

بررسی مدل‌های عددی پیش‌بینی پدیده کاویتاسیون در ونتوری‌ها با استفاده از نرم‌افزار ANSYS FLUENT

فرهود کلاته^{۱*}، سجاد کوزه‌گر غیاثی^۲، احسان امین‌وش^۳

- ۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
- ۲- کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
- ۳- دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- F.kalateh@gmail.com

۲- sajjadghiasi@yahoo.com

۳- Ehsan.aminvash1994@gmail.com

چکیده:

کاویتاسیون پدیده‌ای است که طی آن با حرکت جریان و کاهش فشار مایع به فشار بخار اشباع سیال در مناطق مستعد، حباب‌هایی از هوا در طی جریان می‌شود این حباب‌ها پس از رسیدن به مناطقی با فشار بالاتر شکافته شده و باعث آزاد شدن انرژی زیادی از جانب سیال می‌شود که با برخورد این مایکروجت‌ها به جداره‌ها باعث ایجاد لرزش و سروصدا و تأثیرات مخربی از جمله فرسایش سازه‌ای پروانه‌های کشتی‌ها، پره‌های پمپ‌ها و سربازها و همچنین کاهش راندمان و اختلال در عملکرد دستگاه‌های هیدرولیکی را در بر دارند. پژوهش حاضر به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS FLUENT مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش مدل‌های مختلف کاویتاسیون در هندسه‌های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته و باهم مقایسه گردیده‌اند. هم‌چنین نتایج نشان داد که تشکیل پدیده کاویتاسیون در گلویی ۱۰ سانتی‌متر نسبت به ۵ سانتی‌متر به میزان ۵/۸۸ درصد، در گلویی ۱۰ سانتی‌متری نسبت به بدون گلویی به میزان ۶۴/۷۱ درصد و در گلویی ۵ سانتی‌متری نسبت به بدون گلویی به میزان ۶۲/۵ درصد تغییر یافته است.

واژگان کلیدی:

کاویتاسیون، جریان دو فازی، دینامیک سیالات محاسباتی، فشار بخار اشباع.

* فرهود کلاته، دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تبریز.
ایمیل: F.kalateh@gmail.com (نویسنده مسئول مقاله)

Investigation of numerical models for predicting cavitation phenomenon in venturis using ANSYS FLUENT software

F. Kalateh ^۱, S. Kouzehgar Ghiasi ^۲, E. Aminvash ^۳

۱- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz Iran

۲- M.sc of Hydraulic structures, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

۳- Ph.D. Student of Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract:

Cavitation is a phenomenon during which, with the movement of the flow and the reduction of the liquid pressure to the saturated vapor pressure of the liquid in susceptible areas, bubbles of air are formed during the flow. The micro jet becomes full of energy with the fluid, which when these micro jets collide with the walls, causing vibration and noise and destructive effects such as structural erosion of ship propellers, pump blades and dams, as well as reducing efficiency. and malfunction of hydraulic devices. This research aims to study different simulation models of cavitation phenomenon and compare them in the way of cavitation cloud creation and expansion and the effect of this phenomenon on the flow. The present research has been analyzed numerically using ANSYS FLUENT software. In this research, an attempt has been made to study and compare different cavitation models in different geometries, and also, in one example, the results of the numerical model have been compared with the results of the laboratory model. Also, the results showed that the formation of cavitation phenomenon in ۱۰ cm throat compared to ۵ cm by ۵,۸۸%, in ۱۰ cm throat compared to without throat by ۶۴,۷۱% and in ۵ cm throat compared to without throat by ۵,۶۲% has changed.

Keywords: Cavitation, two-phase flow, computational fluid dynamics, saturated vapor pressure.

تشکیل حفره‌های توده‌ای و کاهش دامنه فشار مرتبط با دینامیک کاویتاسیون ناپایدار است. با حل مسئله فروپاشی یک حباب در یک توده بزرگ مایع، بنیان نظری را برای مطالعه کاویتاسیون ارائه داده و نشان داد که این حباب‌ها دارای توانایی قابل توجهی هستند و تاثیر به نسبت زیادی در تخریب سازه‌ها دارند. بنابراین کاویتاسیون به نقطه کانونی تحقیقات در توربو ماشین‌ها تبدیل شد. همچنین بعدها مشخص شده است که این توانایی شگفت‌انگیز حباب‌های کوچک می‌تواند در بسیاری از فناوری‌ها مفید واقع شود. مکانیزم همبستگی بین رفتار کاویتاسیون و نوسانات فشار در یک توربین هیدرولیکی به‌واسطه تحقیق یوو و همکاران [۳] مورد بررسی قرار گرفته است. ویژگی‌های کاویتاسیون گازی و بخاری و همچنین روش‌های بهینه‌سازی توسط سوو و همکاران [۴] ارائه گردیده است. دانشمندان اتحاد جماهیر شوروی پیشنهاد کردند که در حین کاویتاسیون، حباب‌ها در مجاورت سطح جامد به طور متقارن فرو نمی‌پاشند. در عوض، یک گودی بر روی حباب در نقطه ای مقابل سطح جامد ایجاد می‌شود و این جت مایع به یک مایع بصورت جت تبدیل می‌شود. این جت مایع به سطح جامد آسیب می‌رساند که از آن با نام ماکروجت یاد شده است [۵]. روش خطی‌سازی برای مسئله جریان در مورد یک پروفیل متقارن در زاویه حمل صفر درجه و عدد کاویتاسیون صفر توسط تولین [۶] اعمال گردیده است. از آن زمان به بعد بسیاری از محققان نظریه خطی را برای جریان در اطراف اجسام دلخواه با عددهای مختلف کاویتاسیون گسترش داده‌اند. با در نظر گرفتن یک سد و مخزن آن تاثیر کاویتاسیون هنگامی که سیستم تحت بار لرزه‌ای و انفجار قرار می‌گیرد را با جزئیات مورد بحث و بررسی قرار داده شده است [۷]. آن‌ها تمایز مابین کاویتاسیون ناشی از جریان سیال (هیپ‌دینامیکی) و کاویتاسیون در اثر انتشار موج الاستیک (آکوستیکی) را توضیح داده‌اند. در سال ۱۹۸۷ [۸] از جمله اولین کسانی بود که جریان کاویتاسیون را روی هیدروفیل‌های دو بعدی در نظر گرفت و با حل معادلات مربوط به انتقال حباب به تحقیق در رابطه با این پدیده پرداخت. اثر جریان هیدرولیکی، هندسه کانال و شکل سرریز را بر روی ضریب تخلیه سرریز لبه تیز توسط برقعی و همکاران [۹] مورد مطالعه قرار گرفته است. باقری و همکاران [۱۰] ترکیبی از سرریز لبه تیز مستطیلی را در آزمایشگاه مدل‌سازی کرده

کاویتاسیون فرآیندی است که طی آن مایع تحت بررسی تغییر فاز داده و حباب‌هایی در آن ایجاد می‌شود. این پدیده هنگامی رخ می‌دهد که فشار استاتیک آب در یک ناحیه از مقدار فشار بخار اشباع آب کمتر شود، این شرایط اغلب بعد از شروع بازشدگی در ونتوری‌ها، در پشت پمپ‌ها و قسمت بالایی هیدروفیل‌ها وجود دارد و این مکان‌ها مستعد وقوع کاویتاسیون می‌باشند. در این حالت حباب‌های بسیار ریزی در منطقه‌ای که فشار کمتر از فشاربخار اشباع است تشکیل می‌شوند. فرآیند ایجاد کاویتاسیون به‌گونه‌ای است که طی آن یک تنش کششی که ناشی از به هم خوردن نیرو-های بین مولکولی است بر اجزای سیال وارد شده و باعث بوجود آمدن گسستگی‌هایی در جریان می‌شود که این ناپیوستگی‌ها خود را بصورت حباب‌های بخار نشان می‌دهند. این حباب‌ها پس از رسیدن به مناطقی با فشار بالاتر شکافته‌شده و باعث آزاد شدن انرژی زیادی از طرف سیال شده و با شکافته‌شدن این حباب‌ها انرژی حاصل‌شده که مکرراً ایجاد می‌شود، باعث آسیب رسیدن به سازه‌ها می‌گردند. امروزه با پیشرفت و گسترش علوم نیاز به افزایش سرعت در دستگاه‌های هیدرولیکی امری ضروری بوده که خود این عمل احتمال رخداد کاویتاسیون را افزایش می‌دهد، همچنین نیاز به حفظ کارایی و نگهداری از این دستگاه‌ها اهمیت بسیار بالایی پیدا کرده است. از این رو نحوه وقوع و فرآیند تشکیل و فروپاشی و همچنین راه‌های مقابله با آثار مخرب این پدیده بسیار حائز اهمیت است. این تحقیق به منظور مطالعه و مقایسه انواع مدل‌های کاویتاسیون صورت گرفته و با مقایسه انواع این مدل‌ها به بررسی تفاوت‌ها، مزایا و معایب این مدل‌های مختلف پرداخته شده است تا با بررسی این موارد درک بیشتری از پدیده کاویتاسیون حاصل گردد.

اولین تحقیقات در مورد پدیده کاویتاسیون به پژوهش اوپلر [۱] برمی‌گردد. او در حین بحث بر روی توربین‌های هیپ‌درولیک، احتمال بروز مشکل در اثر کاویتاسیون را تشخیص داد و این نقطه آغازی مطالعات بروی کاویتاسیون بود. کنترل کاویتاسیون جزئی ناپایدار در مهندسی دریایی و سیستم‌های هیدرولیکی توسط کادیوار و همکاران [۲] انجام گرفته است. نتایج نشان داد که تکنیک کنترل مورد بررسی کاملاً موثر بوده و قادر به جلوگیری از

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- معادلات حاکم بر مسئله

معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان سیال که به معادلات ناویر استوکس معروف است، این معادلات در قالب مدل ریاضی بر مبنای پایستگی تکانه و بقای جرم بوده و برای سیالات نیوتنی بی‌ان می‌شود. این معادلات بصورت گسترده برای بررسی تغییرات خواصی همچون سرعت، فشار، دما، چگالی و لزجت جریان در طول فعل و انفعالات دینامیکی و یا حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل و فرم کلی این معادله بصورت زیر است. این معادلات در حالت کلی بر اساس اصول حفظ جرم، حرکت و انرژی بیان شده اند.

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (1)$$

که در آن ρ چگالی سیال، u ، v و w ترم‌های عمومی سرعت، P فشار در سیال، t زمان، τ تنسور تنش انحرافی است که مرتبه دوم دارد، g شتاب گرانش، ∇ گرادیان و V عملگر سرعت می‌باشد. اصل بقای جرم (معادله پیوستگی) بصورت کلی زیر بیان می‌شود:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \vec{V}) = 0 \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (3)$$

با فرض سیال غیرقابل معادله پیوستگی به شکل زیر ساده می‌شود، که نشان‌دهنده یک فرایند حالت پایدار است:

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \Rightarrow \nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

۲-۲- انواع مدل‌های کاویتاسیون

و به مطالعه پدیده کاویتاسیون پرداختند. با مروری بر تحقیقات و مقالات قبلی ملاحظه می‌شود که تحلیل و بررسی درمورد پدیده کاویتاسیون و عوامل موثر بر آن بسیار مورد توجه پژوهشگران بوده است. دانشفراز و جیحونی [۱۱] به بررسی عددی پارامترهای هیدرولیکی و عدد کاویتاسیون سرریز سد شهید مدنی پرداختند. نتایج نشان داد که براساس توزیع‌های سرعت و فشار به‌دست آمده، کاویتاسیون در سرریز سد مذکور برای دبی‌های بررسی‌شده در تحقیق حاضر رخ نخواهد داد. هم‌چنین دانشفراز و ذوقی [۱۲] پدیده کاویتاسیون در سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه را به‌صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D مورد بررسی قرار دادند. کادیوار و همکاران [۱۳] با کنترل کاویتاسیون‌های ناپایدار در مهندسی سازه‌های دریایی و سیستم‌های هیدرولیکی نشان دادند که تکنیک‌های مورد استفاده کاملاً موثر بوده و قادر به جلوگیری از تشکیل کاویتاسیون و کاهش دامنه فشار مرتبط با دینامیک کاویتاسیون‌های ناپایدار است.

در پی وقوع پدیده کاویتاسیون، یک نوع آلودگی صوتی و سر و صدا و هم‌چنین فرسایش و خوردگی زیادی در سازه‌ها و جداره‌های یک سیستم بوجود می‌آید که کنترل و از بین بردن و یا به حد اقل رساندن این آثار مخرب و هم‌چنین حفظ عملکرد و افزایش راندمان سازه‌های هیدرولیکی امری بسیار ضروری است. از این نظر تحلیل و بررسی چرخه تشکیل و فروپاشی حباب‌هایی که در طی پدیده کاویتاسیون بوجود می‌آیند از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. این پژوهش به منظور مطالعه مدل‌های مختلف شبیه‌سازی پدیده کاویتاسیون و مقایسه آنها در نحوه ایجاد و گسترش ابر کاویتاسیونی و تأثیر این پدیده بر جریان می‌باشد. در این تحقیق پس از تعریف پدیده کاویتاسیون و بیان معادلات اساسی حاکم بر آن به مدل‌سازی و نتوری که قبلاً در یک آزمایش عملی در سال ۲۰۱۸ مورد مطالعه قرار گرفته پرداخته شده است و نتایج با نتایج مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین با تغییر هندسه و افزودن گلویی به ونتوری و تغییر در درجه بازشدگی و ونتوری هندسه‌های جدید مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است و نمودارهای طول ناحیه کاویتاسیون و ضریب افت فشار با عدد رینولدز ارائه شده است.

شبهه‌سازی جریان کاویتاسیون مستلزم تشکیل جریان‌های دوفازی می‌باشد. روش‌های گوناگونی برای مطالعه و بررسی جریان‌های چند فازی وجود دارد که تعدادی از این روش‌ها در زیر بصورت مختصر بیان شده است.

۱-۲-۲- مدل Singhal و همکاران

این مدل کاویتاسیون بر اساس "مدل کاویتاسیون کامل" است که توسط سینقال و همکاران [۱۴] تهیه شده است، این مدل کلیه اثرات مرتبه اول (به عنوان مثال، تغییر فاز، دینامیک حباب، نوسانات فشار آشفته و گازهای غیر قابل چگالش) را شامل می‌شود. این مدل این قابلیت را دارد که برای جابجایی جریان‌های چند فاز (N فاز)، اثرات سرعت لغزش بین فازهای مایع و گاز، اثرات حرارتی و قابلیت فشردگی هر دو فاز مایع و گاز را در نظر بگیرد. این مدل کاویتاسیون را می‌توان با مدل چند فازی مخلوط^۲، بایا بدون سرعت لغزش استفاده کرد. با این حال، توصیه شده است که برای کاویتاسیون با استفاده از مدل مخلوط بدون سرعت لغزش حل شود. در صورتی اگر شرایط نشان دهد که لغزش قابل توجهی بین لایه‌های سیال وجود دارد، سرعت لغزش را می‌توان در نظر گرفت. برای استخراج عبارتی از نرخ تغییر فاز خالص، از معادلات پیوستگی دو فازی زیر استفاده می‌کنند [۱۴]:

فاز مایع

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\alpha)a_l] + \nabla \cdot [(1-\alpha)a_l \vec{V}] = -R \quad (5)$$

فاز بخار

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha a_v) + \nabla \cdot (\alpha a_v \vec{V}) = R \quad (6)$$

مخلوط

$$\frac{\partial}{\partial t}(a) + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (7)$$

که در آن l نشان دهنده فاز مایع و a تراکم مخلوط می‌باشد.

با ترکیب سه معادله بالا (۵، ۶ و ۷) رابطه زیر برای تراکم مخلوط و کسر حجم بخار (α) تعریف می‌شود.

$$\frac{Da}{Dt} = -(a_l - a_v) \frac{D\alpha}{Dt} \quad (8)$$

رابطه کسر حجم بخار (α) را می‌توان با عدد تراکم بخار (n) و شعاع حباب (R) مانند زیر نوشت.

$$\alpha = n \times \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) \quad (9)$$

با جایگزینی معادله (۹) در معادله (۸) رابطه زیر بدست خواهد آمد.

$$\frac{Da}{Dt} = -(a_l - a_v) (n4\pi)^{\frac{1}{3}} (3\alpha)^{\frac{2}{3}} \frac{DR}{Dt} \quad (10)$$

۲-۲-۲- مدل Zwart و همکاران

در این مدل فرض به این صورت می‌باشد که همه حباب‌های یک سیستم اندازه یکسانی دارند [۱۵]، در این مدل پیشنهاد شده است که کل میزان انتقال جرم بین فازها در واحد حجم (R) با استفاده از اعداد چگالی حباب (n) (که از رابطه (۱۱) بدست می‌آید) و میزان تغییر جرم یک حباب محاسبه شود:

$$R = n \times \left(4\pi R^2 \rho_v \frac{DR}{Dt} \right) \quad (11)$$

برای استفاده از آن در روند فروپاشی حباب (تراکم)، از فرمول بندی (۱۲) استفاده می‌شود:

$$R_e = F \frac{3\alpha p_v}{R} \sqrt{\frac{2|P_B - P|}{3\rho_l}} \text{sign}(P_B - P) \quad (12)$$

که در آن (F) ضریب کالیبراسیون تجربی است. اگرچه معادله (۱۲) در اصل از تبخیر گرفته شده است، اما فقط برای کاویتاسیون کارایی خوبی دارد. اما اگر در تبخیر استفاده شود از نظر فیزیکی نادرست و از نظر عددی ناپایدار است، دلیل اساسی این است که یکی از مفروضات اصلی این است که حباب کاویتاسیون با یکدیگر تعامل

^۲ mixture

ندارد. این مدل پیشنهاد جایگزینی (α_v) با $\alpha_{nuc}(1-\alpha_v)$ را ارائه نموده است.

اگر $p \leq p_v$

$$R_e = F_{vap} \frac{3\alpha_{nuc}(1-\alpha_v)P_v}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P-P_v}{\rho_l}} \quad (13)$$

اگر $p > p_v$

$$R_e = F_{cond} \frac{3\alpha_v P_v}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P-P_v}{\rho_l}} \quad (14)$$

که در آن:

$R = 10^{-6}$ m شعاع حباب، α_{nuc} عملگر کسر حجم در هسته، $F_{vap} = 50$ ضریب تبخیر

۳-۲-۳ مدل Schnerr and Sauer

این مدل از روشی کاملاً مشابه با مدل [۱۴] برای استخراج معادلات حاکم بر جرم و بخار استفاده می‌کند. معادله کسر حجم بخار بصورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \vec{V}) = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \frac{D\alpha}{dt} \quad (15)$$

در این معادله، اصطلاح منبع جرم خالص به شرح زیر است:

$$R = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \frac{d\alpha}{dt} \quad (16)$$

برخلاف مدل [۱۴] و [۱۵]، در مدل [۱۶] از عبارت (رابطه ۱۹) برای محاسبه کسر حجم بخار و تعداد حباب در هر حجم مایع استفاده می‌کند:

$$\alpha = \frac{n_b \frac{4}{3} \pi R^3}{1 + n_b \frac{4}{3} \pi R^3} \quad (17)$$

در این مدل به دنبال رویکرد مشابه سینگال و همکاران، معادلات زیر را بدست آورده شده است:

$$R_B = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1-\alpha) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P_v - P)}{\rho_l}} \quad (18)$$

$$R = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{3}{4\pi n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (19)$$

که در آن‌ها R_B میزان انتقال جرم و R شعاع حباب است. اگر فرض کنیم هیچ حبابی ایجاد یا از بین نرود، تراکم عدد حباب ثابت خواهد بود. شرایط اولیه برای کسر حجمی هسته و شعاع حباب برای تعداد حباب (n) از معادله (۱۷) بدست خواهد آمد. همانند دو مدل دیگر، از معادله (۱۸) نیز برای مدل سازی روند تراکم استفاده می‌شود. فرم نهایی معادلات در این مدل به شرح زیر است:

اگر $p \leq p_v$

$$R_e = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1-\alpha) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P_v - P)}{\rho_l}} \quad (20)$$

اگر $p > p_v$

$$R_e = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1-\alpha) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P - P_v)}{\rho_l}} \quad (21)$$

۳-۲-۳ نرم افزار مورد استفاده در تحقیق حاضر

برای شبیه سازی تحقیق حاضر از نرم افزار تجاری ANSYS FLUENT بهره گرفته شده است. نرم افزار FLUENT، یک نرم افزار مهندسی به کمک رایانه CAE در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای مدل کردن جریان سیال، انتقال گرما و جرم، واکنش های شیمیایی و سایر پدیده های مرتبط در هندسه های پیچیده می باشد. در این مرحله توزیع تنش، تغییر مکان و در مواردی دما در حین عملکرد قطعه و مجموعه بدست می آید. در این تحقیق از المان های چهارضلعی استفاده شده است. المان چهارضلعی به شکل مسطحی گفته می شود که از اتصال چهار نقطه غیرهم خط در صفحه به وجود می آید. المان چهارضلعی، دارای چهار ضلع و چهار زاویه است و مجموع زوایای داخلی آن، ۳۶۰ درجه است.

در این پژوهش آب به صورت سیال نیوتونی در نظر گرفته شده است که با استفاده از معادله ی حالت $U_s = U_p$ مدل سازی شده است. چگالی آب ۹۹۸/۲ کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته ۰/۰۰۱۰۰۳

کیلوگرم بر متر ثانیه و همچنین فشار بخار اشباع سیال ۳/۵۴ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است.

۲-۴-۲ انواع مدل‌های آشفتگی

مدل آشفتگی شامل یک روند محاسباتی می‌باشد که در آن بتوان معادلات حرکت جریان را حل نمود، آشفتگی معمولاً در مسائلی که جریان طی آن از عدد رینولدز بحرانی عبور می‌کند کاربرد دارد و در سایر مسائل مهندسی که جریان آشفته نمی‌شود تأثیری ندارد و بکار برده نمی‌شود، اما در پدیده کاویتاسیون چون جریان از محدوده عدد رینولدز بحرانی عبور می‌کند مدل آشفتگی حتماً باید مد نظر باشد. انواع مدل‌های آشفتگی عبارتند از مدل‌های آشفتگی صفر معادله‌ای که شامل مدل تنش جبری و مدل طول مخلوط می‌باشد که امروزه چندان مورد توجه محققان قرار ندارند، نوع دوم از مدل‌ها مدل‌های دو معادله‌ای بوده که شامل دو مدل $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ است.

۲-۴-۱ مدل $k-\varepsilon$

در این مدل از دو معادله انتقال برای حل مسئله استفاده می‌شود یکی برای انرژی جنبشی k و دیگری برای نرخ استهلاک انرژی که هر دوی این معادلات بصورت همزمان حل می‌شوند. این مدل یک مدل نیمه تجربی بوده و بصورت زیر تعریف می‌شود [۱۶-۱۴].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (22)$$

این معادله مربوط به اثرات انرژی جنبشی می‌باشد. که در آن k ضریب انرژی جنبشی، μ لزجت سینماتیکی، E انرژی و u ترم سرعت می‌باشد.

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (23)$$

و معادله (۲۱) مربوط به نرخ هدر رفت انرژی می‌باشد در این معادلات

ضرایبی وجود دارند که بصورت تجربی بدست می‌آیند.

۲-۴-۲ مدل $k-\omega$

این مدل پر کاربردترین مدل بعد از مدل $k-\varepsilon$ بحساب می‌آید، که شامل دو معادله می‌باشد این مدل آشفتگی بسیار مشابه مدل قبلی است و از تعریف مشابهی برای K استفاده می‌کند اما در تعریف مولفه دوم برای توصیف رفتار آشفتگی از رابطه (۲۴) پیروی می‌کند:

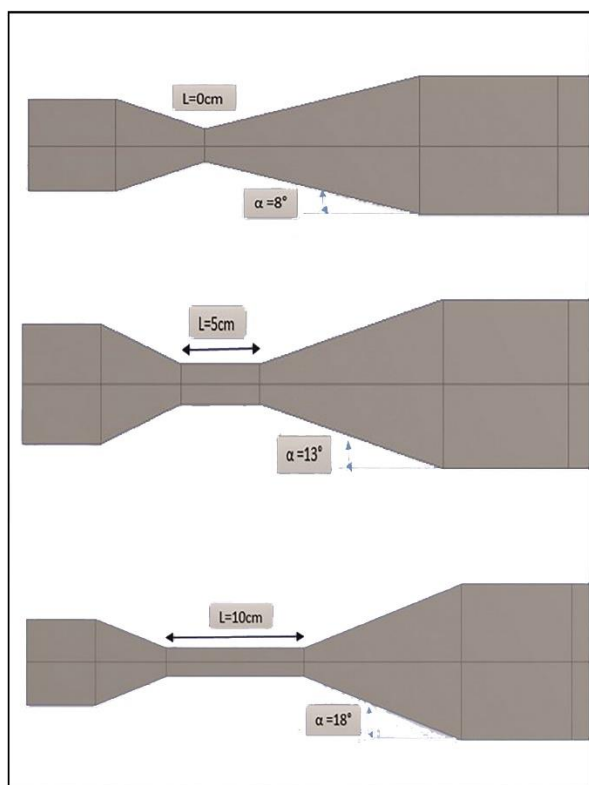
$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_j)}{\partial x_j} = \frac{\alpha \omega}{k} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\rho \sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (24)$$

۲-۵ مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی

در این پژوهش رفتار و نحوه وقوع پدیده کاویتاسیون در یک ونتوری با شرایط هندسی متفاوت و در اثر حرکت جریان با سرعت‌های مختلف و با اعداد رینولدز متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. این ونتوری‌ها در نرم‌افزار ANSYS FLUENT، مدل‌سازی شده و به تحلیل و بررسی پارامترهای مختلف و تأثیر گذار در هندسه‌های مختلف از جمله ایجاد گلویی با طول‌های مختلف و همچنین زاویه‌های بازشدگی متفاوت پرداخته شده است. در این پژوهش شش مدل هندسه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است که از نظر هندسه و همچنین زاویه بازشدگی با هم تفاوت دارند. به‌طور کلی موارد زیر مورد بررسی قرار گرفته است: طول ناحیه قرار گرفته در محدوده کاویتاسیون عدد رینولدز در ناحیه گلویی ونتوری، بررسی تأثیر تغییر زاویه خروجی ونتوری در شرایط مسئله و بررسی تأثیر افزودن گلویی به ونتوری در رفتار پدیده کاویتاسیون. در این پژوهش برای صحت‌سنجی از نتایج یک آزمایش تجربی تحت عنوان (دینامیک کاویتاسیون جزئی در یک ونتوری همگرا-واگرا) که در مجله بین‌المللی جریان چند فاز که توسط الزویر^۳ در سال ۲۰۱۸ منتشر شده است استفاده شده است.

جدول ۱: اطلاعات هندسه و نتوری های مدل سازی شده

Vintory No.	α (Degree)	L (cm)
۱	۸	۰
۲	۱۳	۰
۳	۱۸	۰
۴	۸	۵
۵	۱۳	۵
۶	۱۸	۵
۷	۸	۱۰
۸	۱۳	۱۰
۹	۱۸	۱۰



شکل ۲: ونتوری بدون گلوبی و با گلوبی های ۵ و ۱۰ سانتی متر با زوایای بازشدگی متفاوت

شش نوع ونتوری در این تحلیل مدنظر قرار گرفته شده است که جزئیات هندسی آن ها در شکل (۲) دیده می شود، با تغییر زاویه α و طول L هندسه های مدل تغییر می کند. در این پژوهش برای صحت سنجی از نتایج یک آزمایش تجربی تحت عنوان (دینامیک

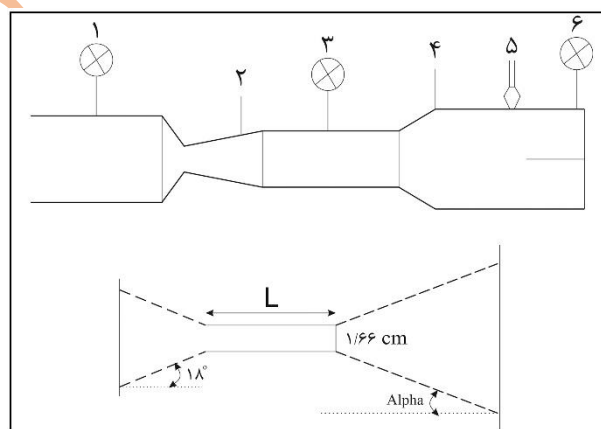
در طول این پژوهش و مدل سازی ها شرایط جریان توسط معیاری با نام عدد کاویتاسیون (σ) بیان می شود که کمیتی بی بعد است که بیانگر تشکیل حباب های هوا در جریان می باشد که در زیر بیان شده است.

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2} \rho u_0^2} \quad (25)$$

که در این معادله P مقدار فشار در پایین دست جریان (مقطع ۶ در شکل ۱)، P_v فشار بخار اشباع سیال، ρ دانسیته یا چگالی سیال مورد استفاده (آب) و u_0 سرعت جریان در گلوبی ونتوری می باشد. همچنین در این مدل سازی ها از ضریب دیگری با نام ضریب افت فشار K که با استفاده از معادله (۲۶) بدست می آید، استفاده شده است.

$$K = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho u_0^2} \quad (26)$$

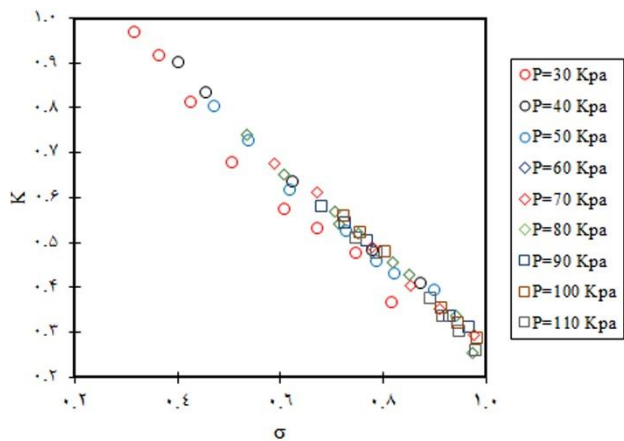
در معادله (۲۶) ΔP اختلاف فشار (بین مقطع ۳ و ۱ در شکل ۱) می باشد.



شکل ۱: نمای ونتوری آزمایشگاهی

مشخصات و جزئیات هندسه ونتوری در جدول (۱) و همچنین شکل (۲) ارائه شده است.

بصورتی که تقریباً داده‌ها در این دو نمودار بر هم منطبق و متناظر می‌باشند.

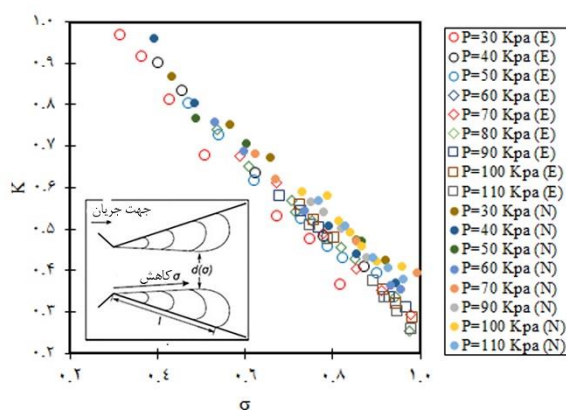


شکل ۴: نمودار σ با l/d در مدل آزمایشگاهی

در مقایسه این نمودارها چنین نتیجه می‌شود که پیوستگی و تطابق نسبتاً مناسبی در نمودار σ با l/d وجود دارد و نیز تشابه و ارتباط و انطباق نسبتاً خوبی بین داده‌ها ملاحظه می‌شود.

همچنین تصاویر (شکل ۵) حین وقوع کاویتاسیون در بازه‌های زمانی مختلف در آزمایش تجربی در زیر آورده شده است و با تصاویر مدل عددی در همان بازه زمانی مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که از تصاویر نیز مشخص است تشابه خوبی بین تصاویر بدست آمده از مدل آزمایشگاهی و کانتورهای فشار مدل عددی در بازه‌های زمانی مختلف وجود دارد.

کاویتاسیون جزئی در یک ونتوری همگرا-واگرا^۴ که در سال ۲۰۱۸ منتشر شده است استفاده شده است. مدل آشفتگی در نظر گرفته شده مدل $K-\epsilon$ بصورت استاندارد می‌باشد همچنین از خواص آب در دمای ۲۰ درجه سلسیوس و چگالی $981 kg/m^3$ و همچنین مقدار فشار بخار اشباع برابر با $3.54 Kpa$ در نظر گرفته شده است. با اعمال فشارهای متفاوت در خروجی (مقطع ۶ - شکل ۱) و اعمال سرعت‌های مختلف در ورودی سیستم (مقطع ۱ - شکل ۱) مسئله را حل نموده و بصورت تناوبی این مراحل را تکرار نمودیم تا ما در هر مرحله مقدار فشار در ورودی سیستم و بعد از ونتوری (به ترتیب در مقاطع ۱ - ۳ و ۱ - شکل ۱) و سرعت در گلولی ونتوری و هم‌چنین طول ناحیه تشکیل کاویتاسین اندازه‌گیری و ثبت شده است و نمودارهای $K-\sigma$ و $l/d-\sigma$ آورده شده است که معیار خوبی برای صحت سنجی و مقایسه نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی با آزمایش تجربی می‌باشد که در زیر، هم نمودارهای مربوط به مدل آزمایش تجربی (شکل ۳) و هم مدل عددی (شکل ۴) بصورت یکجا آورده شده است. K ضریب افت فشار، σ عدد کاویتاسیون، l طول ناحیه وقوع کاویتاسیون و d قطر گلولی و ونتوری می‌باشد می‌باشد.



شکل ۳: نمودار $K-\sigma$ در مدل آزمایشگاهی و عددی

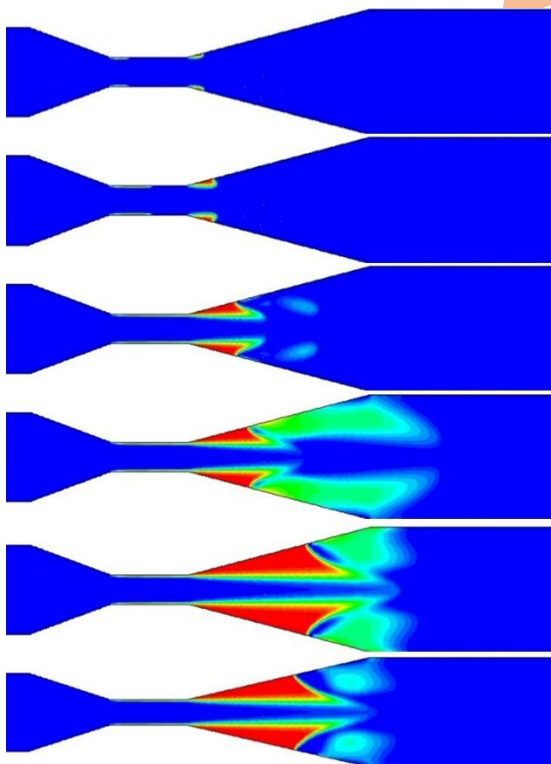
در مقایسه نمودار موجود در شکل (۳) چنان که به نظر می‌رسد پیوستگی و تطابق نسبتاً مناسبی بین نمودار عدد کاویتاسیون (σ) با ضریب افت فشار K در مدل آزمایشگاهی و عددی وجود دارد

^۴ Dynamics of partial cavitation in an axisymmetric converging-diverging nozzle

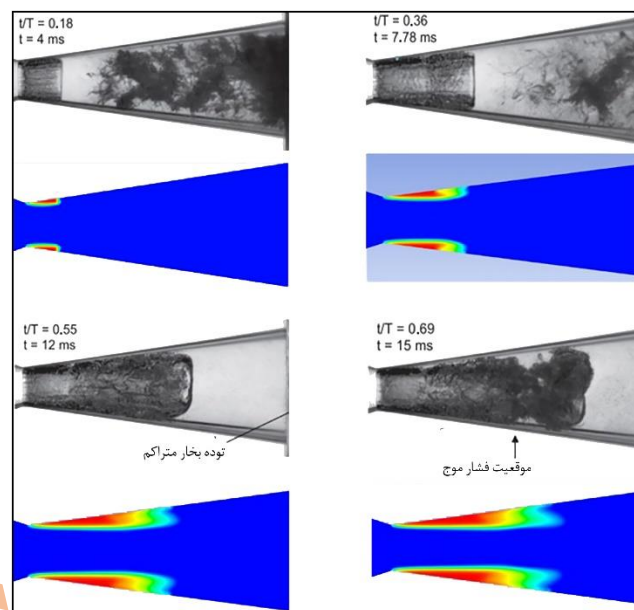
همان‌طور که از جدول ۲ مشخص است، در اندازه‌ی مش‌های ۰/۹۱۶ و ۰/۷۳۵ میلی‌متری نتایج همگرا شده و بر هم منطبق می‌شوند و سرعت و طول ناحیه کاویتاسیون دیگر تغییر پیدا نمی‌کند، از این‌رو در تمام مدل‌سازی‌ها از اندازه‌ی مش ۰/۹۱۶ میلی‌متری استفاده شده است تا اندازه‌ی مش تأثیری در نتایج نداشته باشند.

۲-۳ - پروفیل طولی پدیده کاویتاسیون

همان‌طور که از شکل (۶) مشخص است پدیده کاویتاسیون پس از ایجاد جریان در ونتوری و افزایش سرعت جریان ابتدا در قسمت شروع واگرایی ونتوری که فشار بطور ناگهانی کاهش پیدا می‌کند رخ داده و از این نقطه شروع به رشد می‌نماید البته این پدیده بسیار سریع رخ می‌دهد و و بعد از افزایش فشار رفته رفته عقب نشینی می‌نماید که این مسئله در دو شکل آخر بطور واضح مشخص است. فرآیند نشان داده شده در شکل (۶) در بازه زمانی صفر تا ۳۵ میلی‌ثانیه را نمایش می‌دهد.



شکل ۶: وقوع پدیده کاویتاسیون در یک بازه زمانی مشخص



شکل ۵: کانتورهای فشار تشکیل بخار و تصاویر آزمایشگاهی از کاویتاسیون در بازه‌های زمانی مشخص

۳- نتایج و بحث

۳-۱ - آنالیز حساسیت شبکه‌بندی

به منظور بررسی استقلال نتایج از اندازه‌ی شبکه یک نمونه از مدل را با اندازه‌ی مش‌های متفاوت شبکه‌بندی نموده و به حل مسئله در شرایط یکسان پرداخته و سپس نتایج حاصل را مورد مقایسه قرار دادیم. ابتدا از مش بزرگ شروع کرده و سپس اندازه‌ی مش تا زمانی که نتایج همگرا شوند کوچک شده است که نتایج آنالیز حساسیت مش‌بندی در جدول (۲) به تفصیل ارائه شده است.

جدول ۲: آنالیز حساسیت مش‌بندی

اندازه مش (mm)	طول کاویتاسیون (cm)	سرعت (m/s)	فشار (kpa)	سرعت گلوبی (m/s)
۴/۹۱۶	۷/۹۱			۱۹/۳۹۶۱
۲/۹۱۶	۷/۷۹			۱۹/۳۷۳۴
۱/۹۱۶	۷/۶	۷	۵۰	۱۹/۳۷۱۱
۰/۹۱۶	۷/۵۵			۱۹/۳۶۹۴
۰/۷۳۵	۷/۵۴۹			۱۹/۳۶۹۴

۳-۳-۲- بررسی نمودار های طول ناحیه کاویتاسیون با عدد رینولدز در گلویی

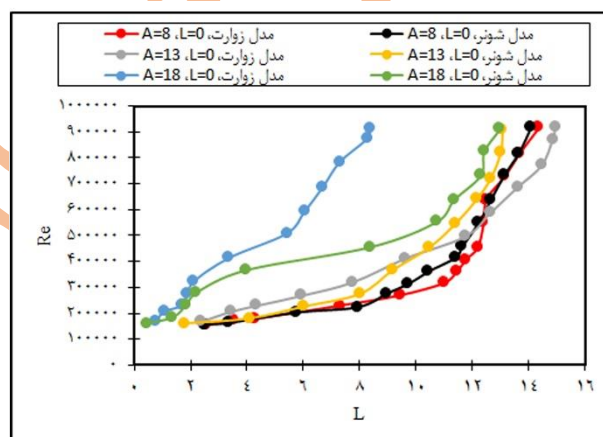
می باشد مشاهده می شود و پس آن با وجود اینکه روند و شکل منحنی هر دو مدل تقریباً مشابه می باشد اما در مدل زوارت کاهش طول ناحیه قرار گرفته در محدوده کاویتاسیون بسیار قابل توجه است بطوری که اختلاف حدود چهار سانتی متر در محدوده عدد رینولدز نهصد هزار در طول ناحیه کاویته شده دیده می شود.

۳-۳-۱- ونتوری بدون گلویی

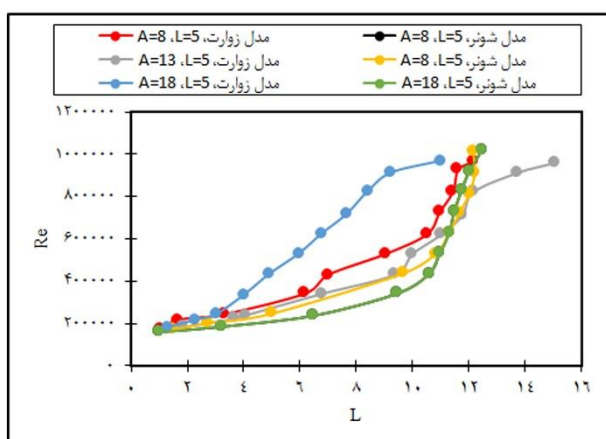
همانطور که از شکل (۷) در یافت می شود در مدل بدون گلویی و زاویه بازشدگی ۸ درجه بین نتایج دو مدل شونر و زوارت تفاوت زیادی دیده نمی شود بطوری که هر دو منحنی مدل زوارت و شونر بر هم منطبق هستند و تنها در محدوده که عدد رینولدز در گلویی بین ۳۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰ قرار می گیرد در مدل زوارت طول ناحیه قرار گرفته در محدوده کاویتاسیون مقدار اندکی بیشتر از مدل شونر می باشد.

۳-۳-۲- ونتوری با گلویی ۵ سانتی متری

با توجه در شکل (۸) مشخص است که در ونتوری با گلویی ۵ سانتی متری و با زاویه بازشدگی ۸ درجه روند هر دو منحنی مدل های زوارت و شونر تا زمانی که عدد رینولدز در گلویی در محدوده زیر ۳۵۰۰۰ تقریباً مشابه هم بوده و پس از افزایش عدد رینولدز تا مرز ۷۰۰۰۰ دو مدل نتایج متفاوتی را نشان می دهند بطوری که طول ناحیه کاویته شده در یک عدد رینولدز مشخص در مدل زوارت کوچکتر از مدل شونر می باشد، اما بعد از این محدوده دوباره دو مدل همگرا می شوند.



شکل ۷: نمودار عدد رینولدز با طول کاویتاسیون در مدل بدون گلویی و زوایای ۸، ۱۳ و ۱۸ درجه



شکل ۸: نمودار عدد رینولدز با طول کاویتاسیون در مدل با گلویی ۵ سانتی متری و زوایای ۸، ۱۳ و ۱۸ درجه

همانطور که از شکل (۸) دریافت می شود در مدل با گلویی ۵ سانتی متری و زاویه بازشدگی ۱۳ درجه بین نتایج دو مدل شونر و زوارت تفاوت زیادی دیده نمی شود و منحنی های هر دو مدل تقریباً بر هم منطبق هستند و تنها در محدوده ای که عدد رینولدز در گلویی بالاتر از ۸۰۰۰۰ قرار می گیرد در مدل زوارت طول ناحیه

با توجه به شکل (۷) مشخص است در ونتوری بدون گلویی و با زاویه بازشدگی ۱۳ درجه روند تا زمانی که عدد رینولدز در گلویی در محدوده زیر ۵۰۰۰۰ قرار دارد منحنی دو مدل شونر و زوارت تقریباً مشابه هم بوده اما پس از افزایش عدد رینولدز منحنی دو مدل زوارت و شونر از هم فاصله گرفته بطوری که در مدل زوارت طول ناحیه قرار گرفته در محدوده کاویتاسیون در محدوده عدد رینولدز بالاتر نسبت به مدل شونر افزایش پیدا می کند.

با دقت بیشتر در شکل (۷) همانطور که قابل ملاحظه می باشد در ونتوری بدون گلویی و با زاویه بازشدگی ۱۸ تشابه بین دو مدل تنها در محدوده ای که عدد رینولدز در گلویی ونتوری کمتر از ۳۰۰۰۰

قرار گرفته در محدوده کاویتاسیون رشد زیادی نسبت به مدل شونر از خود نشان می‌دهد. با دقت در شکل (۸) همانطور که قابل ملاحظه می‌باشد در ونتوری با گلوبی ۵ سانتی‌متری و با زاویه بازشدگی ۱۸ تشابه بین منحنی دو مدل تنها در محدوده ای که عدد رینولدز در گلوبی ونتوری کمتر از ۴۰۰۰۰۰ می‌باشد قابل مشاهده است و پس از آن با وجود اینکه روند و شکل منحنی های هر دو مدل یکی می‌باشد اما در مدل زوارت کاهش طول ناحیه کاویته شده بسیار قابل توجه است بطوری که اختلاف حدود دو سانتی متری در عدد رینولدز یک میلیون در طول ناحیه قرار گرفته در محدوده کاویتاسیون دیده می‌شود.

۳-۳-۳- ونتوری با گلوبی ۱۰ سانتی‌متری

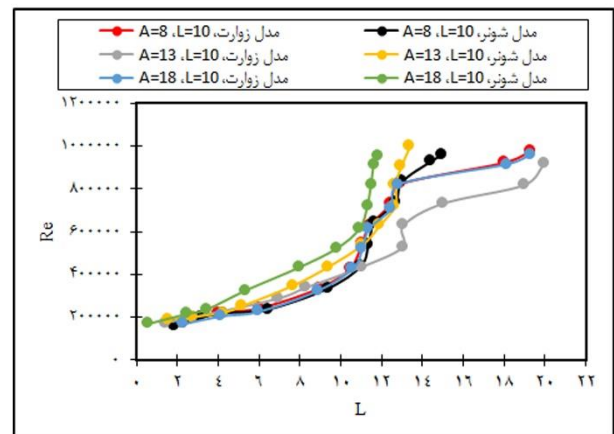
همانطور که از شکل (۹) مشخص است در مدل با گلوبی ۱۰ سانتی متری و زاویه بازشدگی ۸ درجه بین نتایج دو مدل شونر و زوارت تفاوت زیادی دیده نمی‌شود و نتایج کاملا منطبق بر هم هستند و تنها در محدوده‌ای که عدد رینولدز در گلوبی از ۸۵۰۰۰۰ عبور می‌کند طول ناحیه قرار گرفته در محدوده کاویتاسیون در مدل زوارت افزایش قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهد و بطور ناگهانی افزایش پیدا می‌کند.

دو منحنی زوارت و شونر تنها در محدوده ای که عدد رینولدز در گلوبی ونتوری کمتر از ۴۵۰۰۰۰ می‌باشد وجود دارد و پس از آن با افزایش عدد رینولدز در گلوبی مدل زوارت رفتار متفاوتی نسبت به مدل شونر از خود نشان می‌دهد و افزایش طول ناحیه قرار گرفته در محدوده کاویتاسیون در مدل زوارت بسیار بیشتر از مدل شونر است. همانطور که از شکل (۹) مشخص است در مدل با گلوبی ۱۰ سانتی متری و زاویه بازشدگی ۱۸ درجه بین نتایج دو مدل شونر و زوارت تفاوت نسبتا زیادی وجود دارد و این دو مدل تنها در محدوده‌ای که عدد رینولدز ۴۵۰۰۰۰ تا ۶۵۰۰۰۰ قرار دارد پیوستگی مناسبی از خود نشان می‌دهد و همچنین پس از اینکه عدد رینولدز در گلوبی از محدوده ۸۵۰۰۰۰ عبور می‌کند طول ناحیه قرار گرفته در محدوده کاویتاسیون در مدل زوارت افزایش زیادی پیدا می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری کلی

هدف از مطالعه حاضر، بررسی رژیم‌های مختلف کاویتاسیون در یک ونتوری متقارن محوری همگرا-واگرا بوده است. به‌همین دلیل ۹ هندسه مختلف ونتوری را مورد تحلیل و بررسی در بحث وقوع کاویتاسیون و طول ناحیه کاویته شده قرار داده شده است. این ونتوری‌ها با طول‌های مختلف گلوبی و بدون آن و همچنین زاویه‌های بازشدگی متفاوت مدل‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

- با مقایسه طول گلوبی‌ها ملاحظه می‌شود که با افزایش طول گلوبی در حالت کلی در محدوده صفر تا پنج سانتی متری طول ناحیه کاویته شده کمی کاهش و در محدود پس از آن تا افزایش می‌یابد.
- در حالت کلی مدل زوارت طول ناحیه کاویته شده بزرگتری را در محدوده‌ای که عدد رینولدز در گلوبی بزرگتر است، نسبت به مدل شونر نشان می‌دهد.
- در حالت کلی در آنالیزهای رایانه‌ای و مقایسه سرعت همگرایی دو مدل شونر و زوارت ملاحظه گردید که سرعت همگرایی مدل شونر بالاتر از مدل سرعت همگرایی مدل زوارت می‌باشد.



شکل ۹: نمودار عدد رینولدز با طول کاویتاسیون در مدل با گلوبی ۱۰ سانتی متری و زوایای ۸، ۱۳ و ۱۸ درجه

با دقت در شکل (۹) همانطور که قابل ملاحظه می‌باشد در ونتوری با گلوبی ۱۰ سانتی‌متری و با زاویه بازشدگی ۱۳ درجه تشابه بین

- and optimization method”, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. ۱۵, No. ۱, ۷۱۲-۷۲۶, ۲۰۲۱.
- [۵] Kornfeld, M., Suvorov, L., “On the destructive action of cavitation”, *Journal of Applied Physics*, Vol. ۱۵, No. ۶, ۴۹۵-۵۰۶, ۱۹۴۴.
- [۶] Tulin. M., “Steady two-dimensional cavity flows about slender bodies”, David Taylor Model Basin Rep, ۱۹۵۳.
- [۷] Zienkiewicz, O.C., Paul, D.K., Hinton, E., “Cavitation in fluid-structure response (with Particular reference to dams under earthquake loading)”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, ۱۹۸۳.
- [۸] Uhlman, J.S., “The Surface Singularity Method Applied to Partially Cavitating Hydrofoils”, *Journal of Ship Research*, Vol. ۳۱, No. ۲, ۱۰۷-۱۲۴, ۱۹۸۷.
- [۹] Borghei, S.M., Jalili, M.R., Ghodsian, M., “Discharge coefficient for sharp crested side Spillways in subcritical flow”, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. ۱۲۵, ۱۰۵۱-۱۰۵۶, ۱۹۹۹.
- [۱۰] Bagheri, S.Z.A., Ghobadian, R., Dehghani, A.A., Meftah Halghi, M., “Laboratory Study of The Discharge Rate of the Overflow Side of the Complex Sharp Edges”, *Water and Soil Conservation Research*, ۲۰۱۳.
- [۱۱] Ghazi, B., Daneshfaraz, R., Jeihouni, E., “Numerical investigation of hydraulic characteristics and prediction of cavitation number in Shahid Madani Dam's Spillway”, *Journal of Groundwater Science and Engineering*, Vol 7, ۳۲۳-۳۳۲, ۲۰۱۹.
- [۱۲] Daneshfaraz, R., Zogi, N., “Investigation of cavitation in stepped spillway of Siah-Bishe dam by using Flow-۲D model”, *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, Vol 4, ۳۳۸۲-۳۳۸۸, ۲۰۱۳.
- [۱۳] Kadivar, E., Timoshevskiy, M. V., Nichik, M. Y., El Moctar, O., Schellin, T. E., Pervunin, K. S., “Control of unsteady partial cavitation and cloud cavitation in marine engineering and hydraulic systems”, *Physics of Fluids*, Vol 32, ۲۰۲۰.
- [۱۴] Singhal, A. K., Li, H. Y., Athavale, M. M., Jiang, Y., “Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model”, *ASME FEDSM'01, New Orleans, Louisiana*, ۲۰۰۱.

- سرعت بدست آمده در گلوئی در شرایط یکسان زمانی در تمام مدل ها مقدار ثابتی از خود نشان می دهد که نشان دهند استقلال سرعت نسبت به هر دو مدل شونر و زوارت دارد.
- نتایج نشان داد که در ونتوری بدون گلوئی، در محدوده ای که عدد رینولدز کمتر از ۳۰۰۰۰۰ می باشد کاویتاسیون مشاهده شده است. در ونتوری با گلوئی ۵ سانتی متری، تنها در محدوده ای که عدد رینولدز در گلوئی بیشتر از ۸۰۰۰۰۰ است، کاویتاسیون ایجاد شده است. هم چنین نتایج نشان داد که در ونتوری با گلوئی ۱۰ سانتی متری، در محدوده ای کاویتاسیون مشاهده شده است که عدد رینولدز از محدوده ۸۵۰۰۰۰ بیشتر شده است.
- هم چنین نتایج نشان داد که تشکیل پدیده کاویتاسیون در گلوئی ۱۰ سانتی متر نسبت به ۵ سانتی متر به میزان ۵/۸۸ درصد، در گلوئی ۱۰ سانتی متری نسبت به بدون گلوئی به میزان ۶۴/۷۱ درصد و در گلوئی ۵ سانتی متری نسبت به بدون گلوئی به میزان ۶۲/۵ درصد تغییر یافته است.

منابع

- [۱] Euler, L., “Letters of Euler on Different Subjects of Physics and Philosophy”, Addressed to a German Princess. Translated by Hunter, Henry (۲nd ed.). London: Murray and Highley, ۱۸۰۲.
- [۲] Kadivar, E., Timoshevskiy, M. V., Nichik, M. Y., El Moctar, O., Schellin, T. E., Pervunin, K. S., “Control of unsteady partial cavitation and cloud cavitation in marine engineering and hydraulic systems”, *Physics of Fluids*, Vol. ۳۲, No. ۵, ۰۵۲۱۰۸, ۲۰۲۰.
- [۳] Yu, A., Zou, Z., Zhou, D., Zheng, Y., Luo, X., “Investigation of the correlation mechanism between cavitation rope behavior and pressure fluctuations in a hydraulic turbine”, *Renewable Energy*, Vol. 147, ۱۱۹۹-۱۲۰۸, ۲۰۲۰.
- [۴] Suo, X., Jiang, Y., Wang, W., “Hydraulic axial plunger pump: gaseous and vaporous cavitation characteristics

[١٥] Zwart, P.J., Gerber, A.G., Belamri, T., “A Two-Phase Flow Model for Predicting Cavitation Dynamics”, In *Fifth International Conference on Multiphase Flow*, Yokohama, Japan, ٢٠٠٤.

[١٦] Schnerr, G.H., Sauer, J., “Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics”, In *Fourth International Conference on Multiphase Flow*, New Orleans, USA, ٢٠٠١.

مؤسسه تحقیقاتی
پدیده‌شناسی