B، C و D

جدول 6 دبی جرمی عبوری از سوراخ و متوسط سرعت جریان در ناحیه ورودی مربوط به نمونه‌های B، C و D

نمونه	Case B	Case D	Case E
q	14.8	71.3	180
V_c	0.5	0.58	0.66

توجه داشت که اندکی افزایش قطر تأثیر بسیار بالای در حجم سیال عبوری از لوله انتقال دارد.

3-2-3- بررسی اثر انحنا لبه ورودی

همان‌طور که در قسمت قبل بیان شد ناحیه ورودی لوله به دلیل وجود انقباض ناگهانی سبب ایجاد گرادیان فشار بالا در این منطقه می‌شود. این امر ممکن است در لحظات ابتدایی حرکت پرتابه زیر سطح آب تا رسیدن به سرعت‌های بالا موجب بوجود آمدن کاویتاسیون در داخل لوله و کاهش دبی سیال مورد نیاز جهت پیش‌ران پرتابه گردد. یک راهکار جهت جلوگیری از

شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از لحاظ ابعاد کاویتی و نیروی وارد بر کاویتاتور روش المان مرزی به ترتیب 11.5% و 14% با روش عددی اختلاف دارد که با توجه به فرضیات ساده‌کننده‌ای که در این روش در نظر گرفته می‌شود، مقدار قابل توجهی نیست. همچنین در بخش اعتبارسنجی روش المان مرزی نشان داده شد که هر چه عدد کاویتاسیون کمتر باشد، دقت این روش بالاتر است، بنابراین در صورتی که مقایسه در اعداد کاویتاسیون کوچکتری انجام شود این اختلاف هم کمتر خواهد شد. روش المان مرزی ضریب پسا وارد بر کاویتاتور را نیز با اندکی اختلاف نسبت به روش عددی گزارش می‌دهد.

مقایسه‌ای بین زمان همگرایی روش‌های تئوری و عددی قابلیت روش المان مرزی و علت استفاده از آن را به خوبی نشان می‌دهد. در جدول 11 تعداد شبکه مورد استفاده و زمان همگرایی دو روش المان مرزی و عددی برای نمونه انجام گرفته در بخش قبل با یکدیگر مقایسه شده است. رایانه پردازش‌گر استفاده شده برای هر دو روش یکسان می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تعداد المان‌های روش المان مرزی حدوداً 3400 برابر کمتر از تعداد شبکه‌های مورد استفاده در روش عددی می‌باشد. این تفاوت قابل توجه در تعداد المان‌ها، منجر به تفاوت بسیار زیادی در سرعت همگرایی می‌شود، به گونه‌ای که سرعت همگرایی روش المان مرزی حدود 187 برابر سرعت همگرایی روش عددی می‌باشد.

جدول 10 خواص هیدرودینامیک کاویتی، مقایسه روش‌های تئوری و عددی

Table 10 Hydrodynamic properties of cavity, comparison of theoretical and numerical methods

روش حل	L_c	D_c	C_d
المان مرزی	26	4.1	1
عددی (فلوئنت)	23	4.6	0.9

جدول 11 تعداد شبکه و زمان همگرایی روش‌های تئوری و عددی

Table 11 The number of grids and convergence time of theoretical and numerical methods

روش حل	تعداد المان	زمان همگرایی (دقیقه)
المان مرزی	800	15
عددی (فلوئنت)	2700000	2800

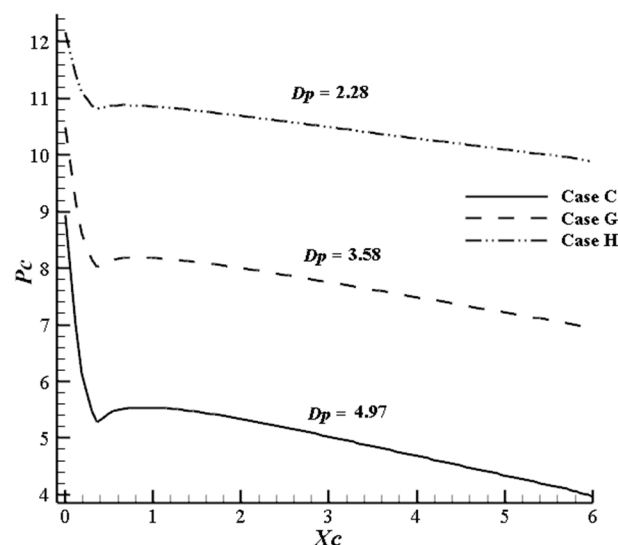


Fig. 12 Pressure changes in the fluid transfer tube for cases C, G and H
شکل 12 تغییرات فشار در داخل لوله انتقال سیال مربوط به نمونه‌های C، G و H

که سیال مصرفی خود را از محیط اطراف و از طریق کاویتاتور وارد می‌کنند به وسیله لوله انتقال، آن را به بخش‌های میانی بدنه منتقل می‌کنند. فشار کاری در این نواحی وابسته به شرایط کاری سیستم‌های داخلی بوده و به عنوان یکی از پارامترهای طراحی به حساب می‌آید. در این پژوهش از سه فشار کاری مختلف برای هندسه‌های C، G و H استفاده شده است که به ترتیب 3، 6 و 9 برابر فشار محیط می‌باشند. فشار مورد نظر بر روی صفحه انتهایی لوله انتقال اعمال شده است. ابعاد کاویتی، نیروی وارد بر پرتابه، دبی بدون عبور از سوراخ و سرعت بدون بعد در ناحیه ورودی برای این سه هندسه در جدول 9 آورده شده‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش فشار در انتهای کاویتی تأثیر چندانی بر ابعاد کاویتی نداشته به گونه‌ای که با 3 برابر کردن فشار انتهای لوله تنها 2% کاهش طول مشاهده می‌شود. با توجه به تغییر اندکی که در طول کاویتی ایجاد شده نیروی وارد بر پرتابه هم تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. همچنین مشاهده می‌شود که دبی حجمی عبوری از سوراخ با افزایش فشار انتهای لوله کاهش پیدا کرده است که با توجه به ثابت بودن قطر سوراخ، کاهش سرعت در ناحیه ورودی دلیل اصلی این رویداد خواهد بود، که خود این کاهش سرعت نیز به دلیل رشد میدان فشار در ناحیه ورودی می‌باشد. نمودار تغییرات فشار در طول لوله انتقال سیال نیز برای این سه حالت در شکل 12 رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فشار انتهای لوله میزان افت فشار در داخل لوله کاهش قابل توجهی پیدا میکند. در این حالت، با افزایش 3 برابری فشار در نمونه H نسبت به C میزان افت فشار 54% کمتر شده است که این امر از دیدگاه طراحی بسیار حائز اهمیت است.

3-3- بررسی کاویتاتور سوراخ‌دار با استفاده از روش المان مرزی

در بخش گذشته خواص هیدرودینامیک کاویتاتور سوراخ‌دار با استفاده از حل معادلات حاکم بر جریان به روش عددی بررسی شد و اطلاعات جامعی در مورد اثرات سوراخ بدست آمد. در این بخش از روش المان مرزی بر پایه پتانسیل برای حل جریان بر روی پرتابه با کاویتاتور سوراخ‌دار استفاده می‌شود، همچنین دلیل استفاده از این روش نیز ذکر می‌گردد.

قبل از ارائه نتایج لازم است عدم وابستگی دقت حل به تعداد گره‌های شبکه، مورد ارزیابی قرار گیرد. در شکل 13 استقلال حل از تعداد المان‌های توزیع شده بر روی پرتابه مورد نظر در عدد کاویتاسیون 0.065 بر اساس معیار عدد کاویتاسیون بررسی شده است (در این بخش هم از هندسه قسمت قبل، شکل 4، استفاده شده است). با توجه به این شکل ملاحظه می‌گردد با افزایش تعداد المان‌ها تغییرات نتایج کمتر شده و حل به سمت یک مقدار مشخص پیش می‌رود. در این حالت اگر تعداد المان‌ها از 800 بیشتر شود، جواب مستقل از شبکه خواهد بود.

در ابتدا مقایسه‌ای بین نتایج روش المان مرزی و روش عددی بر روی پرتابه با کاویتاتور بدون سوراخ انجام می‌گیرد. این مقایسه می‌تواند به نحوی قابلیت روش المان مرزی در تحلیل هندسه‌های کاربردی را به نمایش بگذارد. جزئیات ابعاد کاویتی و ضریب پسی وارد بر کاویتاتور در جدول 10 آورده

جدول 9 خواص هیدرودینامیکی کاویتی نمونه‌های C، G و H

هندسه	Case C	Case G	Case H
L_c	21	20.6	20.6
D_c	4.28	4.4	4.28
q	71.3	62.8	53
V_c	0.58	0.5	0.42

ابعاد کاویتی تشکیل شده به ازای هر دو روش در جدول 12 ارائه شده‌اند. در این قسمت هم مانند بخش قبل (کاویتاتور سوراخ‌دار) نتایج بین 13% تا 15% اختلاف دارند. کاویتی تشکیل شده اطراف دماغه هندسه نیز در شکل 15 نشان داده شده است.

3-3-1- تغییرات ابعاد کاویتی در اعداد کاویتاسیون مختلف

مهمترین خروجی که از بررسی هر هندسه‌ای در جریان کاویتاسیونی باید گرفته شود مربوط به تعیین ابعاد کاویتی در گستره وسیعی از اعداد کاویتاسیون است. در شکل 16 طول و قطر بدون بعد کاویتی برای پرتابه مورد نظر با قطر بدون بعد سوراخ 0.4 برای اعداد کاویتاسیون 0.049 تا 0.47 نشان داده شده است. همچنین هندسه کاویتی تشکیل شده بر روی پرتابه نیز به ازای دو عدد کاویتاسیون مختلف در شکل 17 نشان داده شده است.

در روش المان مرزی با اضافه و کم کردن تعداد چشمه‌های بر روی کاویتاتور می‌توان قطرهای مختلف سوراخ را در اعداد کاویتاسیون مختلف شبیه‌سازی کرد. در این قسمت اثرات مربوط به سوراخ با اندازه‌های مختلف در عدد کاویتاسیون 0.1 بررسی شده است. شکل 18 توزیع ضریب فشار بر روی کاویتاتورهای مختلف را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اینجا هم مانند روش عددی با افزایش قطر سوراخ حلقه سکون به سمت لبه کاویتاتور حرکت می‌کند. طول و قطر کاویتی تشکیل شده بر روی پرتابه در جدول 13 قرار داده شده‌اند. مشاهده می‌شود با افزایش قطر لوله ابعاد کاویتی کاهش پیدا می‌کند. همچنین هندسه کاویتاتورهای مختلف نیز برای این حالت در شکل 19 نشان داده شده‌اند.

در این بخش روش المان مرزی به طور کامل برای مدل‌سازی سوراخ استفاده شد و نتایج آن با داده‌های عددی موجود تطبیق پیدا کرد. حال زمان آن است که مهمترین کاربرد این روش ارائه گردد. با توجه به سرعت بالای

جدول 12 ابعاد کاویتی، مقایسه روش‌های تئوری و عددی

Table 12 Cavity dimensions, comparison of theoretical and numerical methods		
D_c	L_c	روش حل
4.1	24	المان مرزی
4.3	21	عددی (فلوئنت)

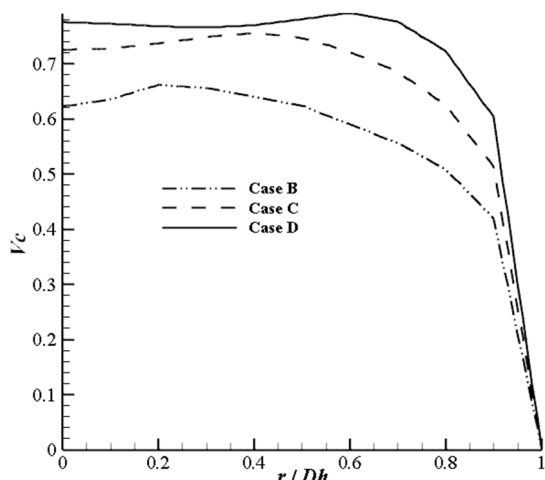


Fig. 14 Velocity profile obtained by numerical method at the entrance of the hole for cases B, C and D

شکل 14 پروفیل سرعت در ناحیه ورودی سوراخ حاصل از روش عددی مربوط به نمونه‌های B, C و D

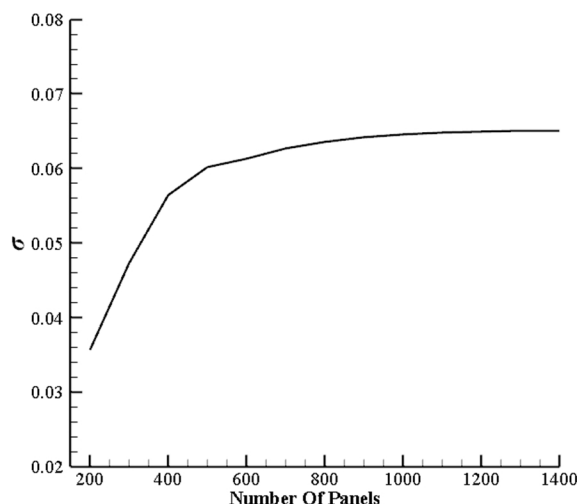


Fig. 13 The effect of number of panels on cavitation number

شکل 13 تأثیر تعداد پنل‌ها بر عدد کاویتاسیون

از آنجا که روش المان مرزی بر اساس فرضیه جریان پتانسیل بنا شده است و همچنین معادلات این روش فقط بر روی مرز جسم و کاویتی اعمال می‌شوند، این روش قادر به تعیین گرادیان فشار و یا سرعت در نواحی مختلف جریان نمی‌باشد. از طرفی ناحیه ورودی سوراخ به دلیل وجود انقباض ناگهانی و اصطکاک شدید داخل لوله دارای نوسانات بسیار بالایی می‌باشد، بنابراین در حین استفاده از روش المان مرزی تعیین قدرت چاه قرار گرفته بر روی سوراخ با مشکلاتی همراه است، چراکه در این روش به منظور شبیه‌سازی عبور جریان از سوراخ، سرعت جریان ورودی (همان قدرت چاه) به عنوان شرط مرزی معلوم در معادلات جایگذاری می‌شود، بنابراین باید مقدار آن قبل از حل مسأله معلوم باشد. بنابراین برای درک بهتر ماهیت جریان در ناحیه ورودی، پروفیل‌های سرعت بدست آمده از روش عددی به ازای قطرهای مختلف سوراخ در شکل 14 آورده شده‌اند. توجه شود در این شکل محور افقی که نشان دهنده تغییرات مکانی در جهت شعاع کاویتاتور می‌باشد، برای هر هندسه بر اساس قطر سوراخ همان هندسه بدون بعد شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود هر سه پروفیل نسبتاً تخت بوده که به دلیل مغشوش بودن جریان به خصوص در ناحیه ورودی می‌باشد. همچنین سرعت در مرکز سوراخ در حدود 20 تا 30 درصد کمتر از سرعت جریان آزاد می‌باشد که این امر نیز به دلیل گرادیان بالای فشار در این منطقه است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای ناحیه ورودی می‌بایست از پروفیل سرعت مغشوش استفاده کرد. معادلات پروفیل سرعت برای نمونه‌های B, C, D و F به ترتیب به صورت می‌باشند، که در آنها y_r متغیر بدون بعد مکانی شعاع سوراخ و V_{ring} پروفیل سرعت بدون بعد عبوری از سوراخ می‌باشد. با توجه به اینکه معادلات مذکور نسبت به قطر سوراخ و سرعت جریان آزاد بدون بعد شده‌اند و همچنین با توجه به این که الگوی پروفیل سرعت برای تمام حالت به صورت تخت و یکسان می‌باشد، می‌توان از هر کدام از پروفیل‌های سرعت بیان شده در مجموعه‌ای از حالت‌های مختلف استفاده کرد. چرا که روش المان مرزی بیشتر تابع تعداد پنل‌ها و چگونگی ترکیب مؤلفه‌های جریان پتانسیلی است و اعمال تغییرات در سرعت ناحیه ورودی تأثیر چندانی بر ابعاد کاویتی ندارد.

$$\begin{aligned} V_{ring} &= -(4.2 \times 10^{-5})e^{9.5 y_r} + 0.65e^{-0.1 y_r} & \text{Case B} \\ V_{ring} &= -(5.4 \times 10^{-5})e^{9.5 y_r} + 0.73e^{0.018 y_r} & \text{Case C} \\ V_{ring} &= -(4.3 \times 10^{-6})e^{12.2 y_r} + 0.76e^{0.05 y_r} & \text{Case D} \end{aligned} \quad (18)$$

و قطر سوراخ ارائه می‌گردد. برای دستیابی به این هدف داده‌هایی مشابه شکل 16 برای این هندسه در اقطار مختلف سوراخ تولید می‌شوند، سپس معادله ای برای آنها نوشته می‌شود. باید توجه کرد که در این حالت برخلاف معادلات گذشته، یک متغیر وابسته (طول و یا قطر کاویتی) و دو متغیر مستقل (قطر سوراخ و عدد کاویتاسیون) وجود دارند، بنابراین بجای خط، صفحه ای بر آنها برازش می‌گردد.

معادلات (19) و (20) حداکثر طول و قطر کاویتی را برای هندسه مورد

نظر در گستره $0.018 < \sigma < 0.08$ و $0.1 < D_h < 0.9$ ارائه می‌دهند.

$$L_c = -1492 \sigma^2 D_h - 9.3 \times 10^5 \sigma^3 + 155 \sigma D_h + 1.6 \times 10^5 \sigma^2 - 5.35 D_h - 9548 \sigma + 224.5 \quad (19)$$

$$D_c = -40.9 \sigma^2 D_h - 2.08 \times 10^4 \sigma^3 + 5.119 \sigma D_h + 3797 \sigma^2 - 0.294 D_h - 254.3 \sigma + 9.73 \quad (20)$$

4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، با استفاده از روش‌های عددی و المان مرزی بر پایه پتانسیل، جریان همراه با کاویتاسیون به صورت سه بعدی بر روی پرتابه‌های کاربردی با کاویتاتور سوراخ‌دار شبیه‌سازی شده است. در روش عددی از رویکرد جریان

جدول 13 ابعاد کاویتی تشکیل شده بر روی پرتابه نسبت به قطرهای مختلف سوراخ

حاصل از روش المان مرزی

Table 13 Dimensions of the formed cavity on the projectile with different diameter using BEM

$D_h = 0.88$	$D_h = 0.56$	$D_h = 0.2$	$D_h = 0.0$	قطر سوراخ
12.5	13.4	14.1	14.8	L_c
3	3.08	3.16	3.3	D_c

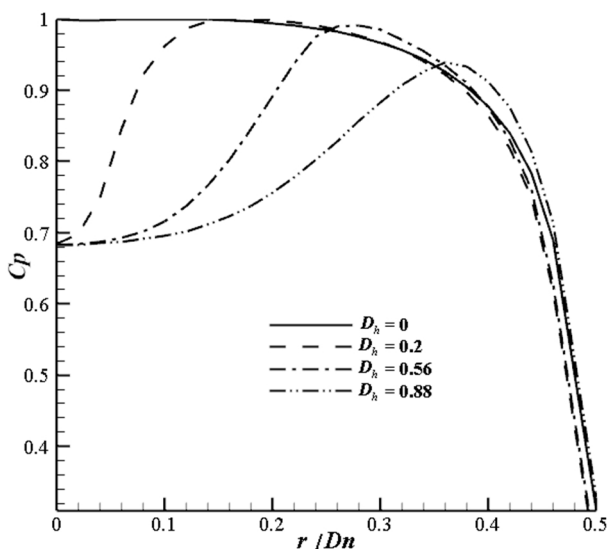


Fig. 18 Pressure coefficient obtained by BEM on the cavitator with different diameters

شکل 18 ضریب فشار بر روی کاویتاتور سوراخ‌دار با اقطار مختلف حاصل از روش المان مرزی

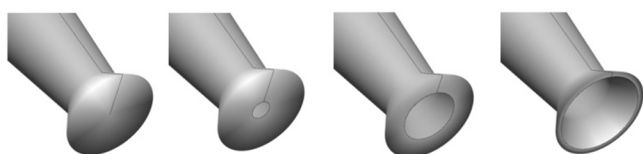


Fig. 19 Different holes created on the cavitator

شکل 19 سوراخ‌های مختلف ایجاد شده بر روی کاویتاتور

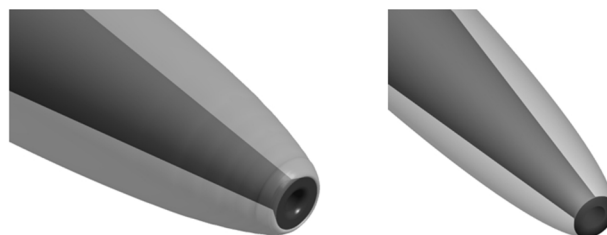


Fig. 15 The formed cavity around the nose by theoretical and numerical methods

شکل 15 کاویتی تشکیل شده اطراف دماغه به وسیله روش‌های تئوری و عددی

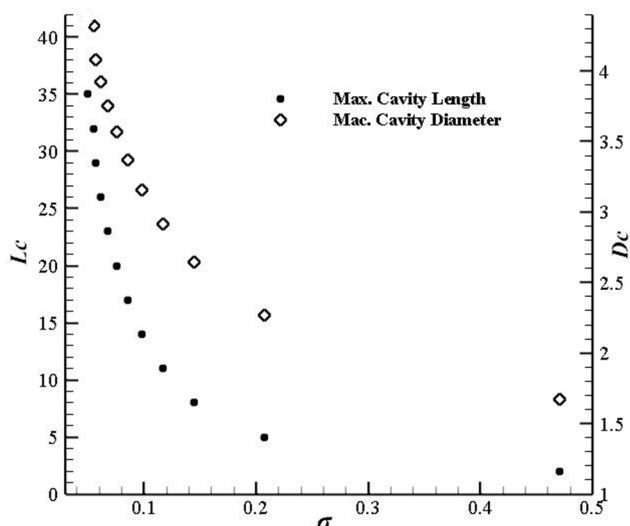


Fig. 16 Dimensions of the formed cavity on the projectile with ringed cavitator with diameter of 0.4 using BEM

شکل 16 ابعاد کاویتی تشکیل شده بر روی پرتابه با کاویتاتور سوراخ‌دار به قطر 0.4 به روش المان مرزی

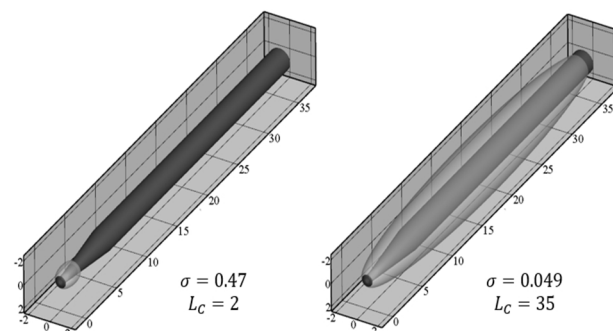


Fig. 17 Geometry of the formed cavity on the projectile with ringed cavitator (nondimensional hole diameter 0.4) using BEM

شکل 17 هندسه کاویتی تشکیل شده بر روی پرتابه با کاویتاتور سوراخ‌دار (قطر بدون بعد سوراخ 0.4) با استفاده از روش المان مرزی

روش المان مرزی در همگرایی و تعیین ابعاد کاویتی می‌توان با استفاده از این روش در مدت زمان کوتاهی معادله‌ای برای ابعاد کاویتی بر روی هندسه‌های مختلف با کاویتاتور سوراخ‌دار نسبت به قطر سوراخ و عدد کاویتاسیون ارائه کرد. با استفاده از این معادله محققان می‌توانند به راحتی با جایگذاری عدد کاویتاسیون و قطر سوراخ مورد نظر ابعاد کاویتی را محاسبه کنند. با توجه به اینکه هندسه استوانه سرخت، یکی از پرکاربردترین اشکال پایه در زمینه بررسی کاویتاسیون می‌باشد، در ادامه روابطی برای تعیین حداکثر طول و ضخامت بدون بعد کاویتی تشکیل شده بر روی آن نسبت به عدد کاویتاسیون

- cavitation dynamics, *Fifth International Conference on Multiphase Flow*, Yokohama, Japan, June 1-4, 2004.
- [5] J. Bin, L. Xian-Wu, Z. Yao, R. Hong-Juan, X. Hong-Yuan, W. Yu-Lin, A three-component model suitable for natural and ventilated cavitation, *Chinese Physics Letters*, Vol. 27, No. 9, pp. 96-101, 2010.
 - [6] S. Y. Konstantinov, D. V. Tselishev, V. A. Tselishev, Numerical cavitation model for simulation of mass flow stabilization effect in ANSYS CFX, *Modern Applied Science*, Vol. 9, No. 4, pp. 21-35, 2014.
 - [7] E. Roohi, M. Pendar, A. Rahimi, Simulation of three-dimensional cavitation behind a disk using various turbulence and mass transfer models, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 40, No. 1, pp. 542-564, 2016.
 - [8] M. Pendar, A. Roohi, Investigation of cavitation around 3D hemispherical head-form body and conical cavitators using different turbulence and cavitation models, *Ocean Engineering*, Vol. 112, NO. 51, pp. 287-306, 2016.
 - [9] Z. Jiang, M. Xiang, M. Lin, W. Zhang, S. Zhang, Research on hydrodynamic properties of annular cavitator with water injection, *Polish Maritime Research*, Vol. 19, No. 4, pp. 11-15, 2012.
 - [10] J. S. Uhlman, The surface singularity method applied to partially cavitating hydrofoils, *Journal of Ship Research*, Vol. 10, No. 4, pp. 40-55, 1987.
 - [11] J. S. Uhlman, The surface singularity or boundary integral method applied to supercavitating hydrofoils, *Journal of Ship Research*, Vol. 33, No. 1, pp. 16-20, 1989.
 - [12] S. Kinnaas and N. Fine, Non-linear analysis of the flow around partially or super-cavitating hydrofoils by a potential based panel method, *Proceeding of Boundary Integral Methods*, Rome, Italy, October 15-19, 1990.
 - [13] N. E. Fine and S. Kinnaas, A boundary element method for the analysis of the flow around 3-D cavitating hydrofoils, *Journal of ship research*, Vol. 37, No. 3, pp. 213-224, 1993.
 - [14] S. A. Kinnaas and N. E. Fine, A numerical nonlinear analysis of the flow around two- and three-dimensional partially cavitating hydrofoils, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 254, No. 3, pp. 151-181, 1993.
 - [15] A. Varghese, J. Uhlman, and I. Kirschner, High-speed bodies in cavitating axisymmetric flow, *Fifth International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan, November 1-4, 2003.
 - [16] I. Rashidi, H. Moin, M. Passandideh Fard, M. Pasandideh Fard, Numerical simulation of partial cavitation over axisymmetric bodies: VOF method vs. potential flow theory, *Journal of Aerospace Science and Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 23-33, 2008.
 - [17] M. Norouzi, M. Javareshkian, M. Passandideh Fard, simulation of partial cavitation around projectiles with Circular and elliptical sections using boundary element method, *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of ISME*, Vol. 17, No. 1, pp. 40-67, 2016. (in Persian فارسی)
 - [18] A. P. Keller, *Cavitation Scale Effects: A representation of its visual appearance and empirically found relations*, NASA, No. 19980020561, 1998.
 - [19] K. R. Laberteaux, S. L. Ceccio, Partial cavity flows. Part 1. Cavities forming on models without spanwise variation, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 431, No. 5, pp. 1-41, 2001.
 - [20] J. S. Uhlman, A note on the development of a nonlinear axisymmetric reentrant jet cavitation model, *Journal of Ship Research*, Vol. 50, No. 4, pp. 259-267, 2006.
 - [21] M. L. Billet, D. Weir, The effect of gas diffusion on the flow coefficient for a ventilated cavity, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 97, No. 4, pp. 501-505, 1975.
 - [22] H. Rouse, J. S. McNown, Cavitation and pressure distribution: Head forms at zero angle of yaw, *Studies in Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 501-509, 1948.
 - [23] R. W. Fox, A. T. McDonald, P. J. Pritchard, *Introduction to Fluid Mechanics*, Sixth Edition, pp. 343, New York: Wiley, 2003.

تعدادی همگن استفاده گردید و با بکارگیری 8 هندسه مختلف، مطالعه کاملی بر روی خواص هیدرودینامیک کاویتاتور سوراخ‌دار انجام گرفت. در روش المان مرزی با توزیع دوگان روی سطح جسم و کاویته و توزیع چشمه روی سطح کاویته شرایط برای استفاده از تئوری گرین در حل جریان‌های پتانسیل فراهم گشت. همچنین جهت اضافه کردن اثرات سوراخ تعدادی چشمه بر روی سطح کاویتاتور قرار داده شد. سپس با استفاده از شروط مرزی مناسب معادلات مربوط بسط داده شده و برای هندسه‌های مختلفی حل گردیدند. مهمترین نتایج این کار تحقیقاتی را می‌توان به صورت موردی بیان کرد: (1) مقایسه نتایج کاویتاسون مابین کاویتاتور سوراخ‌دار و بدون سوراخ نشان می‌دهد که الف) ابعاد کاویته برای حالت سوراخ‌دار، در تمام اعداد کاویتاسیون کمتر از حالت بدون سوراخ بوده و هرچه قطر سوراخ بیشتر باشد این اثر بیشتر می‌شود. ب) نیروی وارد بر پرتابه به ازای تمام هندسه‌های سوراخ بیشتر از حالت بدون سوراخ بوده و هرچه قطر سوراخ افزایش پیدا کند نیروی کل وارد شده بر پرتابه هم زیادتر می‌شود. (2) افزایش قطر سوراخ موجب کاهش فشار در ناحیه ورودی و متعاقبا افزایش متوسط سرعت می‌شود. بنابراین دبی عبوری از سوراخ با افزایش قطر تحت تأثیر دو پدیده همسو قرار گرفته و به سرعت رشد می‌کند. (3) ایجاد انحنا در ناحیه ورودی لوله انتقال هیچگونه اثر منفی، از لحاظ ابعاد کاویته و یا نیروی وارد بر پرتابه نداشته و موجب می‌شود الف) نیرو بر روی کاویتاتور بدون شکستگی و به صورت یکپارچه توزیع گردد. ب) از شدت نوسانات اغتشاشی در داخل لوله تا حد زیادی کاسته شود. (4) با استفاده از روش المان مرزی معادلاتی برای حداکثر طول و ضخامت کاویته بر اساس دو متغیر مستقل عدد کاویتاسیون و قطر بدون بعد سوراخ برای هندسه استوانه سرتخت ارائه شد.

5- مراجع

- [1] W. Guoyu, I. Senocak, W. Shyy, T. Ikohagi, S. Cao, Dynamics of attached turbulent cavitating flows, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 37, No. 6, pp. 551-581, 2001.
- [2] C. Merkle, J. Feng, P. Buelow, Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation, *3rd International symposium on cavitation*, Grenoble, France, April 7-10, 1998.
- [3] R. F. Kunz, D. Boger, D. Stinebring, T. Chyczewski, J. Lindau, H. Gibeling, A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction, *Computers & Fluids*, Vol. 29, No. 8, pp. 849-875, 2000.
- [4] P. J. Zwart, A. G. Gerber, T. Belamri, A two-phase flow model for predicting