

بررسی عددی فرسایش کاویتاسیون درون ونتوری با استفاده از دیدگاه اویلری لاگرانژی

کاویتاسیون یک پدیده پیچیده در علم مکانیک سیالات است. وقوع این پدیده به فاکتورهای مهم و البته متفاوتی بستگی دارد. تحقیق فعلی، فرسایش ناشی از فروریزش حباب ها با استفاده از دیدگاه اویلری- لاگرانژی در یک ونتوری را مورد بررسی قرار داده است. جریان سیال کاویتاسیون درون ونتوری به کمک نرم افزار فلوئنت با دیدگاه اویلری و با توسعه یک کد عددی در نرم افزار متلب، رفتار حباب به صورت لاگرانژی شبیه سازی شده است. از معادله کلر- میکسیس برای شبیه سازی تغییرات شعاع حباب و با لحاظ کردن نیروهای مختلف وارد بر حباب و استفاده از قانون دوم نیوتون، معادله حرکت حباب استخراج شده است. از مدل اوچیای برای ارزیابی قدرت ضربات فشاری ناشی از فروریزش حباب ها روی سطح دیواره ونتوری استفاده شده و میزان فرسایش در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج وابستگی شدت فرسایش به شعاع اولیه حباب ها، نوع سیال و محل رهاسازی حباب ها درون جریان را نشان می دهد. نتایج حاصل از بررسی نشان داد شعاع های حباب تا ۲۵ میکرون اثر فرسایشی بیشتری نسبت به دیگر شعاع حباب ها دارند اما وقتی شعاع حباب ها از این مقدار بیشتر می شود، حباب ها در زمان ورود به جریان سیال دچار فروریزش شده و نتایج داده ها رشد شعاع حباب در ادامه مسیر جریان را نشان نمی دهد.

مصطفی بیات

کمیجانی^۱

کارشناسی ارشد

میراعلم مهدی^۲

دانشیار

واژه های راهنما: کاویتاسیون، فرسایش، ونتوری، رویکرد اویلری- لاگرانژی

۱- چکیده

کاویتاسیون عموماً پدیده ای پیچیده تلقی شده و عوامل بسیاری در تعیین خصوصیات آن مؤثر هستند. نام پدیده کاویتاسیون که در علم مکانیک سیالات استفاده می شود برگرفته از واژه لاتین کاویتاس به معنی حفره یا گودال خالی است. کاویتاسیون زمانی رخ می دهد که در معرض تغییرات فشار بالا قرار گرفته باشد [۱]. این تغییرات زمانی رخ می دهد که مایع، تحت تقلیل فشار قرار گرفته باشد.

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران mbk.ares1@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران m.mahdi@sru.ac.ir

این چنین تعریفی بر مبنای دیاگرام فازی یک ماده، بیانگر این است که هر فرآیندی که منجر به افزایش دما جهت ایجاد حباب و یا هر فرآیندی که باعث تقلیل فشار در دمای ثابت شود حالت مایع را به فاز گاز تبدیل می‌کند. در این حالت، تغییر فاز ناشی از افزایش دما به مقداری بیشتر از دمای جوش در فشار محیط، جوشش و تغییر فاز در دمای محیط و با کاهش فشار به مقدار کمتر از فشار بخار کاویتاسیون نام گذاری می‌شود [۲].

آغاز فرآیند شکل‌گیری کاویتاسیون با کاهش فشار استاتیک همراه است. برای وقوع کاویتاسیون سیال نیازمند برخورداری از تعداد کافی هسته است [۳]. هسته‌های حباب‌ها در حالتی که در معرض کاهش فشار در محیط سیال قرار گیرند، رشد کرده و حجیم، همراه با سیال در جریان هندسه منتقل می‌شوند. در حین این جابجایی، به محض اینکه حباب حجیم در محدوده پرفشار در محل سیال قرار بگیرد، شروع به فروریزش می‌کند. این اثر فروریزی اگر در محدوده دیواره هندسه و جسم قرار گیرد در گذر زمان موجب فرسایش و درنهایت شکست واز هم گسیختگی جسم می‌شود که نمونه‌های آن در پره‌های پمپ‌ها مشاهده شده است. فرسایش ایجاد شده در اثر ضربات ناشی از فروریزش حباب، موجب گردیده مدل‌سازی کاویتاسیون با دشواری‌های بسیاری همراه باشد. بررسی‌های به‌عمل آمده نشان می‌دهد، مدل‌های مختلفی برای وقوع فرسایش توسط محققان علم سیالات ارائه شده که هر کدام دارای فرضیات و ساده‌سازی‌هایی هستند.

مدل اوچیای [۴] از میان این مدل‌ها، به دلیل استفاده همزمان از دو دیدگاه اوپلری و لاگرانژی، مبنای فیزیکی قدرتمندتری نسبت به دیگر مدل‌ها دارد و درک بهتری از جزئیات مسأله به‌دست می‌دهد. دیدگاه اوپلری حاکم بر کلیت مسأله تعیین‌کننده رفتار سیال در ابعاد ماکروسکوپی و دیدگاه لاگرانژی نیز ابعاد میکروسکوپی حل را مورد بررسی قرار داده و با بررسی جامع‌تر کاراکترها و پارامترهای موجود (بخصوص رفتار حباب‌ها)، درک بهتری از سازوکار وقوع محل فرسایش به‌دست می‌دهد.

راندال [۵] در سال ۱۹۵۲ میلادی طی ارائه مقاله‌ای به بررسی ناحیه کاویتاسیونی ونتوری پرداخت. در این تحقیق او محدوده وقوع کاویتاسیون و محدودیت‌های جریان درون ونتوری را مشخص کرد. لیو و همکاران [۶] در یک ونتوری کوچک با حالت ورودی مادون سرد کاویتاسیون را تست کردند. در تحقیقات فضایی برای کنترل گرمای ناشی از تشعشع در تاسیسات ارسالی به فضا از سیستم خنک‌کاری دوفازی استفاده شد. آنها برای کنترل جریان از ونتوری‌ها با ورودی سیال زیرتبرید استفاده کردند که مزایایی همچون تنظیم جریان پیش‌رانه موشک، تنظیم جریان آب به سیستم خودکار پاشش آب را داشت. آنها برای اینکار در بالای هر اواپراتور یک ونتوری نصب کردند تا نرخ جریان آمونیاک مایع مورد نظر مطابق با حداکثر بار گرمایی درون سیستم کنترل شود. ژو و هیستر [۷] مدل‌های متنوعی از ونتوری را با استفاده از مدل جریان همگن مورد آزمایش قرار دادند. آنها جریان کاویتاسیون، فرکانس نوسان و اندازه کاویتاسیون را برای بازه گسترده‌ای از شرایط و مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی توصیف کردند. نتایج محاسباتشان نشان داد که کاویتاسیون در گلوگاه رشد می‌کند و منطقه پایین دست آن به روش شبه متناوب تشکیل می‌شود. رشد حفره کاویتاسیون وابسته به عدد کاویتاسیون حین کاهش فشار در گلوگاه است. ایشیموتو و کامیجو [۸] پدیده کاویتاسیون درون ونتوری را برای هلیوم مایع با روش PIV مورد مطالعه قرار دادند. آنها مفهوم جدیدی از سیستم خنک‌کننده چندفازی با استفاده از جریان کاویتاسیون هلیوم مایع ایجاد کردند. آنها توسط کانتورهای فشار و سرعت دریافتند جریان کاویتاسیونی درون گلوگاه به واسطه افت فشار در ناحیه گلوگاه اتفاق افتاده و ابر حباب تشکیل شده از حباب

های کوچک متمرکز شده در نزدیکی دیواره گلوگاه ایجاد می‌شود. موهولکار و پاندیت [۹] دینامیک جریان پرحباب را با کمک شبیه سازی عددی بررسی کردند. آنها یک مدل مخلوط پیوسته پرحباب را استفاده کردند تا جریان کاویتاسیون یک بعدی را درون ونتوری مورد مطالعه قرار دهند. آنها پارامترهای مهمی چون فشار پایین دست جریان، نسبت سطح ونتوری، ضریب حباب اولیه، اندازه شعاع اولیه حباب درون جریان را تشریح کردند.

چن و همکاران [۱۰] یک کد عددی را برای حل جریان ناپایا کاویتاسیون درون یک ونتوری بررسی کردند. در سال ۲۰۰۵ آنها مدل توربولانسی RNG k-ε را برای حل آشفتگی جریان انتخاب کردند. آنها هم چنین کاویتاسیون را با معرفی یک قانون باروتروپیک که بین چگالی و فشار ارتباط ایجاد می‌کند کوپل کردند. آنها ارتباط بین کاویتاسیون را با فشار ورودی ارائه دادند و جریان پیچشی متناوب حول هیدروفویل ناکا ۰۰۱۲ را پیشی بینی کرده و با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دادند. لذا جوابها با دقت خوبی ارائه شده بودند.

اولاس [۱۱] یک آزمایش برای بررسی عملکرد کاویتاسیون درون ونتوری در یک نسبت خاص دبی جرمی ترتیب داد. او کاویتاسیون را با فشار جریان بالادستی ثابت تست کرد اما جریان پایین دست را لحاظ نکرد. نتایج آزمایشگاهی نظیر نرخ دبی جرمی متوسط و اندازه نهایی تخلیه آب، با نتایج تئوری مقایسه شد و این نکته بررسی شد که کاویتاسیون درون ونتوری با ورودی فشار ثابت تشکیل می‌شود.

قاسمی و فصیح [۱۲] عملکرد کاویتاسیون درون ونتوری را با در نظرگیری فشار ورودی و فشار خروجی به دفعات مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد برای نسبت فشار پایین دست به بالادست که کمتر از ۰/۸ باشد، نرخ دبی جرمی ثابت و وابسته به پایین دست جریان است.

در این مقاله روش حل بدین صورت است که جریان سیال به کمک نرم افزار انسیس فلونت ۲۰۱۹ درون هندسه ونتوری شبیه سازی شده و توزیع فشار محلی و سرعت عبور سیال، درون هندسه مذکور به دست آمده است. سپس حل کاویتاسیون در هندسه مذکور توسط سه نظریه اسکندر-ساویر (Schener-Sauer) و (Zwart-Gerber) و مدل کاملتر حل کاویتاسیون سینگهال (Singhal) [۲۱] بررسی گردیده است. این حل جریان سیال، سابق بر این توسط مهدی و همکاران [۱۳] بررسی و نتایج آن در قالب مقاله ارائه گردیده است. حال با توسعه کد کامپیوتری در نرم افزار متلب، رفتار حرکت حباب و توزیع سرعت، رشد و فشار ناشی از فروریزش جمع آوری شده است. هر کدام از بخش های کدنویسی شده دارای معادلات دیفرانسیل جداگانه ای است که مشخص کننده وضعیت بخشی از رفتار کلی حباب تحت تاثیر میدان فشار و سرعت اعمال شده در مسیر حرکت حباب درون سیال بوده و در نهایت با یکدیگر ادغام می‌شوند. با انجام این بخش، رفتار حباب به صورت دقیق تحت تاثیر جریان کاویتاسیون به دست می آید و در گام نهایی، به کمک مدل های موجود، محل وقوع فرسایش ناشی از کاویتاسیون مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در مقاله یاد شده پدیده کاویتاسیون به صورت پایا و ناپایا در یک ونتوری توسط مهدی و همکاران [۱۳] مدل کاویتاسیونی انتخاب شده، مدل ارائه شده توسط سینگهال است که از دقت بالاتری نسبت به مدل های دیگر برخوردار است. نرخ دبی عبوری از ونتوری در دو مدل اسکندر-ساویر و سینگهال مقایسه گردیده که درصد خطا در مدل اسکندر-ساویر ۴/۷ درصد و در مدل سینگهال ۰/۰۵ درصد نسبت به حالت واقعی است. در ونتوری افت فشار بعد از ناحیه گلویی شدن موجب رشد سرعت و وقوع پدیده کاویتاسیون می‌گردد.

جریان کاویتاسیون به صورت پایا در اختلاف فشارهای متفاوت با داده‌های تجربی قاسمی و همکاران [۱۲] مقایسه شد و مشخص شد که در حالت پایا، تغییر مدل آشفتگی تأثیری بر شکل حفره کاویتاسیون ندارد. همچنین در این حالت با کاهش فشار پایین دست جریان (افزایش اختلاف فشار)، طول حفره کاویتاسیون افزایش یافته و به سمت خروجی ونتوری پیش رفته است. در حالت ناپایا به علت نوسانی بودن فیزیک مساله، کاویتاسیون همراه با ریزش است و مدل‌های استاندارد توربولانسی $k-\omega$ و $k-\epsilon$ در پیش‌بینی این حالت ناتوان هستند، لذا برای نشان دادن این مهم از کد UDF ارائه شده توسط ساجدی و همکاران [۱۴] بهره جسته تا جداسدن حباب ابری از حباب صفحه‌ای اصلی و فروپاشی حباب ابری نشان داده شود. با این حال معیار ما برای توسعه کد در مقاله حاضر، حل جریان در حالت پایا و بهره‌گیری از داده‌های تجربی قاسمی و همکاران [۱۲] و مهدی و همکاران [۱۳] در مقالات یادشده خواهد بود.

۲- معادلات حاکم

در این پژوهش، با استفاده از مدل اوچیای و روش‌های ریاضی حل مسائل معادلات دیفرانسیل، اثر فرسایش کاویتاسیون در ونتوری مورد بررسی قرار گرفته است. فرسایش ناشی از کاویتاسیون یک اثر مخرب برای دستگاه‌های صنعتی بوده و از این جهت یافتن علل و محل وقوع فرسایش در نحوه عملکرد دستگاه‌ها بسیار موثر است. دیدگاه ابتدایی در مورد تشکیل کاویتاسیون این بود که با ورود جریان به یک ناحیه کم‌فشار حباب شکل گرفته و رشد می‌کند و به محض ورود به ناحیه پر فشار از بین می‌رود. این دیدگاه بعدها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مشاهده گردید که منشأ پیدایش و وقوع کاویتاسیون ذرات ریز و ناخالصی‌های موجود در سیال هستند که حتی با پالایش و تصفیه با دقت بالا نیز از بین نخواهند رفت. لذا از این ذرات ریز با نام هسته یاد شد [۳]. حباب رشد یافته در ناحیه کم فشار در حالیکه به ناحیه پرفشار سیال وارد شود دچار فروریزش شده و در این حالت هنگامی که در ناحیه نزدیک دیواره قرارگیرد دچار فروریزش شده و ضرباتی با فشار به دیواره وارد نموده که موجب فرسایش دیواره و از بین رفتن قطعه خواهد شد. شبیه‌سازی رفتار یک حباب نیازمند بررسی معادلات حاکم بر آن است.

در بخش اول، با فرض کروی بودن حباب، معادله حاکم بر رشد حباب یا همان معروف معادله رایلی-پلیست (RP) [۱۵] ارائه شده است. سپس این معادله با در نظر گرفتن سرعت لغزشی بین سیال و حباب اصلاح شده است. در ادامه، فرم پایه معادله کلر [۱۶] که بهبود یافته معادله رایلی پلیست بوده و در این قسمت مورد استفاده قرار گرفته، توضیح داده شده است.

در بخش دوم، با اعمال نیروهای شناوری، نیروی ناشی از گرادیان فشار، نیروی پسا، نیروی ناشی از جرم افزوده و نیروی برا در قانون دوم نیوتن، معادله حرکت حباب به دست آمده است.

در بخش سوم، نحوه به دست آوردن معادله موج فشاری ناشی از فروریزش که برای محاسبه فرسایش مورد استفاده قرار گرفته است توضیح داده شده است.

در بخش چهارم، به کمک روابط به دست آمده در بخش سوم، نحوه محاسبه قدرت ضربات فشاری وارد شده به سطح مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش پنجم معادلات حاکم بر بخش اویلری به روش حل سینگهال گنجانده شده است.

۲-۱- بررسی تغییرات شعاع حباب

شعاع حباب تحت تأثیر میدان جریان قرار گرفته و به صورت نوسانی تغییر می‌کند. دامنه نوسانات حباب به تغییرات فشار میدان جریان بستگی دارد. وقتی که حباب وارد منطقه کم فشار شود دامنه تغییرات شعاع آن افزایش می‌یابد و برای منطقه پرفشار، عکس این حالت اتفاق می‌افتد. درون حباب نیز مقداری گاز و بخار آب وجود دارد و فشار گاز درون حباب در پایداری آن نقش مهمی دارد. در این بخش معادله حاکم بر تغییرات شعاع حباب بدست می‌آید و پایداری حباب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

یک حباب کروی به شعاع $R(t)$ را در یک میدان جریان در نظر بگیرید، فرض می‌شود که فشار و دما در دور دست به ترتیب برابر $P_\infty(x)$ و T_∞ باشد. با فرض اینکه انتقال حرارت مربوط به چشمه‌های حرارتی داخلی یا تشعشع وجود نداشته باشد، در این صورت T_∞ ثابت بوده و گرادیان دما در میدان جریان وجود نخواهد داشت. از طرف دیگر، فرض می‌شود که $P_\infty(x)$ معلوم است و می‌توان آن را کنترل کرد.

فرض‌های دیگری که در بدست آوردن معادله رایلی-پلیست انجام شده این است که چگالی ρ_L و لزجت سیال μ_L ثابت بوده و حباب همگن و دارای دمای $T_B(t)$ و فشار داخلی یکنواخت $P_B(x)$ است. شعاع حباب $R(t)$ یکی از اولین نتایجی است که از بررسی رفتار حباب به دست می‌آید.

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left[P_B - P_\infty - \frac{2\gamma}{R} - \frac{4\mu}{R}\dot{R} \right] \quad (1)$$

در فرایند کاویتاسیون، درون حباب‌ها، بخار و گازهای حل شده در سیال وجود دارد. مقدار فشار این گازها در فرایند رشد و انهدام حباب تأثیر بسزایی دارد. به طوری که در صورت پایین بودن فشار گاز درون حباب، مرحله انهدام حباب به صورت انفجاری صورت می‌گیرد و در صورت بالا بودن فشار، انهدام غیر انفجاری خواهد بود. برای مواردی که تغییرات گرمایی در سیال مهم است، معادله فوق باید برای بررسی رفتار حباب در نظر گرفته شود.

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left[P_v(T_B) + P_{G0} \left(\frac{T_B}{T_\infty} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - P - \frac{2\gamma}{R} - \frac{4\mu}{R}\dot{R} \right] \quad (2)$$

با فرض نادیده گرفتن اثرات گرمایی در رفتار حباب، دمای درون مایع یکنواخت بوده و می‌توان رفتار گاز درون حباب را پلی‌تروپیک در نظر گرفت.

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left[P_v(T_\infty) + P_{G0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3k} - P_\infty(t) - \frac{2\gamma}{R} - \frac{4\mu}{R}\dot{R} \right] \quad (3)$$

حباب و سیال نسبت به هم دارای سرعت نسبی هستند و این سرعت نسبی موجب اعمال یک نیرو بر حباب شده و تغییرات شعاع آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای در نظر گرفتن این نیرو در رابطه اصلی رایلی-پلیست، تابع پتانسیل حاکم بر حباب را باید لحاظ کنیم. با فرض اینکه حباب به صورت کروی باقی بماند داریم:

$$R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left[P_v(T_\infty) + P_{G0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3k} - P - \frac{2\gamma}{R} - \frac{4\mu}{R} \dot{R} \right] + \frac{1}{4} (U_f - U_b)^2 \quad (4)$$

کلر و میکسیس [۱۶] با در نظر گرفتن اثر تراکم‌پذیری سیال، رابطه زیر را برای پیش‌بینی رفتار حباب ارائه دادند:

$$\left(1 - \frac{\dot{R}}{c} \right) R \ddot{R} + \left(\frac{3}{2} - \frac{\dot{R}}{2c} \right) \dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left(1 + \frac{\dot{R}}{c} + \frac{R}{c} \frac{d}{dt} \right) \left[P_v + P_{G0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3k} - P_{ave} - \frac{2\gamma}{R} - \frac{4\mu}{R} \dot{R} \right] + \frac{1}{4} (U_f - U_b)^2 \quad (5)$$

که در آن c سرعت صوت و P_{ave} فشار میانگین مایع در سطح حباب است.

۲-۲- بررسی حرکت حباب

در یک جریان دوفازی در صورتی که اندازه حباب‌ها در مقایسه با ابعاد جریان خیلی کوچک باشد، می‌توان بدون در نظر گرفتن اثرات حباب، میدان جریان را به صورت پیوسته حل کرد و توزیع سرعت $u(x,t)$ و فشار $P(x,t)$ را بدست آورد. با داشتن میدان جریان می‌توان معادله حاکم بر حرکت حباب و معادله رایلی-پلیست را همزمان حل کرد و مسیر حرکت حباب و تغییرات شعاع آن را بدست آورد. در این قسمت روش بدست آوردن معادله حرکت حباب با در نظر گرفتن کلیه نیروهای وارد بر آن توضیح داده شده‌است. با در نظر گرفتن نیروهای وارد بر حباب و اعمال این نیروها در قانون دوم نیوتن، معادله حرکت حباب بدست می‌آید. مهم‌ترین نیروهای موثر بر حباب عبارتند از: نیروی شناوری، نیروی ناشی از گرادیان فشار، نیروی پسا، نیروی جرم افزوده، نیروی ناشی از تغییر حجم و نیروی برا ساغمن. در این حالت نیروهای محاسبه شده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{d\vec{U}_b}{dt} = -2g\vec{j} - \frac{2}{\rho} \nabla p + \frac{3}{4} \frac{C_D}{R} (\vec{U}_f - \vec{U}_b) |\vec{U}_f - \vec{U}_b| + \frac{3}{R} (\vec{U}_f - \vec{U}_b) \dot{R} + \frac{3/084}{R} v^{\frac{1}{2}} (\vec{U}_f - \vec{U}_b) \left| \frac{d\vec{U}_f}{dy} \right|^{\frac{1}{2}} \vec{j} \quad (6)$$

۲-۳- معادله موج فشاری ناشی از فروریزش

در طول فرایند فروریزش، حباب، امواج فشاری (موج شوک) را به درون مایع منتشر می‌کند. این امواج فشاری به عنوان مکانیزم اصلی فرسایش در این تحقیق در نظر گرفته شده‌اند. قدرت این امواج با دور شده از سطح مایع کاهش پیدا می‌کند، بنابراین مشخص است که هرچه فاصله محل فروریزش حباب از سطح کمتر باشد، احتمال آسیب رسانی به سطح افزایش می‌یابد.

در بررسی‌های اولیه روی این امواج، مایع اطراف حباب تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شد. در صورتی که اثرات تراکم‌پذیری در رابطه رایلی-پلیست در نظر گرفته نشوند، نوسانات حباب بدون تغییر دامنه در محیط ادامه داشته و پس از هر فروریزش یک موج جدید در محیط منتشر می‌شود.

$$p(r, t) = p_0 + \rho \left(-\frac{\dot{f}}{r} - \frac{\dot{f}^2}{2r^4} - \frac{1}{2c} \left(\frac{\dot{f}^2}{cr^2} + \frac{2f\dot{f}}{r^3} \right) \right) \quad (7)$$

۲-۴- معادله محاسبه شدت ضربات وارد بر سطح

سویاما و همکاران [۱۷] پس از ساخت یک مبدل فشار جدید و اندازه‌گیری ضربات وارد شده از سوی حباب‌ها، روابطی را برای اندازه‌گیری شدت این ضربات ارائه کردند. بر این اساس، انرژی ناشی از هر کدام از ضربات به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_i = I_i \tau_i A_i = \frac{P_i^2}{2\rho c} \tau_i A_i \quad (8)$$

که در آن، I_i انرژی آکوستیک است. τ_i و A_i نیز به ترتیب مدت زمان وارد شدن ضربه و مساحت موثر هستند. P_i نیز فشار ضربه وارد شده بر سطح دیواره است.

۲-۵- مدل کابیتاسیونی سینگهال

برای بدست آوردن نرخ تغییر فاز کلی با بهره‌گیری از مدل سینگهال [۲۱]، از معادلات پیوستگی دو فازی زیر بهره برده شده است. فاز مایع:

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - \alpha)\rho_l] + \nabla \cdot [(1 - \alpha)\rho_l V] = -R \quad (9)$$

فاز بخار:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha\rho_v) + \nabla \cdot (\alpha\rho_v V) = R \quad (10)$$

فاز مخلوط:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho) + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (11)$$

که در آن l فاز مایع و v چگالی مخلوط (تابعی از فاز کسر حجمی و چگالی) است که به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\rho = \alpha\rho_v + (1 - \alpha)\rho_l \quad (12)$$

در این مدل فرمول‌بندی تک‌فاز با معادله زیر ارائه می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_v \rho) + \nabla \cdot (f_v \rho V_v) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla f_v) + R_e - R_c \quad (13)$$

که در آن کسر جرمی بخار f_v ، گازهای غیر قابل حل f_g و ضریب پخش Γ می‌باشد. نرخ تغییر جرم با معادلات زیر بیان می‌شود:

در صورتیکه $P \leq P_v$

$$R_e = F_{vap} \frac{\max(1.0, \sqrt{k})(1-f_v-f_g)}{s} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P_v-P)}{\rho_l}} \quad (14)$$

در صورتیکه $P > P_v$

$$R_c = F_{cond} \frac{\max(1.0, \sqrt{k})f_v}{s} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P_v-P)}{\rho_l}} \quad (15)$$

فشار اشباع با تخمین مقادیر محلی نوسانات فشار آشفستگی بدست می‌آید:

$$P_v = P_{sat} + \frac{1}{2} (0.39 \rho k) \quad (16)$$

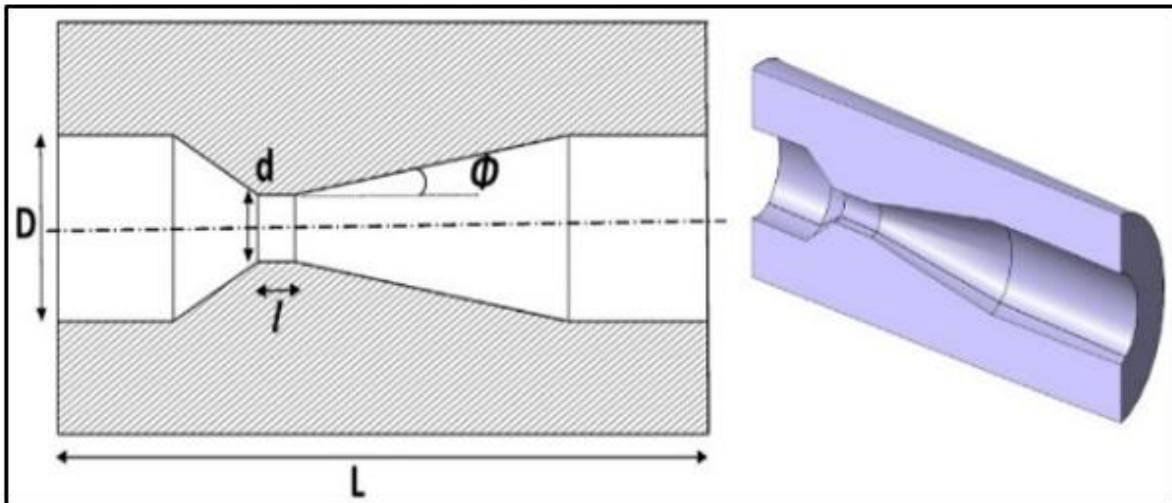
ثابت‌های $F_{vap} = 0.02$ و $F_{cond} = 0.01$ هستند. در این مدل، ترکیب آب و بخار تراکم‌پذیر در نظر گرفته شده و همچنین، اثرات آشفستگی و گازهای غیر قابل حل نیز لحاظ می‌شود.

۳- بررسی نتایج

در این تحقیق، از هندسه ونتوری برای بررسی پدیده کاویتاسیون و فرسایش ناشی از آن استفاده شده است. نازل‌های ونتوری از ساده‌ترین وسایل کنترل جریان هستند که در بسیاری از وسایل صنعتی کاربرد دارند. هندسه این آزمایش توسط قاسمی و همکاران [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته و کاویتاسیون آن تحت شرایط آزمایشگاهی آنالیز شده است. این ونتوری از یک مقطع همگرا (نازل) در بخش ابتدایی، یک مقطع کوتاه صاف (گلوبی) و مقطع واگرا (دیفیوزر) تشکیل شده که تصویر آن در شکل شماره (۱) نمایش داده شده است. ونتوری‌ها می‌توانند بر اساس خصوصیاتشان نظیر سادگی، هزینه و وزن کم، اشغال فضای کمتر، قابلیت اطمینان بالا و عمر طولانی، جایگزینی برای سیستم‌های کنترلی پیچیده و پر هزینه نظیر شیرهای خود کنترل باشند. در ونتوری مدنظر قطر دهانه ورودی ۴ میلی‌متر، قطر دهانه خروجی ۴ میلی‌متر و قطر ناحیه گلوبی ۱ میلی‌متر و طول آن هم ۱ میلی‌متر است. در مجموع طول کلی ونتوری ۴۰ میلی‌متر و زاویه خروجی ناحیه گلوبی به سمت دیفیوزر ۷ درجه در نظر گرفته شده است.

حل جریان توسط نرم افزار انسیس فلوئنت ۲۰۱۹ به صورت متقارن محوری و برمبنای فشار به صورت پایا و با مدل آشفستگی $k-\epsilon$ realizable است. در مقاله قاسمی و همکاران مدل حل کاویتاسیون با مدل اسکندر-ساویر است، اما در پژوهش حاضر علاوه بر این مدل، مدل حل دقیق‌تر کاویتاسیون یعنی مدل سینگهال [۲۱] مورد بررسی و نتایج فرسایش کاویتاسیون بر اساس حل این مدل ارائه گردیده‌اند. معادله پیوستگی و اندازه حرکت به صورت حل مرتبه دوم و کوپل فشار و سرعت با الگوریتم ساده لحاظ گردیده است.

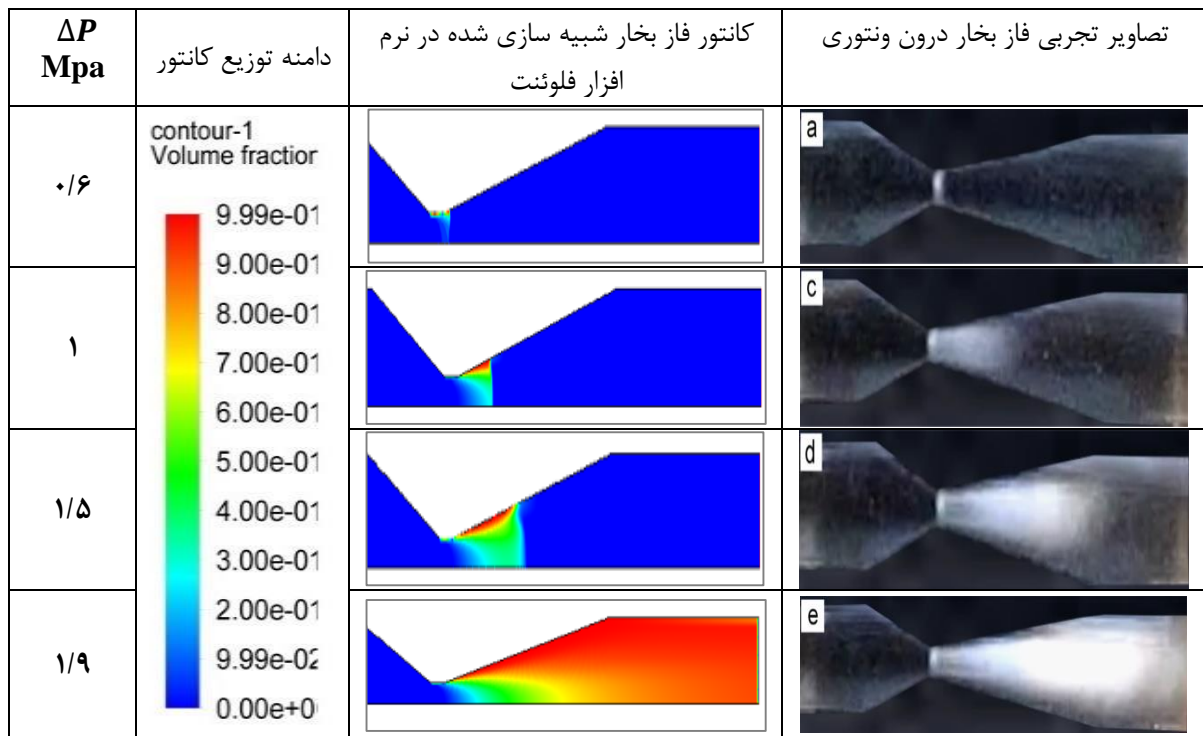
هندسه شبیه سازی شده و ساخته شده کاملاً مطابق یکدیگر بوده و ساختار شبکه انتخاب شده به صورت باسازمان است. پس از شبکه‌بندی مطابق جدول (۱) شرایط مرزی برای هندسه در نرم‌افزار تعریف شد. نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی [۱۲] مقایسه شد. مقدار نسبت دبی جرمی بدست آمده از شبیه‌سازی به دبی جرمی تئوری برای مدل کاویتاسیون اسکندر-ساویر برابر $0/941$ است در حالی که برای مدل کاویتاسیونی سینگهال این مقدار برابر $0/947$ خواهد بود که این نشان از دقت بیشتر این روش حل به نسبت روش اسکندر ساویر است. همچنین اگر فشار خروجی مطابق تست آزمایشگاهی $3/551$ مگاپاسکال و فشار ورودی را $1/68$ مگاپاسکال در نظر رفته شود، مقدار دبی عبوری جریان برای اسکندر-ساویر برابر $0/0687$ کیلوگرم بر ثانیه و مدل سینگهال برابر $0/0726$ کیلوگرم بر ثانیه خواهد بود. مقادیر یاد شده در حل اسکندر-ساویر و حل سینگهال به ترتیب دارای $4/7$ و $0/005$ درصد خطا نسبت به حالت تست تجربی دارند و این نیز خود اثبات دیگری بر دقت حل سینگهال نسبت به روش اسکندر-ساویر دارد.



شکل ۱- هندسه ونتوری [۶ و ۵]

جدول ۱- شرایط مرزی و اولیه در حل کاویتاسیون درون ونتوری

نوع/مقدار	شرح قسمت	نوع شرایط	طبقه بندی
فشار ورودی ۲ مگاپاسکال	ورودی	شرایط مرزی	اولبری
فشارخروجی $0/1-1/4$ مگاپاسکال	خروجی		
عدم لغزش دیواره	دیواره		
$1-500$ میکرومتر	شعاع اولیه حباب	شرایط ورودی	لاگرانژی
صفر	سرعت اولیه رشد دیواره حباب		
بسته به نوع و شرایط آزمایش متفاوت	موقعیت اولیه رهاسازی حباب		
برابر با سرعت سیال در محل	سرعت اولیه حباب		



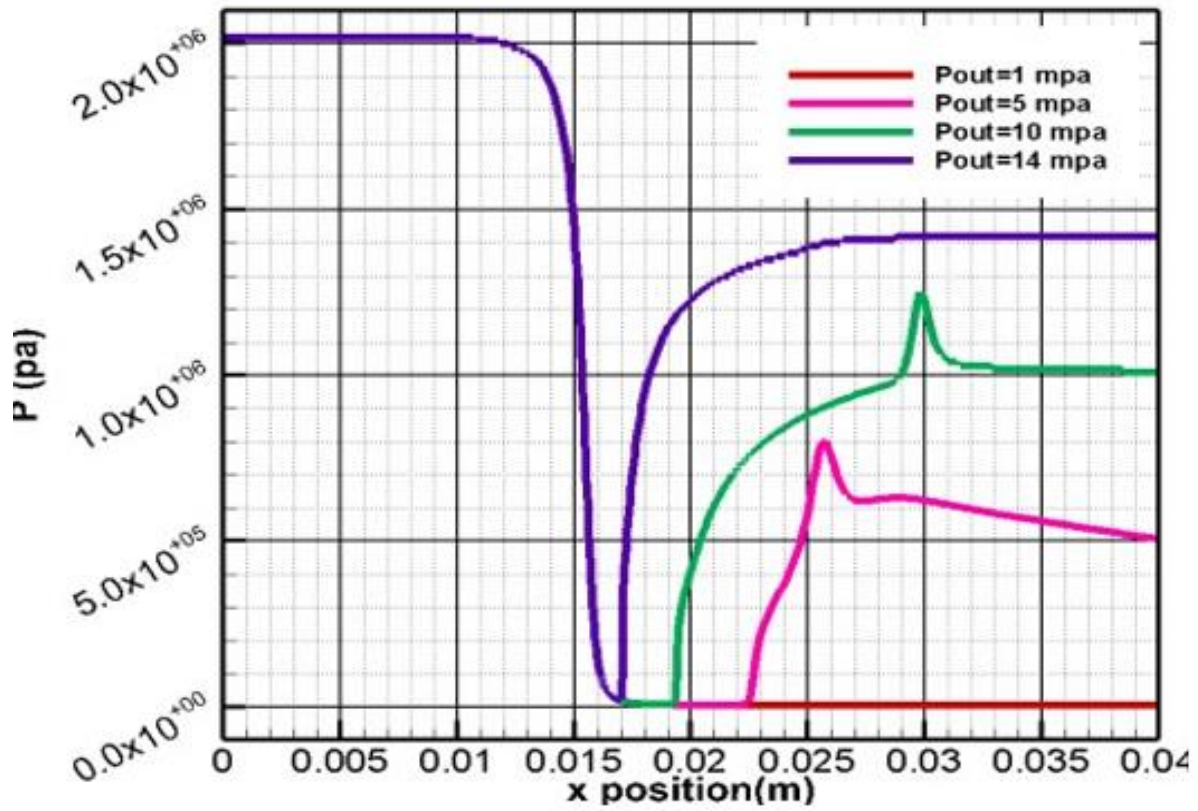
شکل ۲- تشکیل فاز بخار ایجاد شده درون ونتوری در نرم افزار در مقایسه با تصاویر تجربی

برای مقایسه دقیق تر نتایج بدست آمده از آزمایش و نتایج شبیه سازی، توزیع کسر حجمی درون ونتوری برای شرایط مرزی مختلف در شکل (۲) آمده است. همانطور که مشخص است شباهت نزدیکی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. نمودار مربوط به افت فشار درون ونتوری بر روی محور تقارن برای فشارهای مختلف بر حسب موقعیت مکانی در نمودار (۱) آمده است. فشار ورودی ونتوری، ۲ مگاپاسکال و افت فشار ایجاد شده در ناحیه گلوگاه در فاصله بین ۱۵ تا ۲۰ میلی متری از ورودی کاملاً مشهود و در تمامی حالت های فشار خروجی ایجاد شده است که منجر به رشد حباب و ایجاد کاویتاسیون در این ناحیه خواهد بود. بعد از این محدوده مکانی دوباره افزایش فشار سیال را درون ونتوری شاهد هستیم.

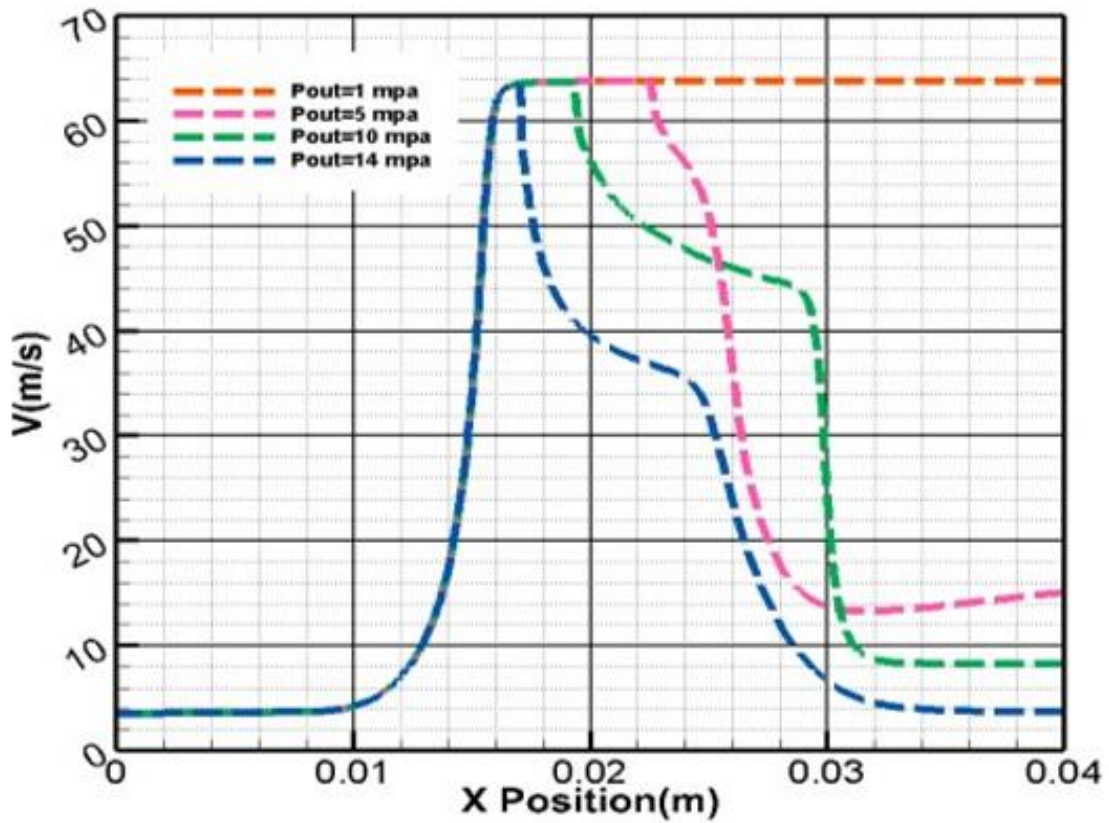
جدول (۲) نتایج استقلال از شبکه برای همگرایی حل را نمایش می دهد. مقادیر دبی در شبکه شماره (۱) و شماره (۲) بررسی و صحت شبکه بندی و حل عددی اثبات گردید. بنابراین از تعداد مش 590×40 استفاده کردیم. طبق قانون برنولی [۲۲] در ناحیه بین ۱۵ تا ۲۰ میلی متر با افت فشار، سرعت سیال در این ناحیه افزایش یافته که در نمودار (۲) این تصاویر جهت بررسی ارائه گردیده است.

جدول ۲- نتایج استقلال از شبکه

\dot{m}_{theory} (kg/s)	$\dot{m}_{numerical}$ (kg/s)	$\dot{m}_{experimental}$ (kg/s)	تعداد مش	ردیف
۰/۰۷۸۸	۰/۰۶۸۷	۰/۰۷۲۱	420×20	۱
۰/۰۷۸۸	۰/۰۷۲۹	۰/۰۷۲۱	590×40	۲



نمودار ۱- فشار محور تقارن ونتوری بر حسب موقعیت مکانی



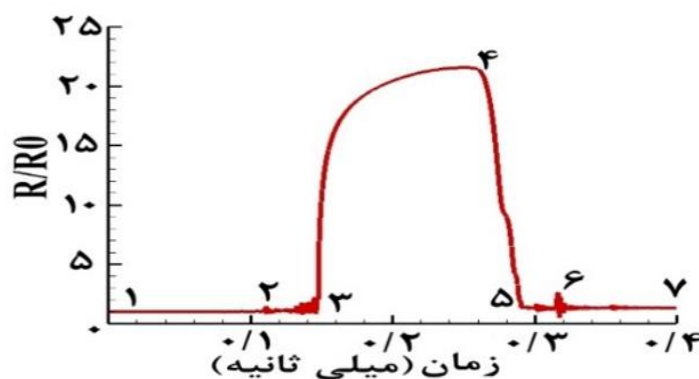
نمودار ۲- سرعت محور تقارن ونتوری بر حسب موقعیت مکانی ونتوری

برای بررسی مسئله از دیدگاه لاگرانژی، لازم است ابتدا جریان به صورت اویلری شبیه‌سازی شده و اطلاعات مربوط به آن استخراج شود. اختلاف فشار بین ورودی و خروجی ونتوری یک فاکتور مهم در تعیین خصوصیات کاویتاسیون تشکیل شده در ونتوری و به طور کلی عملکرد ونتوری است. در تحقیق فعلی فشار ورودی همواره ثابت و برابر ۲ مگاپاسکال در نظر گرفته شده و حالت‌های مختلف جریان به کمک تغییر در فشار خروجی حاصل شده‌اند. جهت بررسی فرسایش از دیدگاه لاگرانژی لازم است که حفره تشکیل شده روی سطح، طول و کیفیت (نسبت بخار به مایع) مناسبی داشته باشد. به منظور تصمیم‌گیری بهتر در انتخاب حالت مطلوب، جریان سیال در اختلاف فشارهای مختلف شبیه‌سازی شده و طول حفره کاویتاسیون تشکیل شده برای هر کدام از این حالات در مقاله مهدی و همکاران [۱۳] مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

برای آشنایی با دیدگاه لاگرانژی ابتدا بایستی حرکت یک حباب درون ونتوری مورد تحلیل قرار بگیرد. نمودار (۳) منحنی رشد حباب برحسب شعاع اولیه در برابر زمان حرکت را نشان می‌دهد. این زمان، به طور تقریبی برابر با زمان لازم برای پیمودن طول ونتوری توسط حباب مورد نظر است. لازم به ذکر است که زمان مورد نظر برای هر حباب، بسته به محل رهاسازی و نحوه حرکت حباب درون ونتوری متفاوت از دیگر حباب‌هاست. اما در بخش لاگرانژی، شرط مکانی قید شده تضمین می‌کند که محاسبات مربوط به هر حباب تا رسیدن حباب به انتهای ونتوری و یا عدم نوسان و فروریزش نهایی ادامه داشته باشد.

در نمودار (۳) هفت مرحله مشخص شده‌اند که به ترتیب متناسب با مراحل ۱ تا ۷ در نمودار هستند. در مرحله ۱ حباب پس از رهاسازی با سیال حرکت کرده و به سمت گلوگاه نزدیک می‌شود. در مرحله ۲، افت فشار محیط در ناحیه نزدیک به گلوگاه باعث رشد نوسانی اندک در حباب شده است. در مرحله ۳، حباب با پیمودن مسیر گلوگاه یک میلی متری شروع به نوسان و رشد نوسانی می‌کند (ناحیه بین ۲ تا ۳). در بین مرحله (۳) و (۴)، حباب درون ناحیه حفره کاویتاسیون قرار گرفته و با توجه به منحنی فشار مشخص است.

در این ناحیه افت فشار به اندازه کمتر از فشار بخار آب رسیده و در این حالت حباب رشد خود را ادامه داده و هرچه به ناحیه کم فشارتر نزدیک شده این رشد بیشتر شده و در نهایت به بیش از ۲۰ برابر اندازه اولیه خود در ناحیه (۴) رشد یافته است. پس از عبور حباب از ناحیه حفره کاویتاسیون و به محض ورود به ناحیه همگن (فشار ۰/۶ مگاپاسکال)، حباب شروع به فروریزش ناشی از ورود به ناحیه پرفشار کرده (ناحیه ۴ تا ۵) و همانطور که در تصویر مشخص است تقریباً تا اندازه اولیه خود کاهش شعاع داده است (ناحیه بین ۵ تا ۶).



نمودار ۳- نسبت شعاع به شعاع اولیه برحسب زمان

پس از فروریزش اصلی، حباب نوسان‌های دیگری نیز در سیال انجام می‌دهد که از میان آنها، مطابق آنچه در ادامه گفته خواهد شد، فروریزش دوم و سوم در محدوده مورد نظر برای رویت موج فشاری قرار گرفته و بقیه نوسانات قدرت آسیب‌رسانی به سطح را ندارند (قسمت ۶ تا ۷) در ادامه، حباب با جریان سیال حرکت کرده و بدون اینکه اتفاق خاصی رخ دهد، به انتهای نازل رسیده و از آن خارج می‌شود.

توضیحات بیان شده در این قسمت به منظور این بود که حرکت سایر حباب‌ها نیز شبیه به همین شکل دارد. حال برای بررسی فروریزش حباب‌ها ۶ سری حباب به تعداد ۵۰ عدد با شعاع اولیه متفاوت از ۱ تا ۵۰۰ میکرومتر را در مناطق مختلف ورودی ونتوری رهاسازی نموده و با جمع‌آوری داده‌های حرکت در مسیر، رشد حباب و قدرت فشاری ناشی از ضربات حین فروریزش که روابط آن ارائه گردید، طی آنالیز و بررسی توسط برنامه‌نویسی انجام شده در نرم افزار متلب در نهایت به ماهیت قدرت فشار ضربات و تعداد ضربات و هم‌چنین ناحیه فروریزش حباب درون ونتوری پی خواهیم برد. رهاسازی تعداد ۵۰ حباب هم به این دلیل است که ضربات حباب به صورت دسته‌جمعی و به عبارتی به صورت ابر حباب صدمه بیشتری به دیواره ونتوری وارد می‌کند.

۳-۱- بررسی اثر شعاع اولیه بر میزان فرسایش و ناحیه وقوع آن

شعاع اولیه و منحنی رشد آن در محل فروریزش و شدت ضربات وارده به دیواره تاثیر بسیاری دارد. از این رو برای بررسی این مقوله در این قسمت اختلاف فشار را ۱/۵ مگاپاسکال و فشار ورودی ۲ مگاپاسکال ابتدای نازل را در نظر گرفته شده و با این منطق، حل سیالاتی توسط نرم افزار انجام شده و سپس اطلاعات حل جریان به نرم افزار متلب انتقال داده و با کدنویسی انجام شده اثرات فروریزش و قدرت ضربات ناشی از فروریزش را مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت حباب‌های رهاسازی شده درون ونتوری برای حرکت در مسیر جریان از شعاع ۱ میکرومتر تا ۵۰۰ میکرومتر مورد آنالیز قرار گرفت.

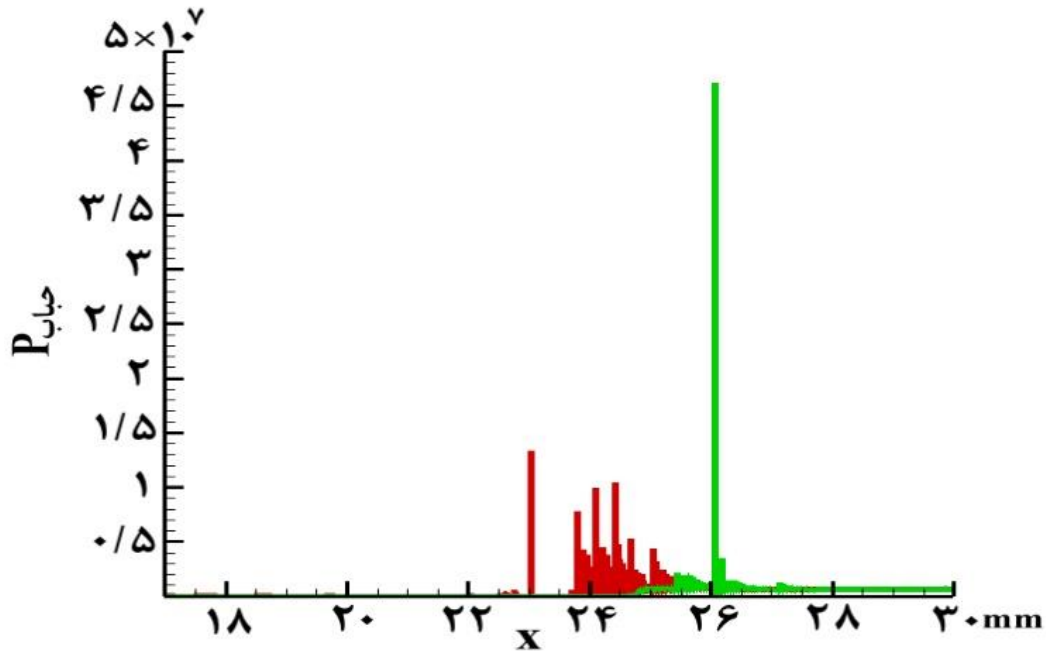
نتایج حل به اینصورت بود که رشد حباب‌ها و فروریزش آنها با توجه به شعاع اولیه به دو بخش تقسیم می‌شوند. افزایش شعاع تا اندازه مشخصی با افزایش قدرت ضربات فشاری همراه بود و با افزایش شعاع اولیه از مقدار معین قدرت ضربات فشاری کاهش محسوسی داشت.

حباب‌ها تا اندازه اولیه ۲۰ میکرومتر با افزایش قدرت ضربات به دیواره ونتوری همراه بود اما با افزایش مقدار اولیه شعاع چون حباب در مقطع ورودی ونتوری رهاسازی شده بود، حین عبور همراه سیال در ورودی پرفشار دچار فروریزش شده و پس از عبور ناحیه گلوگاه و رشد دوباره قدرت ضربات کاهش یافته و در ناحیه فرسایش کاویتاسیون قدرت تخریبی کمتری داشت. به همین دلیل محدوده معینی از اندازه اولیه شعاع برای حباب‌ها در این مقطع وجود دارد و مقدار حباب‌های بین ۵ تا ۱۵ میکرومتر بیشترین قدرت ضربات را دارند اما شعاع‌های اولیه بیشتر از ۲۰ میکرومتر اثرات کمتری دارند. به همین منظور نمودارهای قدرت ضربات فشاری ناشی از فروریزش حباب‌ها در ناحیه پس از گلوگاه و ناحیه پس از فاز بخار کاویتاسیون ونتوری به نمایش درآمده‌اند.

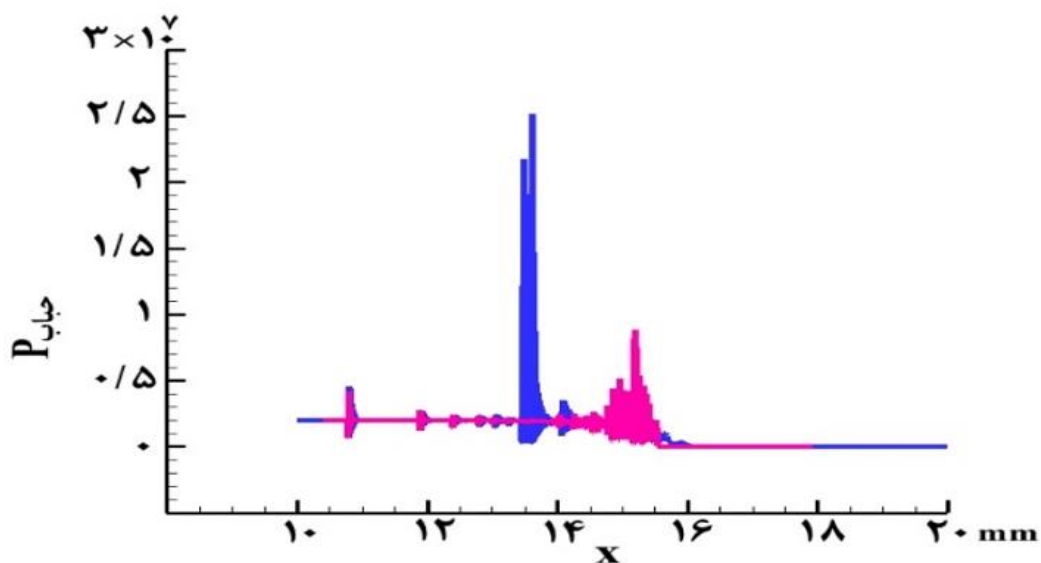
نتایج تحلیل برای چهار شعاع اولیه ۵، ۲۵ و ۱۰۰ میکرومتر را برای تحلیل نواحی فرسایش و هم‌چنین قدرت ناشی از ضربات فشاری در ناحیه پس از فاز بخار کاویتاسیون در نمودار (۴) قسمت (الف) و (ب) به نمایش گذاشته شده‌اند.

جدول ۳- داده‌های فشار در محدوده فروریزش حباب‌ها

ردیف	رنگ نمودار	شعاع اولیه حباب (میکرومتر)	بیشینه فشار حباب $\times 10^7$
۱	سبز	۵	۴/۷۱
۲	قرمز	۱۰	۱/۳۲
۳	آبی	۲۵	۲/۵۳
۴	صورتی	۱۰۰	۰/۸۸



الف- شعاع اولیه حباب ۵ میکرومتر (قرمز رنگ) و شعاع اولیه ۱۰ میکرومتر (سبز رنگ)



ب- شعاع اولیه حباب ۲۵ میکرومتر (آبی رنگ) و شعاع اولیه ۱۰۰ میکرومتر (صورتی رنگ)

نمودار ۴- شعاع اولیه برحسب قدرت فشاری ناشی از فروریزش

همانطور که از نمودار (۶-الف) مشخص است، با افزایش مقدار شعاع اولیه، قدرت فرسایش حباب‌ها تا اندازه ۱۰ میکرومتر رشد بیش از سه برابری مقدار قدرت فشاری در ناحیه فروریزش حباب‌ها مشهود است. اما در نمودار (۶-ب) مقدار شعاع اولیه ۲۵ و ۱۰۰ میکرومتر عملاً کاهش قدرت ضربات فرسایشی ناشی از فروریزش حباب‌ها را شاهد هستیم. در حباب‌های با شعاع‌های کمتر و بیشتر از این مقدار نیز وجود پیک مشخص است، اما قدرت آن در مقایسه با دیگر حباب‌ها بسیار کمتر است. به طوری که می‌توان از نقش فرسایشی این حباب‌ها در مقایسه با حباب‌های بزرگ‌تر صرف‌نظر کرد. پیش‌بینی انجام شده مبنی بر کاهش قدرت امواج فشاری (یا به عبارت دیگر کاهش قدرت فرسایش) با کاهش شعاع، با نتایج تحقیقات دیگر نیز هم سو است. از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیقات اوچییای و همکاران [۱۸] و برگلس و همکاران [۱۹] اشاره کرد. محل بیشینه شکل‌ها نیز، محتمل‌ترین منطقه برای وقوع فرسایش را نشان می‌دهد. از روی شکل مشخص است که این منطقه در محدوده ۲۵ تا ۳۰ میلی متری از ابتدای دهانه ونتوری اتفاق می‌افتد. با در نظر گرفتن طول حفره کاویتاسیون که حدوداً ۴ است، مشخص می‌شود که ناحیه انتهایی حفره کاویتاسیون، منطقه‌ای با بالاترین ریسک وقوع فرسایش است. این مطلب هنگام بررسی کاویتاسیون ثابت روی هیدروفویل توسط نپ [۲۰] در سال ۱۹۵۵ نیز به اثبات رسیده است. بنابراین مشخص می‌شود که شبیه‌سازی انجام شده در پیش‌بینی محل وقوع فرسایش نیز دقیق عمل کرده است.

با توجه به اینکه داده‌های فشار برحسب شعاع اولیه ۵ و ۱۰ میکرومتر بالغ بر ۶۰ هزار عدد و با نوسان بسیار است، به همین دلیل فقط بیشینه اعداد فشار در محدوده فروریزش در جدول (۳) مشخص شده است.

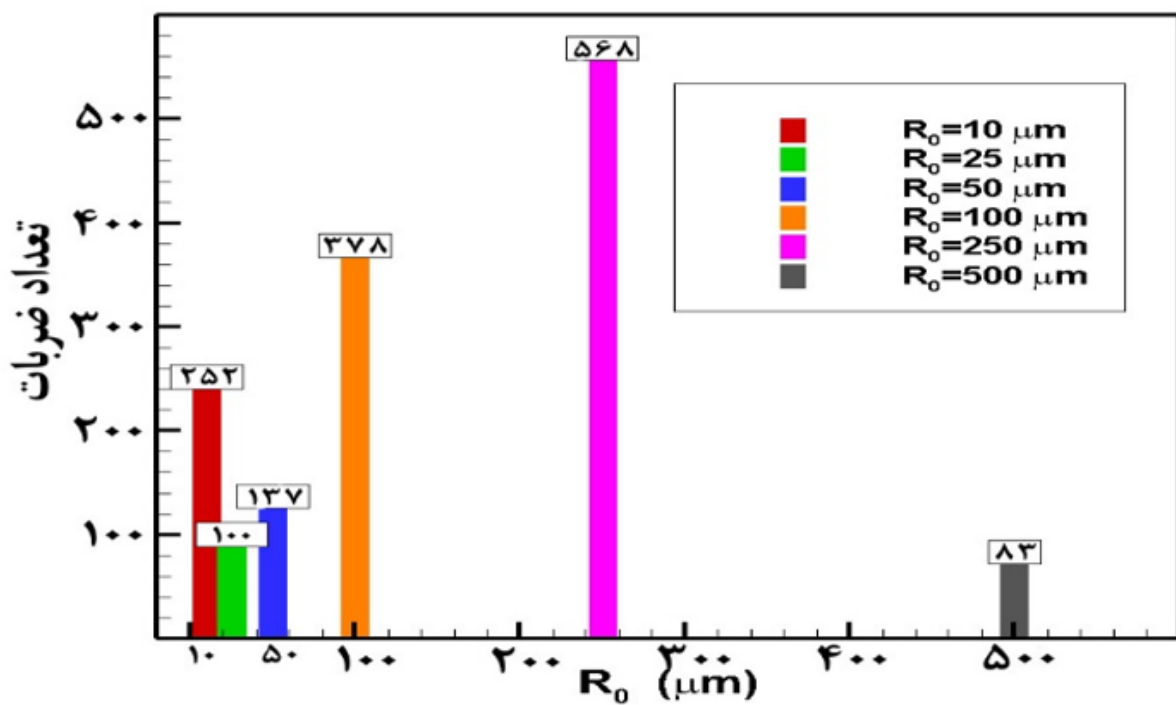
۳-۲- بررسی تعداد ضربات فشاری برحسب شعاع اولیه حباب

فرسایش ناشی از کاویتاسیون در حالتی اتفاق می‌افتد که فروریزش حباب‌ها به صورت تکراری و دائمی اتفاق بیافتد. در نتیجه هر چه تعداد ضربات بیشتر باشد (فارغ از شدت قدرت فشاری وارد بر دیواره ناشی از فروریزش حباب) می‌تواند فرسایش ایجاد شده را گسترش داده و نهایتاً منجر به خستگی، شکست و از بین رفتن قطعه شود. در این بخش با در نظرگیری اختلاف فشار ۱/۵ مگاپاسکال و فشار ورودی ونتوری در حالت ۲ مگاپاسکال به بررسی تعداد ضربات ناشی از فروریزش حباب که به دیواره حباب پالس‌های فشاری ایجاد می‌کنند می‌پردازیم.

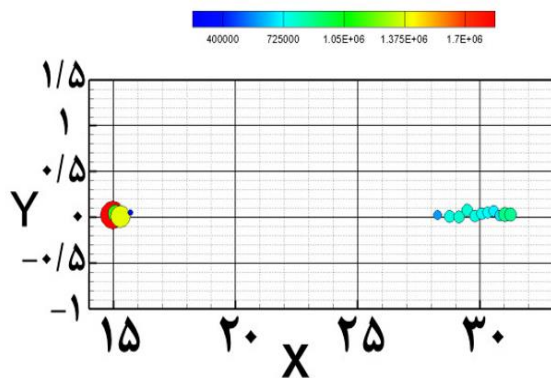
در نمودار (۵) تعداد ضربات ناشی از فروریزش حباب با توجه به شعاع‌های اولیه مختلف حباب از ۱۰ تا ۵۰۰ میکرومتر آنالیز و نتایج آن ارائه شده است. محور افقی نمودار موقعیت مکانی طول ونتوری و محور عرض آن موقعیت عرضی ونتوری را نمایش می‌دهد. دایره‌های رنگی نیز توزیع پالس فشاری ناشی از فروریزش را حین فروریزش حباب نشان می‌دهد. بیشترین تعداد ضربات در شعاع اولیه ۲۵۰ میکرومتر و کمترین آن در ۵۰۰ میکرومتر وجود دارد. اما گفته‌های بخش قبل عنوان گردید که وقتی شعاع اولیه حباب از مقدار معینی بیشتر شود، حباب به محض ورود به محیط سیال در ورودی ونتوری، دچار فروریزش شده و مابقی مسیر تا انتهای ونتوری را در حالت نوسانی و رشد شعاع بسیار کمتری از معیار مشخص شعاع اولیه طی می‌کند، در نتیجه مقدار و قدرت فشاری کمتری هم نسبت به شعاع اولیه مطابق معیار ارائه شده خواهد داشت. صحت این مطلب در نمودار (۶) قسمت (ج) به نمایش در آمده است.

مجموعه نمودار (۶) توزیع فضایی محل فروریزش سه شعاع حباب ۱۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ میکرومتر را برحسب قدرت فروریزش حباب نشان می‌دهد که بیشینه پالس‌های فشاری ناشی از فروریزش حباب در ناحیه ۲۵ تا ۴۰ میلی‌متری از ورودی ونتوری بوده (یعنی ناحیه بعد از گلوگاه) و نهایت قدرت آن در شعاع ۲۵۰ میکرومتری هم به مقدار ۷۲۵۰۰۰ پاسکال می‌رسد. پس نه قدرت فشاری و نه موقعیت آن مناسب بررسی جهت فرسایش ناشی از کاویتاسیون در محدوده انتهایی ابر کاویتاسیون نیست. به همین دلیل از بررسی شعاع‌های بزرگتر برای فرسایش صرف نظر می‌شود.

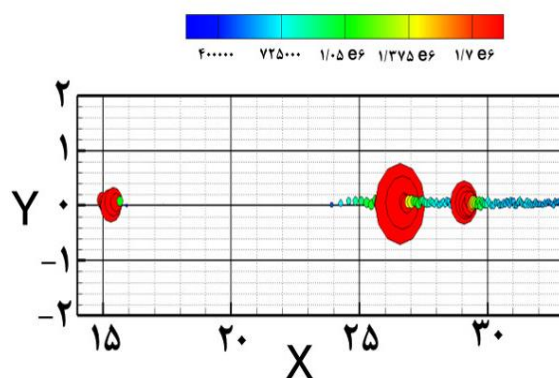
در جدول (۴) بیشینه تعداد ضربات وارد شده بر سطح با توجه به شعاع حباب و بیشینه مقدار پالس فشاری ایجاد شده به نمایش درآمده است.



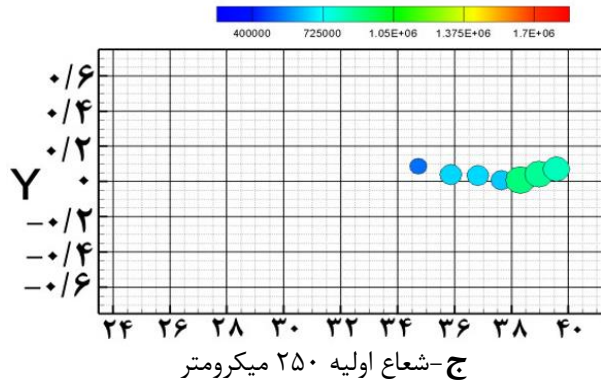
نمودار ۵- تعداد ضربات وارد شده به سطح ونتوری بر حسب شعاع اولیه حباب



ب- شعاع ۱۰۰ میکرومتر



الف- شعاع ۱۰ میکرومتر



نمودار ۶- توزیع فضایی محل فروریزش امواج فشاری بر حسب قدرت فروریزش

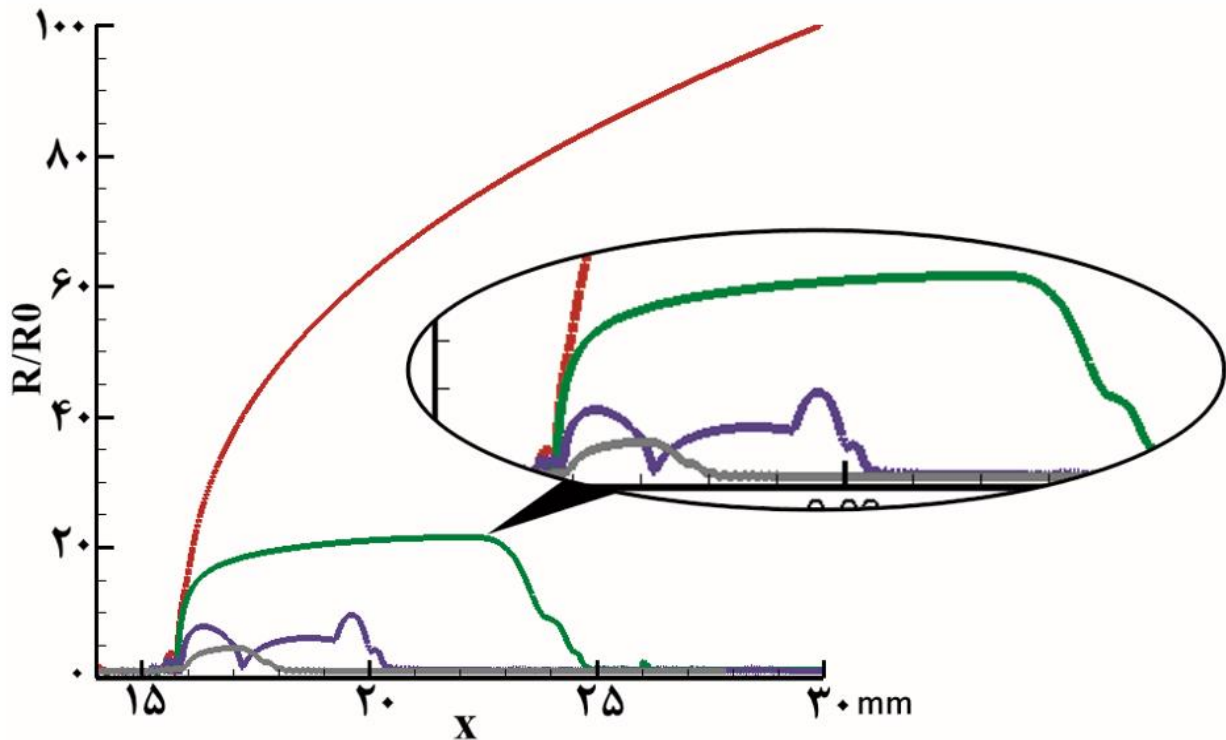
جدول ۴- بیشینه ضربات وارد شده توسط حباب بر سطح و بیشینه فشار ایجاد شده بر سطح

ردیف	شعاع (میکرومتر)	تعداد ضربات	بازه طولی بیشینه فشار ایجاد شده (میلی متر)
۱	۱۰	۲۵۲	۲۶-۲۷
۲	۱۰۰	۳۷۸	۲۸-۳۰
۳	۲۵۰	۵۶۸	۳۸-۴۰

در نتیجه پس از بررسی دوباره، محدوده شعاع حباب ۱۰۰ میکرومتر و با تعداد ۳۷۸ فروریزش و محدوده شعاع اولیه ۱۰ میکرومتر با تعداد ۲۵۲ فروریزش بیشترین تعداد ضربات و توزیع فشار ناشی از فروریزش را دارند، اما همانطور که عنوان شد به دو دلیل مقدار شعاع اولیه ۱۰۰ میکرومتر، در مقایسه با قدرت فشاری شعاع اولیه ۱۰ میکرومتر شانس چندانی برای فرسایش موثر ندارد. دلیل اول اینکه حباب با توجه به نمودار (۸-ب)، حباب با شعاع اولیه ۱۰۰ میکرومتر به محض ورود به ونتوری در محدوده ۱۵ میلی‌متری از ورودی ونتوری دچار فروریزی با قدرت ۱/۷ مگاپاسکال شده و پس از آن شعاع کوچکتر و رشد شعاعی کمتری به مسیر ادامه داده است. دلیل دوم اینکه پس از قرارگیری در ناحیه ابر کابیتاسیون با رشد در ناحیه ابر کابیتاسیون پالس‌های فشاری با قدرت نهایتاً ۷۲۵۰۰۰ پاسکالی اثر چندانی بر بدنه ونتوری نداشته است. اما با توجه به نمودار (۸-الف)، این مورد در شعاع ۱۰ میکرومتری با گستردگی توزیع از فاصله ۲۳ میلی‌متری از ورودی ونتوری تا انتهای ناحیه ابر کابیتاسیون و با قدرت بسیار بالاتر و با بیشینه قدرت ۱/۷ مگاپاسکال و توزیع بسیار نزدیک و با حجم بالاست. لذا معیار شعاع اولیه حباب بین ۵ تا نهایتاً ۲۰ میکرومتر برای رهاسازی درون ونتوری بسیار مناسب است و اثر فرسایشی به مراتب بالاتری نسبت به دیگر شعاع‌های دارد.

۳-۳- بررسی اثر اختلاف فشار در رشد حباب

در دو بخش قبلی رشد و فروریزش حباب در حالتی که اختلاف فشار ثابت و برابر مقدار ۱/۵ مگاپاسکال بود بررسی گردید. در این بخش ما به دنبال بررسی اثر اختلاف فشار ورودی و خروجی ونتوری بر روی رشد و فروریزش حباب هستیم. در این حالت با در نظرگیری شعاع ثابت حباب ۱۰ میکرومتر به عنوان معیار رشد، اختلاف فشار خروجی نازل را از ۰/۱ مگاپاسکال تا ۱/۴ مگاپاسکال تغییر می‌دهیم تا اثر رشد حباب در فشارهای متفاوت را آنالیز کنیم.



نمودار ۷- رشد حباب به ازای شعاع اولیه ۱۰ میکرومتر و اختلاف فشار از ۰/۶ تا ۱/۹ مگاپاسکال

فشار ورودی ونتوری همواره مقدار ثابت ۲ مگاپاسکال خواهد بود. در این حالت با توجه به نمودار (۷) رشد حباب‌ها در فشار خروجی ۱/۴ مگاپاسکال (نمودار خاکستری رنگ) به دلیل اینکه شروع حالت کاپیتاسیون خواهد بود بسیار کم و در نتیجه فروریزش آن نیز بسیار ضعیف خواهد بود اما در حالتی که فشار خروجی در حالت ۰/۱ مگاپاسکال باشد با توجه به اختلاف فشار بالای خروجی و ورودی ونتوری (۱/۹ مگاپاسکال)، به دلیل اینکه در قسمت دیفیوزر ونتوری فاز کاملاً بخار اتفاق می‌افتد رشد حباب به صورت تصاعدی است و متوقف نمی‌شود (تصویر قرمز رنگ) به همین دلیل در این حالت نمودار به صورت واگراست. نمودار سبز رنگ مربوط به اختلاف فشار ۱/۵ مگاپاسکال است که با توجه به توضیحات بخش قبلی به دلیل اختلاف فشار بیشتر، نسبت به حالت اختلاف فشار ۱ مگاپاسکال در جایگاه بالاتری نسبت به نمودار بنفش رنگ قرار گرفته است. به عبارتی چون اختلاف فشار ورودی و خروجی در نمودار سبز رنگ بالاست نسبت رشد حباب بالاتری به نسبت نمودار بنفش رنگ دارد. این توضیحات این نتیجه را در پی دارد که هرچه اختلاف فشار بیشتر باشد نسبت رشد حباب به ازای شعاع اولیه ثابت بیشتر خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله فرسایش ناشی از کاپیتاسیون با دیدگاه اوپلری-لاگرانژی مورد بررسی قرار گرفت. حل جریان سیالاتی توسط نرم افزار فلونت شبیه‌سازی شد و حل لاگرانژی با استفاده از معادلات کلر-میکسیس و معادلات انرژی وارد بر سطح توسعه یافته توسط سویاما و همکاران تشریح و توسط نرم افزار متلب ارزیابی شد. برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ realizable و برای مدل‌سازی کاپیتاسیون از مدل کامل

سینگهال استفاده شده است. برای اعتبارسنجی رفتار جریان از داده های تجربی قاسمی و همکاران استفاده شده که ارزیابی‌ها نشان از تطابق بسیار خوب بین شبیه‌سازی‌ها و نتایج آزمایش‌هاست. برای پیش‌بینی حرکت حباب در جریان، نیروهای وارد شده به حباب از جمله نیروی شناوری، نیروی ناشی از گرادیان فشار، نیروی پسا، نیروی ناشی از جرم افزوده و نیروی برا سا فم ن در قانون دوم نیوتون اعمال شد و معادله حرکتی حباب در دو راستای x و y به دست آمد. خلاصه نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- تحلیل رفتار حباب‌ها نشان می‌دهد که حباب‌ها هنگام رسیدن به ناحیه برگشت فشار، نوسانات شدیدی انجام می‌دهد. موج فشاری منتشر شده از حباب در این حالت به مرتبه مگاپاسکال می‌رسد و قدرت کافی برای ایجاد آسیب به سطح را دارد. محل انتشار این امواج اغلب در نزدیکی ناحیه انتهایی حفره کاویتاسیون است. بنابراین، این ناحیه به عنوان منطقه‌ای با ریسک بالای وقوع فرسایش معرفی شده است.
- مطالعه فرسایش در شعاع‌های مختلف نشان می‌دهد که شعاع اولیه حباب‌ها نقش مهمی در تعیین میزان فرسایش دارد. بطوریکه مشاهده شد با افزایش اندازه حباب‌ها تا مقدار معینی، تعداد فروریزش‌ها و همچنین قدرت آنها افزایش یافته و پراکندگی توزیع آنها در ونتوری نیز بیشتر شده است. اما افزایش شعاع پس از مقدار تعیین شده تاثیر محسوسی در فروریزش ندارد. علت این امر این است که حباب با شعاع اولیه بزرگتر به محض ورود به ناحیه پر فشار ورودی ونتوری دچار فروریزش شده و رشد آن در ادامه مسیر به کندی صورت گرفته و اثرات فروریزش آن نیز پر قدرت نیست. در این تحقیق، برای مطالعه اثر شعاع اولیه، حباب‌هایی با شعاع ۵۰۰- R_0 میکرومتر در میدان جریان رها شدند.

مراجع

- [1] K.H. Kim, G. Chahine, J.P. Franc, and A. Karimi, "Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction," *Springer, France-Jean-Pierre*, Vol. 106, pp.3-20, 2014, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-8539-6>.
- [2] J. P. Franc, J.M. Michel, "Fundamentals of Cavitation," *Springer Science & Business Media*, Vol. 76, pp.15-33, 2006, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-2233-6>.
- [3] C.E.E. Brennen, "Cavitation and Bubble Dynamics," *Cambridge University Press*, Vol.1, pp.3-5, 1995, DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107338760>.
- [4] N. Ochiai, I. Yuka, N. Motohiko, I. Toshiaki, "Study of Quantitative Numerical Prediction of Cavitation Erosion in Cavitating Flow," *University of Michigan*, Vol. 1, pp.2-3, 2013, DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4023072>.
- [5] L.N. Randall, "Rocket Applications of the Cavitating Venturi," *J American Rock Society*, Vol. 22, pp.28-29, 1952, DOI: <https://doi.org/10.2514/8.4412>.
- [6] S.G. Liou, I.Y. Chen, J.S. Sheu, "Testing and Evaluation of Small Cavitating Venturis with Water at Low Inlet Subcooling," *Proceedings of the AIP conference*, Vol. 420, pp.480-487, 1998, DOI: <https://doi.org/10.1063/1.54835>.

- [7] C. Xu, S.D. Heister, "Modeling Cavitating Venturi Flows," *J Propul Power*, Vol. 18, pp.6-7, 2002, DOI: <https://doi.org/10.2514/2.6057>.
- [8] J. Ishimoto, K. Kamijo, "Numerical Simulation of Cavitating Flow of Liquid Helium in Venturi Channel," *Cryogenics*, Vol. 43, pp.9-17, 2003, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(02\)00149-2](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(02)00149-2).
- [9] V.S. Moholkar, A.B. Pandit, "Numerical Investigations in the Behaviour of One Dimensional Bubbly Flow in Hydrodynamic Cavitation," *Chem Eng Sci*, Vol. 56, pp.7-8, 2001, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00365-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00365-1).
- [10] Y. Chen, C. Lu, L. Wu, "Modelling and Computation of Unsteady Turbulent Cavitation Flows," *J Hydrodyn Ser B*, Vol. 18, pp.59-66, 2006, DOI: [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(06\)60135-2](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(06)60135-2).
- [11] A. Ulas, "Passive Flow Control in Liquid Propellant Rocket Engines with Cavitating Venturi," *Flow Meas Instrum*, Vol. 17, pp.93-97, 2005, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2005.10.003>.
- [12] H. Ghassemi, H.F. Fasih, "Application of Small Size Cavitating Venturi as Flow Controller and Flow Meter," *Flow Meas Instrum*, Vol. 22, pp.6-12, 2011, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.05.001>.
- [13] M.Mahdi, M. Bayat Komijani, A. Katozi, "Numerical Investigation of Cavitation Flow Developed in Steady and Unsteady State in Venturi," [in persian], *Civilica*, in 4th National Conference on Computational and Experimental Mechanics, pp.6-12, 2021, <https://civilica.com/doc/1445957/>.
- [14] M. Mahdi, H. Sajadi, "Numerical Investigation of Cloud Cavitation Flow on NACA 0015 Hydrophilic Using Modified Turbulence Model," *ISME*, Vol. 18, pp.6-12, 2011, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/17445302.2022.2027690>.
- [15] L. Rayleigh, "On the Pressure Developed in a Liquid During the Collapse of a Spherical Cavity," *Philos Mag Ser 6*, Vol. 34, pp.94-98, 1917, DOI: <https://doi.org/10.1080/14786440808635681>.
- [16] J.B. Keller, M. Miksis, "Bubble Oscillations of Large Amplitude," *J Acoust Soc Am*, Vol.68, pp.628-633, 1980, DOI: <https://doi.org/10.1121/1.384720>.
- [17] H. Soyama, H. Kumano, M. Saka, "A New Parameter to Predict Cavitation Erosion," *Caltech.Edu*, Vol.Cav2001, pp.3-7, 2001, DOI: https://www.researchgate.net/publication/29687583_A_New_Parameter_to_Predict_Cavitation_Erosion.
- [18] N. Ochiai, I. Yuka, N. Motohiko, Y. Yoshiki, "Numerical Prediction of Cavitation Erosion Intensity in Cavitating Flows Around a Clark Y 11.7% Hydrofoil," *J. Fluid Sci. Technol*, Vol.5, pp.416-431, 2010, DOI: <https://doi.org/10.1299/jfst.5.416>.
- [19] G. Bergeles, L. Jason, W. Leifeng, K. Phoevos, "An Erosion Aggressiveness Index (EAI) Based on Pressure Load Estimation Due to Bubble Collapse in Cavitating Flows Within the

RANS Solvers,” *SAE Int. J. Engines*, Vol. 8, pp.15-24, 2015, DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2015-24-2465>.

[20] R.T. Knapp, “Recent Investigations of the Mechanics of Cavitation and Cavitation Damage,” *Trans. ASME*, 77, Vol. 77, pp.1045-1054, 1955, DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4014586>.

[21] A.K. Singhal, M. Mahsen, L. Huiyng, J. Yu, “Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model,” *J. Fluids Eng*, Vol. 124, pp.617-624, 2002, DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1486223>.

[22] J.D. Anderson, “Some Reflections on the History of Fluid Dynamics,” *Handbook of fluid dynamics (2nd ed.)*, Vol. 1, pp.3-11, 2016, DOI: https://www.routledge.com/rsc/downloads/Fluid_dynamics_-_chapter_2.pdf.

فهرست نمادهای انگلیسی

a	دامنه
c	سرعت صوت
D	فاصله دو حباب
F	نیرو
f	سیال
g	شتاب گرانش
h	ضریب واندروالس
k	ضریب ثابت
m	جرم
P	فشار
Q	دبی حجمی
R	شعاع حباب
r	فاصله از مرکز حباب
Re	عدد رینولدز
T	زمان
T	دما
U	سرعت
V	سرعت، حجم
y	فاصله عرضی، خط مشخصه

نمادهای یونانی

α	کسر حجمی
Γ	ضریب پخش
μ	لزجت دینامیکی
ν	لزجت سینماتیکی
ρ	چگالی
σ	تنش، کشش سطحی
τ	تنش برشی سیال
∇	دیورژانس

بالانویس‌ها

• مشتق نسبت به تغییرات زمان

زیرنویس‌ها

b حباب

c حالت بحرانی، کاویتاسیون، چگالش

D پسا

e تبخیر

ex نیروی خارجی، تحریک

f سیال

g گاز

i امتداد طولی بردار

j امتداد عرضی بردار

l مایع

m مخلوط

v بخار

w آب

Numerical Investigation of Cavitation Erosion in the Venturi using the Eulerian- Lagrangian Method

Mostafa Bayat Komijani

M.G., Faculty of Mechanical Engineering, University of Shahid Rajaii, Tehran, Iran
mbk.ares1@gmail.com

*Corresponding author: **MirAlam Mahdi**

Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Shahid Rajaii, Tehran, Iran
m.mahdi@sru.ac.ir

Abstract

Cavitation is a complex phenomenon in fluid mechanics. The occurrence of this phenomenon depends on the important factors and the different factors. The present study examined the erosion caused by collapse bubbles using the Eulerian - Lagrangian approach in a venturi. Cavitation flow in a venturi can be simulated with ANSYS - FLUENT software and with the development of a numerical code in MATLAB software, Lagrangian bubble behavior is simulated. Using the Keller - Miksis equation to simulate the variation of bubble radius and by considering different forces entering the bubble and using Newton's second law, the bubble motion equation is extracted. From the Ochiai model to evaluate the compressive strength of bubbles caused by bubble collapse on a venturi can be used and the erosion rate is studied in different conditions. The results show the erosion intensity dependent on the initial radius of bubbles, fluid type and the formation of bubbles in the flow. in this case, by increasing the initial radius of bubbles, we witnessed an increase in wear strength to 100 micron of radius, but when the radius of bubbles exceeds this value, the bubbles will be affected when the radius of bubbles is increased, and the results of the data show that the bubble radius increases in the continuation of the flow path. Although the evidence showed that the number of blows was higher, the power reduction was evident.

Keywords: Cavitation, Erosion, Venturi, Eulerian-Lagrangian method