





دانشگاه گیلان

دانشکده عمران

گروه مهندسی آب و محیط زیست

مدلسازی پدیده جدایی ستون مایع با روش وجه مشترک کاویتاسیون بخاری تعمیم یافته

سیما خسروی راد

استاد راهنما:

دکتر احمد احمدی

استاد مشاور:

مهندس علی مجد

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

اسفند ۱۳۹۲



دانشگاه سندھ

دانشکده عمران

گروه مهندسی آب و محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم سیما خسروی راد

تحت عنوان:

مدلسازی پدیده جدایی ستون مایع با روش وجه مشترک کاویتاسیون بخاری تعمیر یافته

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۲/۱۹ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	استاد مشاور	امضاء	استاد راهنما
	مهندس علی مجد		دکتر احمد احمدی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر مهدی گلی		دکتر مهدی عجمی
			دکتر امیر عباس عابدینی

حمد و سپاس مرخداى را عزوجل كه طاعتش موجب قربت است و به شكر اندرش مزيد نعمت... .

ستایش و سپاس مخصوص خدایی است که انسان را به مزیت نطق و فضیلت عقل مفتخر فرمود و نور دانش و معرفت انبیاء را چراغ راه هدایتش قرار داد. درود و سلام و تحیت و صلوات ایزدی بر ذات معظم و روح مقدس مصطفی (ص) و خاندان پاک و مطهر او باد، درودی که امداد آن به امتداد روزگار متصل باشد. *صلاة الایقوی احصاء غیرک... .*

در پایان این مرحله از تحصیل بر خود واجب می دانم که پس از حمد خدا و درود بر نبی او و پیش از هر چیز دیگر، از پدر و مادرم که در تمام طول زندگی و مراحل تحصیل دعای خیرشان پشتیبان من بوده و همواره زیر چتر حمایت ها و محبت هایشان از آسیب روزگار در امان بوده ام تشکر کنم. از همسر م که در طول مراحل انجام این پایان نامه مرا همراهی و حمایت نمود نیز سپاسگزارم.

مراتب سپاس مخلصانه و تشکر صمیمانه خود را نسبت به استاد محترم و فاضل جناب آقای دکتر احمد احمدی به عنوان استاد راهنمای این پایان نامه ابراز نموده و برای ایشان آرزوی سلامت و موفقیت روزافزون دارم. از جناب آقای مهندس علی مجد که به عنوان استاد مشاور از راهنمایی های ارزنده ایشان بسیار استفاده کردم نیز کمال تشکر را دارم.

از اساتید داور این پایان نامه، جناب آقای دکتر مهدی عجمی و جناب آقای دکتر امیر عباس عابدینی که زحمت بازخوانی و داوری این پژوهش را بر عهده داشته اند، تشکر و قدردانی می کنم.

از سایر اساتیدی که در طول دوران تحصیل از محضرشان استفاده کرده ام نیز کمال تشکر را دارم و خود را همواره وام دار دانش ایشان می دانم.

تعهد نامه

اینجانب سیما خسروی راد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران - سازه های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدلسازی پدیده جدایی ستون مایع با استفاده از روش وجه مشترک کاویتاسیون بخاری تعمیم یافته تحت راهنمایی دکتر احمد احمدی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

تقدیم بہ:

روح پاک مادرم

دریای بی کران فداکاری و عشق کہ وجودم برایش ہمہ رنج بود و وجودش برایم ہمہ مہر

و بہ پدرم کہ عالمانہ بہ من آموخت تا چگونہ در عرصہ زندگی ایستادگی را تجربہ نمایم

و بہ ہمسرم، اسطورہ زندگی ام، پناہ خستگی ام و امید بودنم

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	چکیده
۲	فصل اول
۲	۱-۱ تعریف موضوع
۶	۲-۱ ضرورت انجام تحقیق
۶	۱-۲-۱ مدل حفره ای بخار گسسته (DVCM)
۶	۲-۲-۱ مدل حفره ای گازی گسسته (DGCM)
۷	۳-۲-۱ مدل وجه مشترک کاویتاسیون بخاری تعمیم یافته (GIVCM)
۸	۳-۱ فصل بندی پایان نامه
۹	فصل دوم
۹	۱-۲ مقدمه
۱۱	۲-۲ تاریخچه ی ضربه قوچ
۱۲	۱-۲-۲ اولین مشاهدات، فشارهای کم در هنگام ضربه قوچ
۱۳	۳-۲ کاویتاسیون بخاری
۱۵	۱-۳-۲ حفره های بخار محلی
۱۵	۲-۳-۲ حفره های بخار میانی
۱۷	۳-۳-۲ کاویتاسیون بخاری گسترده یا جریان دو فازی (حبابی)
۲۱	۴-۲ بیشینه فشار ایجاد شده در اثر متلاشی شدن حفره
۲۸	۵-۲ شدت و مقدار کاویتاسیون
۳۱	فصل سوم

۳-۱	مقدمه	۳۱
۳-۲	معادلات ضربه قوچ	۳۴
۳-۲-۱	معادله پیوستگی ضربه قوچ	۳۶
۳-۲-۲	معادله حرکت ضربه قوچ	۴۱
۳-۳	معادلات جریان دو فازی برای مخلوط همگن سیال و حباب‌های بخار-سیال	۴۳
۳-۳-۱	معادله پیوستگی برای مخلوط بخار سیال	۴۴
۳-۳-۲	معادله حرکت برای مخلوط بخار-سیال	۴۷
۳-۴	معادلات ضربه برای تراکم مخلوط بخار-سیال و بازگشت به فاز سیال	۴۹
۳-۴-۱	معادله پیوستگی برای پیشانی موج ضربه	۵۰
۳-۴-۲	معادله حرکت برای پیشانی موج ضربه	۵۴
۳-۵	معادلات حفره بخار گسسته	۵۶
۵۹	فصل چهارم	۵۹
۴-۱	مقدمه	۵۹
۴-۲	مدل وجه مشترک کاویتاسیون بخاری تعمیم یافته (GIVCM)	۶۰
۴-۲-۱	روش خطوط مشخصه برای معادلات ضربه قوچ	۶۱
۴-۲-۲	انتگرال گیری تحلیلی و عددی از معادلات جریان دو فازی	۶۴
۴-۲-۳	حل تداخلی معادلات ضربه	۶۷
۴-۲-۴	انتگرال عددی معادله پیوستگی حفره گسسته	۶۹
۴-۳	حالات مختلف محتمل برای نواحی و گرهمای محاسباتی	۷۰
۴-۳-۱	تشکیل حفره بخار میانی	۷۱
۴-۳-۲	متلاشی شدن حفره بخار میانی	۷۲
۴-۳-۳	تشکیل یا گسترش ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده	۷۴
۴-۳-۴	حرکت موج ضربه	۷۷
۴-۴	مدلسازی کامپیوتری	۸۱
۴-۴-۱	عملکرد گرهمای محاسباتی داخلی	۸۴

۲-۴-۴ شرایط مرزی ۸۷

فصل پنجم ۸۹

۱-۵ مقدمه ۸۹

۲-۵ مدل آزمایشگاهی مرجع ۹۰

۳-۵ نتایج مدل عددی ۹۳

فصل ششم ۱۰۸

۱-۶ مقدمه ۱۰۸

۲-۶ نتیجه گیری ۱۰۹

۳-۶ پیشنهادات ۱۱۰

مراجع ۱۱۱

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲ فشار ثبت شده جدایی ستون. محور افقی زمان (هر نقطه نیم ثانیه) و محور عمودی فشار ۱۳	۱۳
شکل ۲-۲ خطوط نقطه چین: هد بخار، خطوط خط چین نازک: هد حالت پایدار، خطوط خط چین: هد ناپایدار. ۲۰	۲۰
شکل ۲-۳ تشکیل یک پیک فشاری دوره کوتاه (<i>a</i>) سیستم شیر لوله مخزن (<i>b</i>) انتشار موج در صفحه زمان مکان (<i>c</i>) نمودار فشار پیزومتری در شیر ۲۲	۲۲
شکل ۲-۴ نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده پالس‌های فشاری کوتاه مدت ۲۶	۲۶
شکل ۲-۵ هد ماکزیمم محاسبه شده در شیر به عنوان تابعی از سرعت اولیه (<i>a</i>) لوله به سمت پایین (<i>b</i>) به سمت بالا ۲۹	۲۹
شکل ۳-۱ حجم کنترل برای معادلات ضربه قوچ ۳۶	۳۶
شکل ۳-۲ حجم کنترل ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده، برای معادلات جریان دو فازی ۴۵	۴۵
شکل ۳-۳ حجم کنترل برای معادلات ضربه ۵۰	۵۰
شکل ۳-۴ حفره بخار گسسته در طول لوله ۵۸	۵۸
شکل ۴-۱ خطوط شبکه مشخصه در صفحه $x-t$ ۶۳	۶۳
شکل ۴-۲ حرکت پیشانی موج ضربه در محدوده محاسباتی ۶۸	۶۸
شکل ۴-۳ تشکیل حفره بخار میانی ۷۱	۷۱
شکل ۴-۴ متلاشی شدن حفره بخار میانی بین دو ناحیه کاویتاسیون بخاری ۷۳	۷۳
شکل ۴-۵ متلاشی شدن حفره در گره شیر ۷۴	۷۴
شکل ۴-۶ گسترش ناحیه بخاری از چپ به راست خط لوله ۷۵	۷۵
شکل ۴-۷ گسترش ناحیه بخاری از راست به چپ خط لوله ۷۶	۷۶
شکل ۴-۸ حرکت موج ضربه از چپ به راست خط لوله ۷۸	۷۸
شکل ۴-۹ حرکت موج ضربه از مخزن به سمت پایین دست ۷۹	۷۹
شکل ۴-۱۰ حرکت موج ضربه از راست به چپ خط لوله ۸۰	۸۰
شکل ۴-۱۱ فلوجارت مدل وجه مشترک کاویتاسیون بخاری تعمیم یافته (<i>GIVCM</i>) ۸۳	۸۳

- شکل ۴-۱۲ تشکیل کاویتاسیون و موج ضربه در یک لوله افقی ۸۶
- شکل ۵-۱ طرح سیستم آزمایشگاهی ۹۱
- شکل ۵-۲ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=0.239\text{ m/s}$ در مدل عددی ۹۵
- شکل ۵-۳ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=0.239\text{ m/s}$ در مدل عددی ۹۵
- شکل ۵-۴ نمودار فشار در گره یک چهارم بالا دست به ازای $v_0=0.239\text{ m/s}$ در مدل عددی ۹۵
- شکل ۵-۵ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=0.239\text{ m/s}$ در مدل آزمایشگاهی ۹۶
- شکل ۵-۶ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=0.239\text{ m/s}$ در مدل آزمایشگاهی ۹۶
- شکل ۵-۷ نمودار فشار در گره یک چهارم بالادست به ازای $v_0=0.239\text{ m/s}$ در مدل آزمایشگاهی ۹۶
- شکل ۵-۸ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=0.332\text{ m/s}$ در مدل عددی ۹۸
- شکل ۵-۹ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=0.332\text{ m/s}$ در مدل عددی ۹۸
- شکل ۵-۱۰ نمودار فشار در گره یک چهارم بالا دست به ازای $v_0=0.332\text{ m/s}$ در مدل عددی ۹۸
- شکل ۵-۱۱ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=0.332\text{ m/s}$ در مدل آزمایشگاهی ۹۹
- شکل ۵-۱۲ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=0.332\text{ m/s}$ در مدل آزمایشگاهی ۹۹
- شکل ۵-۱۳ نمودار فشار در گره یک چهارم بالا دست به ازای $v_0=0.332\text{ m/s}$ در مدل آزمایشگاهی ۹۹
- شکل ۵-۱۴ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=0.466\text{ m/s}$ در مدل عددی ۱۰۰
- شکل ۵-۱۵ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=0.466\text{ m/s}$ در مدل عددی ۱۰۰
- شکل ۵-۱۶ نمودار فشار در گره یک چهارم بالا دست به ازای $v_0=0.466\text{ m/s}$ در مدل عددی ۱۰۱
- شکل ۵-۱۷ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=0.466\text{ m/s}$ در مدل آزمایشگاهی ۱۰۱
- شکل ۵-۱۸ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=0.466\text{ m/s}$ در مدل آزمایشگاهی ۱۰۱
- شکل ۵-۱۹ نمودار فشار در گره یک چهارم بالا دست به ازای $v_0=0.466\text{ m/s}$ در مدل آزمایشگاهی ۱۰۲
- شکل ۵-۲۰ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=1.125\text{ m/s}$ در مدل عددی ۱۰۳
- شکل ۵-۲۱ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=1.125\text{ m/s}$ در مدل عددی ۱۰۳
- شکل ۵-۲۲ نمودار فشار در گره یک چهارم بالا دست به ازای $v_0=1.125\text{ m/s}$ در مدل عددی ۱۰۳
- شکل ۵-۲۳ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=1.125\text{ m/s}$ در مدل آزمایشگاهی ۱۰۴

- شکل ۵- ۲۴ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=1.125\text{ m/s}$ در مدل آزمایشگاهی. ۱۰۴
- شکل ۵- ۲۵ نمودار فشار در گره یک چهارم بالا دست به ازای $v_0=1.125\text{ m/s}$ در مدل آزمایشگاهی..... ۱۰۴
- شکل ۵- ۲۶ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=0.332\text{ m/s}$ در مدل عددی *DVCM*..... ۱۰۵
- شکل ۵- ۲۷ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=0.332\text{ m/s}$ در مدل عددی *DVCM*..... ۱۰۵
- شکل ۵- ۲۸ نمودار فشار در گره یک چهارم بالادست به ازای $v_0=0.332\text{ m/s}$ در مدل عددی *DVCM*. ۱۰۶

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۵- ۱ مشخصات لوله مورد آزمایش.....	۹۱
جدول ۵- ۲ مشخصات مکان های فشارسنج.....	۹۲
جدول ۵- ۳ مشخصات سیال (آب).....	۹۳
جدول ۵- ۴ خلاصه ای از اطلاعات استفاده شده در مدل آزمایشگاهی.....	۹۴
جدول ۵- ۵ خلاصه نکات مهم نتایج مدل عددی.....	۱۰۷

چکیده

نصب لوله‌ها در شبکه‌های آبرسانی، آبیاری، نیروگاه‌های آبی، نیروگاه‌های هسته‌ای و تاسیسات صنعتی از اهمیت زیادی برخوردار است. این در حالی است که بسته شدن سریع شیرها، خاموش شدن ناگهانی پمپ‌ها و اختلال در کار توربین‌ها سبب خواهد شد که تغییرات زیادی در فشار درون لوله ایجاد شود. هنگامی که جریان غیر ماندگار در شبکه ایجاد شود مشخصات جریان مانند سرعت و فشار، تغییرات بسیار سریع و قابل توجهی را نسبت به زمان خواهند داشت که سبب می‌شود در بعضی نقاط شبکه فشارهای قابل توجهی ایجاد گردد. در صورتی که این تغییرات سبب کاهش فشار به مقداری کمتر از فشار بخار سیال گردد، سیال درون لوله تبخیر شده و باعث ایجاد پدیده جدایی ستون مایع می‌گردد. در این صورت دیگر معادلات استاندارد ضربه قوچ برقرار نمی‌باشند.

هدف از این پژوهش بررسی پدیده جدایی ستون مایع و تشریح حالت‌های مختلف محتمل برای گره‌های محاسباتی است. برای دستیابی به این هدف پس از ارائه تعاریف مربوط به ضربه قوچ و جدایی ستون مایع، معادلات اساسی حاکم در حالات مختلف این پدیده بیان شده است. پس از آن با معرفی روش خطوط مشخصه و انتگرال‌گیری عددی از معادلات اساسی، مدل عددی وجه مشترک تعمیم یافته ارائه شده است که به صورت هم‌زمان با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی برای حل معادلات جدایی ستون برای انواع مشخصات لوله به کار می‌رود و حالت‌های مختلفی از عکس‌العمل بین نواحی ضربه قوچ، نواحی کاویتاسیون بخاری گسترده، حفره‌های میانی و حفره‌هایی که در مرزها تشکیل می‌شوند را لحاظ می‌کند. سپس فلوجارت برنامه کامپیوتری در نرم افزار متلب رسم شده که حالات مختلف ممکن در مقاطع محاسباتی را به سادگی نمایش می‌دهد. پس از آن نمودارهای فشار حاصل از نرم افزار در سه گره محاسباتی به ازای سرعت‌های اولیه متفاوت ارائه شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. مدل GIVCM جزء مدل‌های وجه مشترک یا ترکیبی است و با توجه به این که مدل فیزیکی فرض شده با فیزیک واقعی مسئله نزدیک می‌باشد، نتایج واقعی تر و قابل اطمینان‌تری می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان داد که این مدل به خوبی می‌تواند پدیده جدایی ستون را خصوصاً در دو پیک ابتدایی پیش‌بینی کند. اما با گذشت زمان، در زمان‌بندی مقادیر فشار اختلاف ایجاد شده و باعث بروز خطا می‌شود که یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار در این امر، فرض اصطکاک ماندگار در مدل‌های اولیه می‌باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود اثرات اصطکاک غیرماندگار در مدل‌های آتی لحاظ گردد.

واژه‌های کلیدی: جدایی ستون مایع، ضربه قوچ، جریان غیرماندگار، روش خطوط مشخصه.

فصل اول

مقدمه

۱-۱ تعریف موضوع

در بحث پیرامون تحلیل و طراحی شبکه‌های لوله که در سیستم‌های آبرسانی، نیروگاه‌های آبی، تاسیسات صنعتی و ... به کار می‌روند مبحثی مهم و گاه کنترل‌کننده تحت عنوان جریان غیرماندگار وجود دارد. تحلیل جریان غیرماندگار در سیستم لوله اهمیت بسیار بیشتری نسبت به آنالیز جریان پایدار، که اغلب به عنوان پایه‌ی طراحی سیستم لوله‌های انتقال سیالات به کار می‌رود، دارد. تاثیر جریان‌های غیرماندگار از اواخر قرن ۱۹ شناخته شده و حائز اهمیت تلقی می‌شود. ضربه قوچ^۱ پدیده‌ای است که به دنبال بسته شدن سریع شیر، از کار افتادن پمپ‌ها، اختلال در کار توربین‌ها و ... ایجاد می‌گردد که در نتیجه آن در مشخصات سیستم از

^۱ Water hammer

قبیل فشار و سرعت تغییرات بسیار ناگهانی و قابل توجهی رخ می‌دهد. این تغییرات معمولاً به صورت نوسانی ظاهر می‌شوند و طی آن با توجه به شرایط موجود اندازه فشار سیال بین یک مقدار بیشینه و یک مقدار کمینه نوسان می‌کند. معادلات حاکم بر این شرایط روابط معروف ضربه قوچ می‌باشند که عموماً به روش خطوط مشخصه^۱ تحلیل می‌گردند. حال چنانچه فشار کمینه به وجود آمده از فشار بخار سیال کمتر شود در آن ناحیه، سیال تغییر فاز خواهد داد و از فاز مایع تبدیل به فاز گاز خواهد شد که سبب ایجاد حفره^۲ های بخار در لوله می‌شود. این امر بیشتر در نقاط مشخصی همچون انتهای بسته لوله، نقاط مرتفع و خم‌ها (نقاط تغییر شیب لوله) رخ می‌دهد. پس از مدتی که فشار شروع به افزایش می‌کند و از فشار بخار سیال بیشتر می‌شود بخارات درون حفره‌ها به حالت مایع باز می‌گردند که این تغییر فاز سبب ایجاد خلأ در فضا می‌شود. حال سیالات اطراف این خلأ به علت تغییر در فشار به سرعت این ناحیه را پر می‌کنند که برخورد این دو ستون مایع باعث ایجاد کاویتاسیون^۳ و افزایش فشار ناگهانی خواهد شد. این افزایش فشار ممکن است باعث آسیب رساندن به لوله‌ها، تجهیزات هیدرولیکی و ... شود. به این پدیده به دلیل اینکه سیال درون لوله همانند یک ستون عمل می‌کند جدایی ستون مایع^۴ گفته می‌شود.

زمانی که فشار سیال کمتر از فشار بخار شود کاویتاسیون به دو صورت کلی محلی (در یک ناحیه کوچک) و گسترده (در طول لوله) تشکیل می‌شود. در حالت اول حفره بخار محلی^۵ در مرز (شیر بسته یا انتهای کور لوله) و یا در نقاط مرتفع لوله شکل می‌گیرد. همچنین ممکن است در نتیجه برخورد دو موج کم فشار این حفرات در قسمت های میانی لوله هم شکل گیرند. حفره های میانی جدا کننده‌ی دو ناحیه مایع، دو ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده و یا یک ناحیه مایع و یک ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده هستند. حالت دوم

¹ Method of characteristics

² Cavity

³ Cavitation

⁴ Liquid column separation

⁵ Local vapor cavity

جدایی ستون مایع شکل گیری کاویتاسیون بخاری گسترده^۱ می باشد که ممکن است در طول زیادی از لوله گسترده شده باشد. این حالت از کاویتاسیون هنگامی اتفاق می افتد که موجی رقیق در طول زیادی از لوله فشار را به فشار بخار سیال برساند. در هر کدام از حالاتی که به آن اشاره شد متناسب با فیزیک مسئله روابط مختلفی بر آن حاکم می باشد که این روابط و معادلات مورد بررسی قرار گرفته اند.

تمامی سیستم های انتقال سیال در معرض روشن و خاموش شدن، تغییرات ناگهانی خصوصیات جریان، خطاهای انسانی، از کار افتادگی تجهیزات و سایر اختلالات خطرناک هستند. نوسانات فشار به طراحی سیستم، پیکره بندی و چگونگی بهره برداری از آن وابسته است و پیش بینی آن کار مشکلی است، با این حال مهندسان باید با دقت تمام در طراحی لوله ها خطرات بالقوه را در نظر گیرند و نقاط ضعف را از بین ببرند. سپس بر اساس تجزیه و تحلیل دقیق جریان غیرماندگار تصمیمی آگاهانه در تقویت و ایمن سازی سیستم های خود بگیرند.

ضربه قوچ و جدایی ستون مایع می توانند اثرات بسیار مخربی بر شبکه های خطوط لوله داشته باشند. به عنوان مثال، در ۱۷ آگوست سال ۲۰۰۹ در یکی از بزرگترین نیروگاه های آبی دنیا در سد سایانوی^۲ صربستان فاجعه ای رخ داد که به واسطه ی آن ۷۶ نفر جان خود را از دست دادند. مشکل از آنجا آغاز شد که یک آتش سوزی کوچک در یکی از واحدها باعث حذف بار از روی آن و انتقال بار به واحدی دیگر گردید. افزایش فشار درون لوله آب باعث ایجاد پدیده ضربه قوچ در نزدیکی دریچه پنستاک و در نهایت انفجار آن شد. به دنبال آن یکی از ژنراتورهای آبی منفجر و هزاران لیتر آب به هوا پرتاب شد. جبران خسارات وارد آمده بر ژنراتورها، توربین ها و سازه های بتنی به کار رفته در سد هزینه ای بالغ بر ۳۱۰ میلیون دلار را وارد کرد، نفت به داخل رودخانه ینسی^۳ جریات یافت و باعث آلودگی آب شد، تعداد زیادی از افراد جان خود را از

¹ Distributed vaporous cavitation

² Sayano

³ Yenisei

دست دادند و بزرگترین کارخانه تولید آلومینیوم که ۷۰ درصد از انرژی تولید شده در این نیروگاه را مصرف می کرد از تولید ۵۰۰ هزار تن آلومینیوم باز ماند [۱]. در حادثه ای دیگر که در نیروگاه آبی اوگیاوا^۱ ژاپن در سال ۱۹۵۰ رخ داد سه نفر جان خود را از دست دادند. این حادثه به دلیل نشت روغن در سیستم کنترل و در نتیجه آن بستن سریع شیر رخ داد و در ادامه آن سبب ایجاد امواج ضربه قوچ با فشار بسیار زیاد شد، که باعث جدا شدن دریچه پنستاک^۲ گردید. همچنین به دلیل شکست در سیستم شبکه لوله و خروج آب، امواج با فشار کم (امواج منفی) ایجاد شده و باعث وقوع جدایی ستون مایع شد. در نتیجه در ناحیه ای از بالا دست خطوط لوله اختلاف فشار خارجی اتمسفر و فشار بخار سیال درونی سبب تخریب خطوط لوله گردید [۲]. این حادثه باعث شد از آن پس طراحی خطوط لوله برای فشار خارجی اتمسفر و فشار بخار برای درون لوله وارد آیین نامه ها شود. در موارد دیگری نیز گزارش شده که به واسطه وقوع این پدیده خسارات زیادی وارد شده است. نکته مهمی که در این گزارشات آورده شده، مشاهده ارتعاش و پدیده تشدید (اثر متقابل هیدرولیک و سازه) در شبکه بوده است. به این دلیل تنها مقادیر فشار ماکزیمم و مینیمم مهم نبوده بلکه زمان وقوع هر یک از آنها و ترکیب ستون های مایع که قدرت تخریب زیادی دارند نیز بسیار با اهمیت می باشد. در دو مورد از خرابی ها جدایی ستون رخ داده بود. در یک مورد سیستم هدایتگر سبب شد که شیر فلکه به طور ناگهانی باز شود و فشار منفی ایجاد شود و در ناحیه ای از لوله جدایی ستون مایع محلی به وقوع پیوست، هنگامی که ستون های سیال به یکدیگر پیوستند (متلاشی شدن^۳ حفره ها) باعث افزایش فشار شدیدی شد که نتیجه آن شکست مقطعی بتنی از پنستاک بود.

کوتمن^۴ دو حادثه مرتبط با جدایی ستون را تشریح نمود که این حوادث منجر به کشته شدن دو نفر گردید [۳]. همچنین در سال ۱۹۹۹ گزارشی ارائه شده که حاکی از خسارت شدیدی در خط لوله ای به طول ۷

¹ Oigawa

² Penstock

³ Collapse

⁴ Kottmann

کیلومتر و قطر ۶۰ سانتی متر و تاسیسات وابسته به آن وارد آمده است که علت آن را متلاشی شدن حفره‌های هوا بیان کرده‌اند [۴].

۲-۱ ضرورت انجام تحقیق

به طور کلی برای مدل‌سازی پدیده جدایی ستون مایع سه روش مختلف وجود دارد که عبارتند از:

۱- مدل حفره ای بخار گسسته^۱

۲- مدل حفره ای گازی گسسته^۲

۳- مدل وجه مشترک کاویتاسیون بخاری تعمیم یافته^۳

۱-۲-۱ مدل حفره ای بخار گسسته (DVCM)

این مدل بیشترین و گسترده ترین مدلی است که تا کنون برای مدل‌سازی جدایی ستون و کاویتاسیون گسترده به کار می‌رفته است. یکی از مزایای مهم این روش الگوریتم و اجرای ساده آن است. در این روش با کاهش فشار محاسبه شده در مقاطع محاسباتی و کوچکتر شدن آن از فشار بخار سیال، حفره‌ها تشکیل می‌شوند و با تغییرات فشار، حجم متناظر آن‌ها نیز تغییر می‌کند. در این مدل تفاوت خاصی بین حفره‌های بخار محلی و کاویتاسیون بخاری گسترده وجود ندارد. حفره‌های بخار فقط محدود به نقاط محاسباتی می‌شوند و در نتیجه فرض می‌گردد بین دو گره محاسباتی سیال وجود خواهد داشت.

۲-۲-۱ مدل حفره ای گازی گسسته (DGCM)

در این روش، برای مدل سازی گاز آزاد که در طول لوله در مخلوط همگن گسترده شده، جرم‌های گاز آزاد

¹ Discrete Vapor Cavity Model

² Discrete Gas Cavity Model

³ Generalized Interface Vaporous Cavitation Model

در مقاطع محاسباتی متمرکز فرض می‌شوند. هر حجم کوچک گاز ایزوله شده در دمای ثابت با تغییرات فشار بر اساس قانون گاز کامل منبسط و منقبض می‌شود. بین مقاطع محاسباتی یا گازهای متمرکز، سیال خالص بدون گاز فرض می‌گردد. زمانی که فشار به حدود فشار بخار کاهش یابد، ممکن است حجم‌های بزرگی از گاز در مقاطع محاسباتی شکل بگیرد. تا هنگامی که حجم گاز به مقدار مشخصی کوچک‌تر از حجم سیال بین مقاطع باشد، انتظار می‌رود که این مدل عددی نتایج منطقی ارائه نماید. در این مدل بسته‌های متمرکز گاز آزاد، گازهای به دام افتاده در جداره لوله و اتصالات و در ناهمواری سطوح و ... اثر مشابهی دارند.

۱-۲-۳ مدل وجه مشترک کاویتاسیون بخاری تعمیم یافته (GIVCM)

برای شکل دادن الگوریتم کلی این مدل از الگوریتم استاندارد مدل حفره‌ای بخار گسسته به عنوان پایه اساسی استفاده می‌شود. همان طور که گفته شد، این الگوریتم استاندارد اجازه می‌دهد حفره‌ها در مقاطع محاسباتی روش خطوط مشخصه شکل بگیرند. حال چنانچه حجم حفرات تشکیل شده در گره‌ها افزایش یابد و از حجم سیال بین نقاط بیشتر شود، چگونه می‌توان از صحت عملکرد مدل‌های پیشین اطمینان پیدا کرد؟ آیا در مدل‌های قبلی امکان کاهش فشار بخار در طولی پیوسته از لوله وجود دارد؟ آیا گره‌ای با فاز سیال قابلیت تاثیر بر روی گره‌های مجاور با فشاری برابر فشار بخار سیال را دارد؟ مدل وجه مشترک پاسخی مناسب برای سوالات ذکر شده، می‌باشد. این مدل، حالت‌های مختلفی از عکس العمل بین نواحی ضربه قوچ، نواحی کاویتاسیون بخاری گسترده، حفره‌های میانی و حفره‌هایی که در مرزها تشکیل می‌شوند، را در بر دارد که همه جنبه‌های مهمی در اصلاح کردن مدل DVCM بودند. مهمترین مشخصه در اصلاح این الگوریتم، افزودن معادلات جریان دو فازی برای مخلوط بخار سیال و همچنین استفاده از معادلات ضربه برای تراکم مخلوط بخار سیال و بازگرداندن آن به فاز سیال می‌باشد که تمامی این مباحث به تفصیل در این پایان نامه شرح داده شده‌اند. با توجه به این که مدل فیزیکی فرض شده با فیزیک واقعی مسئله نزدیک می‌باشد لذا نتایج واقعی تر و قابل اطمینان تری را ارائه می‌دهد.

۳-۱ فصل بندی پایان نامه

هدف از انجام این پایان نامه بررسی پدیده جدایی ستون مایع با روش وجه مشترک کاویتاسیون بخاری تعمیم یافته و تشریح حالت‌های مختلف آن است که مبانی و تاریخچه آن در فصل دوم توضیح داده شده است. در فصل سوم معادلات اساسی حاکم که دو معادله پیوستگی و مومنتوم می باشند، برای حالات مختلف ایجاد شده در مدل وجه مشترک بیان شده، همچنین فرضیات به کار رفته در آن ها و نحوه به دست آوردنشان شرح داده شده است. در فصل چهارم روش عددی وجه مشترک که برای مدل سازی جدایی ستون به کار می‌رود، با ارائه فلوچارتی ساده از الگوریتم این مدل و بیان حالات مختلف محتمل برای گره ها و نواحی بین آن ها، شرح داده شده است. در فصل پنجم پس از مروری کوتاه بر آزمایشات صورت گرفته، مدل آزمایشگاهی برای مقایسه نتایج معرفی شده است. در ادامه این فصل نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی با هم مقایسه شده‌اند. و در نهایت در فصل ششم جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهاداتی جهت ادامه کار آورده شده است.

فصل دوم

پیشینه و کلیات

۱-۲ مقدمه

نصب لوله‌ها در شبکه‌های آبرسانی، آبیاری، نیروگاه‌های آبی، نیروگاه‌های هسته‌ای و تاسیسات صنعتی از اهمیت زیادی برخوردار است. این لوله‌ها باید سیالات را به طور ایمن و اقتصادی جابجا کنند. این در حالی است که بسته شدن سریع شیرها، خاموش شدن ناگهانی پمپ‌ها و اختلال در کار توربین‌ها سبب خواهد شد که تغییرات زیادی در فشار درون لوله ایجاد شود. افزایش فشار در لوله باعث ایجاد پدیده ضربه قوچ و به دنبال آن نوسانات شدید در سیستم سازه‌ای و هیدرولیکی و نوسانات قابل توجهی در سیال در حال انتقال می‌شود. به ویژه کاهش قابل توجه فشار سیال در لوله و ایجاد پدیده جدایی ستون مایع باعث تشکیل حفره محلی، کاویتاسیون گسترده و وارد شدن ضربات شدیدی بر سیستم و تاسیسات زیر مجموعه آن خواهد شد.

متلاشی شدن حفره‌های بخار ممکن است باعث افزایش فشار قابل توجهی شود که در کاربردهای عملی از اهمیت زیادی برخوردار است. مجموعه این رخدادها باعث به وجود آمدن حوادث مخربی مانند آنچه در فصل اول به آن اشاره شد، می‌گردد.

برای درک بهتر پدیده جدایی ستون مایع می‌توان آن را با شکست یک میله توپر مقایسه نمود [۵]. بدین طریق که با فرض سیال موجود درون لوله که به مانند یک ستون عمل می‌نماید، ایجاد و متلاشی شدن حفره بخار در سیال مشابه شکستن و برخورد ستون جدا شده می‌باشد. عملاً هدف کلی طراحان جلوگیری از ایجاد جدایی ستون می‌باشد و طرح‌های خود را به گونه‌ای ارائه می‌دهند که امکان وقوع آن نباشد. البته مارتین^۱ در گزارشاتی آورده است که در اروپا و آمریکا طراحی برای جدایی ستون و یا پیشگیری از کاویتاسیون جای بحث و بررسی دارد [۶]. در حالی که امروزه طراحان تمایلی به قبول هیچ گونه جدایی ستون را در طرح‌هایشان ندارند. هر چند برای مقابله با آن راهکارهایی نظیر مخازن ضربه گیر، مخازن هوا و موتورهای چرخشی با ممان اینرسی بزرگ^۲ وجود دارد. روش‌های کنترل جریان ناماندگار در سیستم‌های توزیع سیال به این موضوع بستگی دارد که بسته شدن شیر، اختلال در کار پمپ و... باعث افزایش ناگهانی فشار یا کاهش ناگهانی آن شده است. برای مثال مخازن ضربه گیر باز^۳ راه حل مناسبی برای جلوگیری از ناماندگاری در هر دو مورد هستند. این مخازن تنها در نقاطی که هد فشار استاتیکی کوچک است نصب می‌شوند و دو کار مهم انجام می‌دهند: ۱- جلوگیری از افزایش فشار در یک نقطه از لوله با جمع کردن سیال در خود به هنگام خاموش شدن سیستم. ۲- جلوگیری از ایجاد کاویتاسیون با فرستادن مایع به نقاط کم فشار به هنگام شروع به کار سیستم. بسیاری از محققان به این نتیجه رسیده‌اند، چنانچه نتوان از وقوع این پدیده جلوگیری کرد لیکن می‌بایست طرح‌ها به گونه‌ای باشند که اثرات ناشی از ضربات جدایی ستون هنگام به هم

¹ Martin

² Large motor rotating moments of inertia

³ Open surge tank

رسیدن ستون‌ها (متلاشی شدن حفره) به حداقل خود برسد. مثلاً سیستم‌های آبی خنک کننده دستگاه تقطیر، سیستم‌هایی با فشار پایین هستند که به علت شرایط توپوگرافی و مشخصات کارکرد دستگاه، جلوگیری از ایجاد ماکرو کاویتاسیون‌ها امکان پذیر نمی‌باشد.

۲-۲ تاریخچه‌ی ضربه قوچ

مفهوم ضربه قوچ پیش از آنکه حتی اصطلاحی برای آن رایج باشد شناخته شده بود. در سال ۱۷۷۲ جان وایت هرست^۱ تلمبه‌ای هیدرولیکی را برای خانه‌ای در انگلستان ساخت [۷]. همچنین در سال ۱۷۹۶ مخترع فرانسوی به نام ژوسف میشل مونتگلفیر^۲ برای کارخانه کاغذ خود تلمبه هیدرولیکی ساخت [۸] و هر دوی آنان با این پدیده روبرو شدند. واژه ضربه قوچ برگرفته از دو کلمه ایتالیایی و فرانسوی است که هر دو به معنی ترکیدن تلمبه می‌باشند [۹].

در خلال نیمه دوم قرن ۱۹ و اوایل قرن ۲۰ تحقیقات زیادی درباره ضربه قوچ در اروپا انجام گرفت و نتایج آن به چاپ رسید که مفاهیم اولیه آن‌ها را می‌توان در کارهای مناب‌رآ^۳ (۱۸۵۸ و ۱۸۶۲)، میچاد^۴ (۱۸۷۸)، ون کریس^۵ (۱۸۸۳)، فریزل^۶ (۱۸۹۸)، ژاکوفسکی (۱۹۰۰) و الیو^۷ (۱۹۰۲ و ۱۹۱۳) یافت [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵]. ژاکوفسکی در سال‌های ۱۸۹۷ و ۱۸۹۸ آزمایشات کلاسیکی را در مسکو انجام داد و قانون ضربه قوچ آنی را برای یک سیستم لوله ساده ارائه نمود. در این قانون در اثر بستن سریع شیر $T_c < 2L/a$ افزایش فشار پیزومتری توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد. که این معادله به رابطه ژاکوفسکی

¹ John Whitehurst

² Joseph Michel Montgolfier

³ Ménabréa

⁴ Michaud

⁵ von Kries

⁶ Frizell

⁷ Allievi

معروف می‌باشد.

$$\Delta H = \frac{aV_0}{g} \quad (1-2)$$

در این معادله a سرعت موج فشاری، V_0 سرعت اولیه جریان، g شتاب جاذبه، L طول لوله و T_c زمان بستن شیر می‌باشد. زمان تناوب لوله، $2L/a$ ، به صورت زمان رفتن یک موج تولید شده توسط ضربه قوچ از شیر به انتهای دیگر و برگشت آن به شیر تعریف می‌شود. روابط و تحلیل‌های تئوری توسط ژاکوفسکی (۱۹۰۰) و الیو (۱۹۰۲) صورت گرفت که بر اساس آن تئوری ضربه قوچ کلاسیک بیان گردید [۱۵]. مطالب ژاکوفسکی در سال ۱۹۰۴ توسط سیمن ترجمه شد اما تلاش‌های الیو تا سال ۱۹۲۵ که ترجمه آن توسط هالمس ارائه شد، ناشناخته ماند. گیبسون (۱۹۰۸) نیز سهم زیادی در نشان دادن اهمیت پدیده ضربه قوچ دارد. او فشار وارد شده بر دریچه پنستاک در اثر بستن تدریجی دریچه‌های توربین را مورد مطالعه قرار داد.

۲-۲-۱ اولین مشاهدات، فشارهای کم در هنگام ضربه قوچ

ژاکوفسکی اولین کسی بود که پدیده جدایی ستون مایع را مشاهده و توانست آن را توصیف کند [۱۴] (شکل ۱-۲). او رخ داده‌های آزمایش مخزن، لوله، شیر را به صورت زیر شرح داد. با بستن شیر، توقف حرکت آب در لوله آغاز شده و به طور پیوسته تا ساکن شدن آب در کل طول لوله ادامه پیدا می‌کند. به موجب آن همزمان با آن سیال متراکم شده، فشار بالا می‌رود و مقطع لوله منبسط می‌شود. این وضعیت با سرعت a به سمت مخزن حرکت می‌کند. هنگامی که موج به مخزن رسید فشار به حالت قبل رسیده و موج در امتداد لوله باز می‌گردد در این حالت جریان به سمت مخزن تغییر جهت می‌دهد. با رسیدن این موج به شیر و با توجه به اینکه جهت جریان به سمت مخزن بوده و فشار برابر فشار اولیه می‌باشد. سبب کاهش فشار گردیده که مقدار آن (کاهش فشار) معادل افزایش فشار اولیه می‌باشد. حال در صورتی که سرعت اولیه جریان به اندازه کافی بزرگ باشد طبق تئوری فوق می‌بایست فشارهای منفی در لوله ایجاد گردد. به دلیل اینکه سیال

قادر به تحمل فشارهای منفی قابل توجه نخواهد بود سیال از حالت مایع خارج شده و ستون آب فوق از محل آن با شیر جدا خواهد شد و اصطلاحاً جدایی ستون رخ خواهد داد. و در جلوی آن یک فضای رقیق شده ایجاد خواهد شد. چنین وضعیتی می‌تواند در دیگر مکان‌های ستون سیال که موج با فشار کم در آن منتشر می‌شود، رخ دهد. این وضعیت، ستون جدا شده از شیر، تا زمانی که فشار کاهش یافته وجود دارد به طول می‌انجامد و سبب می‌شود موج دوم افزایش فشار قوی‌تر از موج اولی باشد. به این علت که به جای آن که محاسبه تغییر فشار از صفر صورت گیرد، از سرعتی که ستون سیال در ناحیه بخاری داشته حاصل می‌شود.



شکل ۲- ۱ فشار ثبت شده جدایی ستون. محور افقی زمان (هر نقطه نیم ثانیه) و محور عمودی فشار

۲-۳ کاویتاسیون بخاری

در بحث پیرامون جریان‌های غیر ماندگار خطوط لوله دو نوع رژیم جریان بررسی می‌شود. اولین جریان رژیم ضربه قوچ بوده که در این نوع رژیم فشار بالاتر از فشار بخار سیال بوده و کاویتاسیونی رخ نخواهد داد. نوع دوم رژیم کاویتاسیون بوده که در این روند فشار به فشار بخار می‌رسد. نوع دوم خود به دو دسته تقسیم می‌شود. برای این دسته بندی نیاز به تعریف یک پارامتر جدید می‌باشد. این پارامتر به صورت نسبت حجم بخار به مجموع حجم مخلوط سیال و بخار تعریف می‌شود و با علامت α نمایش داده می‌شود. این پارامتر به اندازه تغییرات سرعت در جریانی که در حال وقوع کاویتاسیون است، بستگی دارد. بر این اساس دو نوع

کاویتاسیون را به شکل زیر دسته بندی می‌شود [۱۶] اول کاویتاسیون بخاری گسسته^۱ یا جدایی ستون مایع محلی^۲ (α بزرگ) و دوم کاویتاسیون بخاری گسترده یا جریان حبابی (α کوچک).

بحث دیگری که در این مورد وجود دارد آغاز مرحله تبخیر می‌باشد. برای جریان‌های غیر ماندگار در مدل‌های عددی فشار بخار سیال به عنوان مرحله شروع کاویتاسیون در نظر گرفته می‌شود. هرچند نتایج برخی آزمایشات نشان دهنده آن است که این فشار از فشار بخار سیال کمتر می‌باشد (لی^۳ و همکاران) [۱۷]، به هر حال پارامترهایی که بر آن اثر می‌گذارند، ویژگی سیال، شرایط جریان، جداره‌های لوله و اثرات کشش سطحی می‌باشد.

پلست، اورتن^۴ و همکاران و ترونا^۵ توضیحات و تشریحات عمیقی را با موضوع تنش‌های کششی در سیالات ارائه نمودند [۱۸]. همچنین نتایج جدید توسط ویلیامز^۶ و همکاران [۱۹]، ویلیامز و ویلیامز [۲۰] و براون^۷ و ویلیامز [۲۱] ارائه شده است. تنش کششی برای سیال حالت فوق پایدار دارد که در حالت پدیده‌های غیر ماندگار توسط نامعادلات ترمودینامیکی توصیف می‌گردد.

شینادو و کوچیما^۸ در آزمایشات کاویتاسیون گذرا مقادیر فشار مطلق منفی کوچکی را اندازه‌گیری نمودند که علت آن را به اثرات کشش سطحی نسبت دادند. که این مطلب هنگامی که ناحیه کاویتاسیونی شامل تعداد زیادی حباب‌های ریز^۹ باشد اهمیت قابل توجه‌ای می‌یابد. اخیراً در این مورد تحقیقات جدیدی صورت گرفته است.

¹ Discrete vapor cavity

² Local liquid column separation

³ Lee

⁴ Plesset and Overton

⁵ Trevena

⁶ Williams

⁷ Brown

⁸ Shinada and Kojima

⁹ miniscule bubbles

۲-۳-۱ حفره های بخار محلی

خصوصیات یک حفره بخاری بزرگ یا جدایی ستون مایع به صورت محلی قابل بررسی است و خصوصیات محلی وابسته به خود را، دربر می گیرد. در این حالت ضریب α قابل مقایسه با یک خواهد بود (α بزرگ) و تغییرات سرعت محلی نیز بزرگ می باشد. مثالهایی از این مورد شامل موارد زیر می باشند. تشکیل حفره ها نزدیک شیرها در زمان بستن آنها، در نزدیکی توربین ها و ورودی های آن، در نقاط ارتفاعی بلند در خطوط لوله (بیشینه نسبی تراز لوله) و یا نقطه ای در میانه لوله که محل برخورد دو موج با فشار کم باشد که نتیجه آن ایجاد فشار کمتر از فشار بخار سیال است (حفره های بخار میانی).

بعد از تعریف جدایی ستون توسط ژاکوفسکی و موستوفسکی^۱، لوکنت اولین نتایج آزمایشگاهی را برای یک سیستم مخزن، لوله و شیر با بستن سریع شیر و ایجاد پدیده جدایی ستون مایع محلی ارائه داد [۲۲]. همچنین او یک روش تحلیلی ستون مایع صلب بیان نمود. او برای سازگاری نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی ضربی را معرفی نمود که مقدار آن ضریب برای هر لوله مشخص می بایست تخمین زده می شد که این امر کار را برای استفاده گسترده آن بسیار مشکل می کرد.

۲-۳-۲ حفره های بخار میانی^۲

در سال ۱۹۵۳ لاپتون برای اولین بار احتمال تشکیل یک فاصله داخلی یا حفره بخار میانی را بیان نمود [۲۳]، بدین صورت که محل این حفره در مجاورت قطعات هیدرولیکی (شیر، پمپ، توربین و ...) و یا در نقاط مرتفع نیست. مورس پس از بررسی این موضوع سوالی را مطرح کرد: با برخورد امواج ضربه قوچ چه اتفاقی خواهد افتاد؟ لاپتون در پاسخ به سوال فوق این گونه بیان نمود که اگر دو موج فشار منفی با یکدیگر تلاقی نمایند و مجموع قدر مطلق آنها از فشار اولیه (نسبی) بالاتر رود یک گپ داخلی در محل مورد نظر

¹ Mostowsky

² Intermediate vapor cavity

تشکیل خواهد شد. همچنین او مثالی را ارائه کرد که توقف آنی پمپ و پی گیری اتفاقات پی در پی در آن منجر به تشکیل یک حفره بخار میانی گردید. با تشریح این مثال مشخص شد که حفرات بخار میانی لزوماً در نقاط ارتفاعی بلند و یا تغییر شیب در خطوط لوله تشکیل نمی شوند.

اونیل^۱ در پایان نامه فوق لیسانس خود در دانشگاه ملبورن، به بررسی وقوع حفره‌های بخار میانی با استفاده از روش حل گرافیکی پرداخت [۲۴]. او در آن جا اشاره کرد که بیشتر مطالعات قبلی از تشکیل حفره بخار میانی که به عنوان یک شرط مرزی داخلی درون لوله عمل می‌کند چشم پوشی کرده‌اند. اونیل روشی را برای محاسبه تشکیل حفره‌های میانی پیشنهاد داد. او همچنین نتایج آزمایشگاهی برای یک سیستم ساده مخزن، لوله، شیر را ارائه کرد. در ادامه مطالعات شهودی برای مشاهده رشد و نابودی حفره‌های میانی با استفاده از یک دوربین با سرعت بالا انجام شد و در بررسی‌های عددی تعدادی از مثال‌های تحلیلی پالس‌های فشاری با دوره کوتاه مدت به واسطه متلاشی شدن حفره در اثر بستن شیر نشان داده شد که مقدار آن از افزایش فشار اولیه (فشار ژاکوفسکی) فراتر می‌رفت. در حالی که نتایج آزمایشگاهی ضبط شده در نمودار فشار این پالس‌های فشاری با دوره کوتاه مدت را نشان نمی‌داد. شارپ^۲ کارهای اونیل را ادامه داد و به بررسی رشد و متلاشی شدن حفره‌های کوچک بخار که توسط امواج کم تراکم ایجاد می‌شدند، پرداخت. او یک حفره کروی ایده آل را با استفاده از قوانین نیروها و قوانین اندازه حرکت تحلیل نمود [۲۵]. همچنین نتایج آزمایشگاهی که شامل عکس‌های گرفته شده با سرعت بالا از حفره‌های میانی بود را ارائه داد. شارپ در ادامه کارهای خود تشکیل نوع دیگری از حفره را مطرح کرد بدین صورت که شکل گیری آن در خلال اولین شکست و متعاقب آن گسیختگی فازها با دلیلی کاملاً متفاوت خواهد بود.

شارپ تصریح نمود که تعدادی حفره‌های کوچک، به صورت پی در پی در بازه‌های منظم در محل شیر تشکیل شده و از آن محل حرکت می‌کنند. برعکس شدن جریان غیرماندگار در طول لوله سبب خواهد شد

¹ O'Neill

² Sharp

که این حفره‌ها متلاشی شده و یک سری پالس‌های منظم فشاری با ترکیب‌های ستون‌های آب ایجاد شود. در ادامه او روش‌های حل گرافیکی را اصلاح نمود بدین طریق که فرض نمود حفره‌هایی در بازه‌های یکسان در طول لوله شکل بگیرد. در حقیقت این روش مشابه شکل گیری کاویتاسیون بخاری گسترده در خطوط لوله می‌باشد.

جردن^۱ (۱۹۶۱) جدایی ستون را در یک سیستم پمپاژ با از کارفتادگی پمپ بررسی نمود [۲۶]. او روش تحلیلی برای محاسبه محل دقیق حفره‌های میانی در طول لوله را، بهبود بخشید و اظهار داشت که محل بدست آمده برای حفره‌های میانی توسط روش استاندارد اشنايدر^۲ (۱۹۳۲) و روش گرافیکی برگرون (۱۹۳۵)، تقریبی می‌باشد و مقدار دقیقی نمی‌دهد.

سیمسون، وایلی و برگنت^۳، از تشکیل حفره‌های بخار میانی شواهد آزمایشگاهی واضح و روشنی را ارائه کردند [۲۷]. در این آزمایشات پالس‌های فشاری با دوره کوتاه مدت به خوبی مشاهده می‌شد.

۲-۳-۳ کاویتاسیون بخاری گسترده یا جریان دو فازي (حبابي)

کاویتاسیون بخاری گسترده ناحیه‌ای دو فازي است که شامل بخار و سیال می‌باشد. چنانچه گفته شد کاویتاسیون حفره‌ای محلی فقط در محل خاص و در محدوده کوچکی رخ می‌دهد اما این نوع کاویتاسیون در طولی از لوله ایجاد می‌گردد که در آن قسمت اندازه‌ی موج فشار عبوری از فشار بخار کمتر است و با ایجاد کاویتاسیون در آن ناحیه، فشار در حدود فشار بخار ثابت می‌ماند. نسبت تخلخل^۴ (α) در نواحی که کاویتاسیون بخاری گسترده رخ داده است مقداری بسیار کم را (حدود صفر) داراست.

¹ Jordan

² Schnyder

³ Simpson, Wylie, Bergant

⁴ Void fraction

تفاوت بین جدایی ستون محلی و کاویتاسیون گسترده در لوله‌ها اولین بار توسط نپ^۱ (۱۹۷۳) در دومین گردهمایی ضربه قوچ ارائه گردید که در حقیقت تکمیل کارهای قبلی او بود. او مثالی را آورد که در آن افت فشار توسط شکست لوله در مجاورت یک شیر با بستن سریع آن رخ داد. امواج منفی که بدون تغییر به سمت بالا دست حرکت می‌کردند، سبب شد که پیشانی موج بدون آن که خط فشار صفر را قطع کند مسیر خود را ادامه دهد. در حقیقت خط فشار روی خط فشار صفر باقی مانده بود، که باعث شد در فاصله بین مخزن تا آن نقطه کاویتاسیون به طور نسبی رخ دهد، اما جدایی در ستون سیال ایجاد نشود. بازگشت موج ضربه قوچ از مخزن سبب بازگرداندن به حالت قبل (شرایط بدون کاویتاسیون) با افزایش فشار متناظر آن شد. او در نهایت چنین نتیجه گرفت که تحقیقات بیشتری لازم می‌باشد تا اینکه وضعیت ضربه قوچ همراه کاویتاسیون به طور کامل مشخص گردد.

او همچنین در سال ۱۹۳۹ مفاهیم کاویتاسیون بخاری را در مقاله‌ای دیگر به بحث گذاشت و آن را تکامل بخشید و در نهایت در نتیجه گیری از آن تصریح کرد که در مواردی که کاویتاسیون بخاری ایجاد می‌شود نمی‌توان از روش حل گرافیکی بهره جست.

دهالر و بدو^۲ (۱۹۵۱) رفتار و عملکرد تحلیلی جدایی ستون مایع را برای انتشار یک موج کم فشار در یک لوله به سمت بالا ارائه نمودند [۲۸]. آن‌ها پیشنهاد کردند که به جای آن که یک حفره در یک مقطع سریعاً و تماماً تشکیل گردد، می‌تواند حفره‌هایی در طول لوله در مقاطع مختلف شکل بگیرند. لاپتون^۳ در سال ۱۹۵۳ خلاصه‌ای از روش‌های گرافیکی را ارائه نمود که در آن‌ها یک مقطع به عنوان "جدایی ستون‌های آب" اختصاص داده می‌شد که در آن رساله مسائل ضربه قوچ را در سیستم‌های پمپاژ بررسی می‌کرد. همچنین او به توصیف وقایع و تغییراتی پرداخت که به صورت پی در پی رخ می‌دهند تا اینکه منجر به

¹ Knapp

² Dehaller and Bedue

³ Lupton

تشکیل یک ناحیه کاویتاسیون بخاری گردد. او در آن جا جدایی ستون محلی و ناحیه کاویتاسیون گسترده را از یکدیگر تفکیک نمود. در ادامه انتقال یک موج منفی در امتداد یک لوله بدون اصطکاک رو به بالا مورد بررسی قرار گرفت. این موج سبب افت فشار می‌شود به طوری که در هر مکانی که آن موج عبور کند، فشار برابر فشار بخار می‌گردد.

جردن در سال ۱۹۶۵ تحقیقاتی را بین دو نوع کاویتاسیون بخاری محلی و کاویتاسیون بخاری گسترده انجام داد [۲۹]. سیستم مورد مطالعه شامل یک سیستم پمپاژ و لوله‌هایی با شیب افقی، شیب رو به بالا و شیب رو به پایین بود. او در این بررسی روش تحلیلی کاویتاسیون بخاری گسترده را برای آن نواحی بهبود بخشید. همچنین مطالعاتی روی اثر خط تراز هیدرولیکی (HGL) و شیب لوله بر روی تشکیل نواحی کاویتاسیون گسترده انجام داد که نتایج آزمایشگاهی و آنالیز عددی رفتار نسبتاً منطقی را نشان می‌دادند که آزمایشات مذکور در در آزمایشگاه تربوانستیتو لبعیانا در کشور اسلوونی انجام شد. وسایل آزمایشگاهی به کار برده شده شامل یک شیر بالا دست با بستن سریع و یک لوله با جهت شیب به سمت بالا می‌شد.

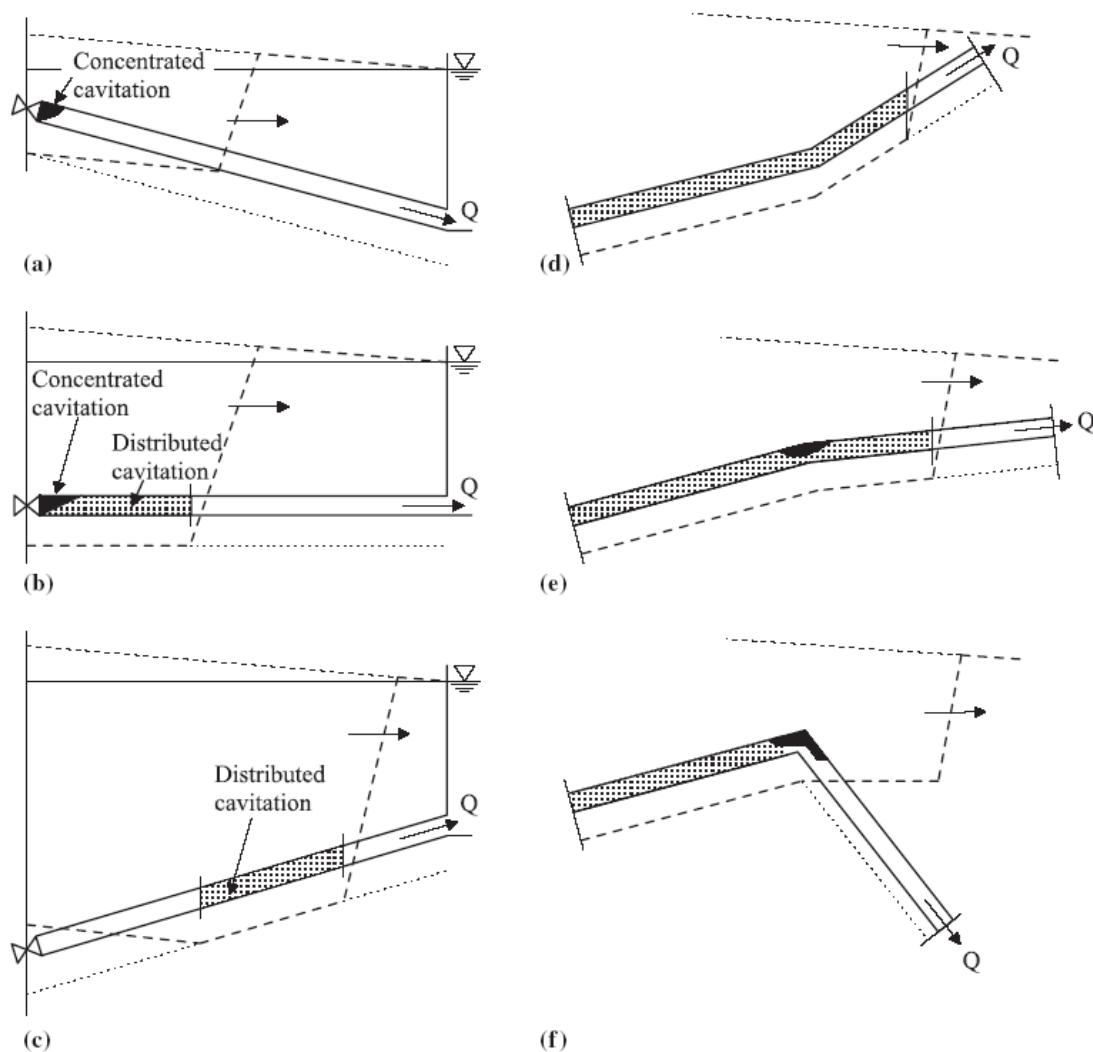
در ادامه تحقیقات کرانبورگ^۱ چنین بیان نمود که با عبور یک موج منفی ممکن است در قسمتی از لوله ناحیه کاویتاسیون بخاری ایجاد گردد [۱۶]، که ناشی از کاهش فشار استاتیکی در جهت انتشار موج، به واسطه وجود اصطکاک و یا شیب لوله باشد. از سوی دیگر چنانچه فشار استاتیکی در جهت انتشار امواج کاهش یابد، امکان ایجاد یک ناحیه کاویتاسیون بخاری نخواهد بود (شکل ۲-۲۰).

این نوع از کاویتاسیون ممکن است در طول زیادی از لوله گسترش پیدا کند. که برای تغییرات کوچک سرعت معمولاً مقدار نسبت تخلخل بسیار کوچکتر از یک می‌باشد. کاهش در تغییرات فشار سبب می‌شود که هنگام عبور موج ضربه قوچ در طول لوله تغییرات سرعت کمتری ایجاد شود. در نتیجه ذرات سیال با گذر موج در نهایت سرعت بیشتری نسبت به ذرات اولیه دارند که سبب می‌شود در زمانی که موج منفی فشار را

^۱ Kranenburg

به فشار بخار می‌رساند، سیال مدت زمان بیشتری در حالت جدا شده قرار داشته باشد.

آزمایشات گسترده‌ای که توسط سیمسون [۳۰]، برگنت [۳۱] و وایلی صورت گرفت، وقوع کاویتاسیون بخاری گسترده را روشن و آشکار نمود. سیمسون و وایلی در سال ۱۹۸۹ با ارائه یک مثال تشریحی نشان دادند که نواحی کاویتاسیون بخاری گسترده چگونه تشکیل می‌شوند.



شکل ۲-۲ خطوط نقطه چین: هد بخار، خطوط خط چین نازک: هد حالت پایدار، خطوط خط چین: هد ناپایدار.

(چپ) ایجاد کاویتاسیون به وسیله بستن سریع شیر (a) لوله به سمت پایین (b) لوله افقی (c) لوله به سمت بالا. (راست)

تشکیل کاویتاسیون به وسیله زانو (a) افزایش شیب (b) کاهش شیب اما همچنان رو به بالا (c) شیب رو به پایین

۴-۲ بیشینه فشار ایجاد شده در اثر متلاشی شدن حفره

انگس^۱ در سال ۱۹۳۵ یکی از اولین مقاله‌هایی که در مورد پالس‌های فشاری بزرگ با دوره‌ی کوتاه مدت که به واسطه متلاشی شدن حفره در لوله‌ها ایجاد می‌شوند را ارائه نمود [۳۲]. در یکی از مثال‌ها با برخورد یک ستون مایع به یک شیر انتهایی بسته شده سبب شد یک پالس فشاری با زمان کم و اندازه بسیار بزرگ ایجاد شود. مدت زمان پالس فشاری در حدود یک دهم دوره تناوب لوله تعیین شد.

هیت^۲ در پایان نامه خود در انستیتو تکنولوژی جورجیا به بررسی جدایی ستون سیال محلی پرداخت که در آن جا هر دو روش تحلیلی، روش غیرقابل تراکم (ستون صلب)^۳ و روش تراکم پذیری کم (الاستیک)^۴ بیان شدند [۳۳]. برای تراکم پذیری کم از روش حل گرافیکی استفاده شد که در نتایج آن پالس فشاری با دوره کوتاه در اثر متلاشی شدن حفره مشاهده شد. اما این پالس‌های فشاری در نتایج آزمایشگاهی که توسط او صورت گرفته بوده مشاهده نگردید.

چنانچه در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود در اثر متلاشی شدن حفره یک پالس بزرگ فشاری با دوره زمانی کوتاه^۵ ($t < 2L/a$) ایجاد شده است. برگنت در سال ۱۹۹۲ در رساله‌ی دکتری خود این پدیده را به صورت زیر توصیف می‌کند [۳۰، ۳۱]. او در آن جا با فرض یک سیستم مخزن، لوله افقی و شیر که به صورت سریع بسته می‌شود و همچنین صرف نظر از اصطکاک که اثرات جزئی دارد به شرح مسئله پرداخته است. در ابتدا خط گرادیان هیدرولیکی ثابت بوده و با بستن آنی شیر جریان سیال متوقف می‌شود. بالا رفتن هد (فشار) در شیر توسط رابطه ژوکوفسکی (۱-۲) بدست خواهد آمد. بعد از گذشت زمان امواج به سمت مخزن رفته و سپس با بازگشت امواج، به شیر می‌رسند. در شکل ۲-۳ b نمودار حرکت رفت و برگشت امواج در طول لوله

¹ Angus

² Heath

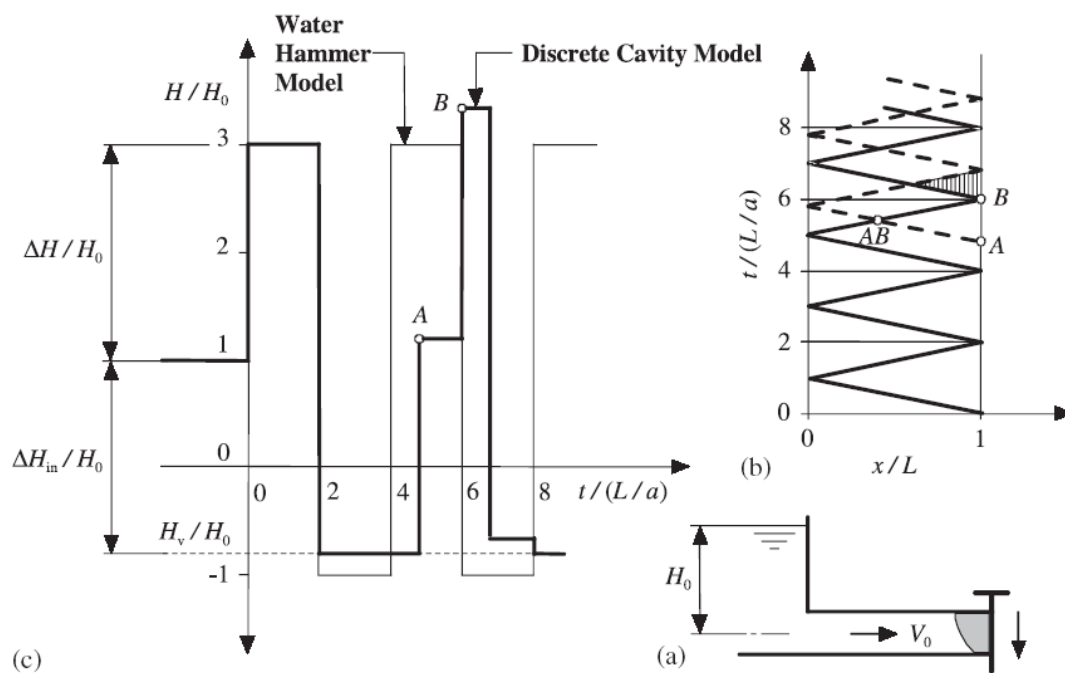
³ Incompressible (rigid-column)

⁴ Weakly-compressible (elastic)

⁵ Large short duration pressure pulse

نشان داده شده است، همچنین در این شکل قسمت c نمودار فشار در برابر زمان در محل شیر مشاهده می‌شود که خط نازک بیانگر ضربه قوچ معمولی بدون در نظر گرفتن اثرات فشار بخار (کاویتاسیون) و خط ضخیم نشان دهنده مدلی است که اثرات کاویتاسیون (مدل تک حفره‌ای) اعمال شده است.

امواج فشاری به سمت مخزن حرکت کرده و بعد از گذشت $2L/a$ از بستن شیر امواج بازگشتی منفی به شیر بسته شده می‌رسند. برای اینکه سیال به طور کامل ساکن شود می‌بایست فشار به اندازه فشار ژاکوفسکی ($\Delta H = -aV/g$) کاهش یابد. این کاهش فشار سبب می‌شود که فشار از فشار بخار سیال کمتر شود (خط باریک). در حالی که با رسیدن فشار به فشار بخار، کاهش فشار متوقف می‌شود.



شکل ۲-۳ تشکیل یک پیک فشاری دوره کوتاه (a) سیستم شیر لوله مخزن (b) انتشار موج در صفحه زمان مکان (c) نمودار فشار پیزومتری در شیر

در این حالت سرعت سیال به صفر نمی‌رسد و مقدار سرعت باقی مانده را می‌توان از رابطه (۲-۲) محاسبه نمود.

$$V_0 - \Delta V_{vc} = V_0 - \frac{g(H_0 + H_b - p_v^* / \gamma)}{a} \quad (2-2)$$

که در آن H_0 فشار استاتیکی در شیر، H_b ارتفاع بارومتری و p_v^* فشار مطلق بخار در دمای T و γ وزن مخصوص سیال است.

بنابراین در کنار شیر جریان همچنان به سمت مخزن در حرکت است و سبب می‌شود که سیال از شیر جدا شده و یک حفره شروع به رشد کردن کند. این حفره همانند یک شرط مرزی عمل می‌کند که در آن فشار ثابت است (p_v). جریان سیال در هربار رفت و برگشت موج، که به حفره برخورد کند به اندازه ΔV_{vc} از سرعت آن کاسته خواهد شد. تا اینکه سرعت صفر شده و سپس مقدار سرعت مثبت گردد. هنگامی که جهت جریان دوباره عکس شده و سرعت مثبت می‌گردد حفره شروع به منقبض شدن می‌کند تا اینکه حفره کاملاً از بین برود (نقطه A در شکل ۲-۳ c). در اثر متلاشی شدن حفره افزایش فشار ناگهانی ایجاد می‌شود. ارتفاع هدی که مستقیماً توسط متلاشی شدن حفره ایجاد می‌شود از مقدار هد اولیه ایجاد شده کمتر می‌باشد. اما در مجموع هد ایجاد شده مقدار بیشتری را از فشار ژاکوفسکی خواهد داشت که در این مثال زمان وقوع آن حدود $6L/a$ می‌باشد (نقطه B در شکل ۲-۳). این موج در واقع اثر همزمان هد ناشی از متلاشی شدن حفره و امواج برگشتی از مخزن که در اثر بسته شدن شیر ایجاد شده‌اند، می‌باشد و سبب می‌شود که این هد از مقدار فشار ایجاد شده توسط رابطه ژوکوفسکی بیشتر شود (خط توپر ضخیم). در حقیقت اگر متلاشی شدن حفره دقیقاً در زمان رسیدن امواج فشاری از مخزن صورت بگیرد و نیز تغییرات سرعت را نداشته باشیم دیگر پالس مورد نظر با مدت زمان کوتاه، ظاهر نخواهد شد. همچنین واپلی و استریتر توضیحات دقیق و جزئی درباره تشکیل پالس فشاری با مدت زمان کوتاه را ارائه داده و در مورد زمان وقوع اولین حفره بخار رابطه زیر را ارائه دادند.

$$T_{cs} = \frac{2a}{g\Delta H_{in}} V_0 \frac{L}{a} = \frac{V_0 a}{g\Delta H_{in}} \frac{2L}{a} = \frac{\Delta H}{\Delta H_{in}} \frac{2L}{a} \quad (3-2)$$

در رابطه فوق ΔH_{in} افت فشار در زمانی است که تبخیر شروع می‌شود و برابر است با

$$\Delta H_{in} = H_0 + H_b - p_v^* / \gamma \quad (4-2)$$

فشار ایجاد شده توسط از بین رفتن حفره را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد. مولفه اول توسط فشار ناشی از سرعت ستون مایع در شیر، در لحظه قبل از متلاشی شدن حفره و دوم مولفه ایجاد شده توسط فشار ماکزیمم در لوله در لحظه‌ی قبل از متلاشی شدن حفره، که به وسیله معادله زیر بیان می‌شوند.

$$H_{max} = \frac{a}{g} |V_f| + 2H_{RV} \quad (5-2)$$

که در آن V_f سرعت ستون مایع در شیر در لحظه‌ی قبل از، از بین رفتن حفره است و H_{RV} اختلاف بین تراز مخزن پایین دست و تراز هد فشار بخار در شیر می‌باشد. معادلات مشابهی توسط ماشنین^۱ [۳۴] و سیمسون و وایلی [۳۵] و وایلی و استریتر برای حالتی که یک شیر پایین دست به طور آنی بسته شود ارائه شد که مقدار فشار ماکزیمم توانست تا دو برابر مقدار فشار ژاکوفسکی بدست آید. استفاده از این روابط هنگامی که حفره‌های میانی تشکیل شدند ممکن است منجر به نتایج اشتباه شود. کاتمن با استفاده از تئوری ستون صلب نشان داد که از بین رفتن حفره میانی می‌تواند افزایش فشاری به مقدار سه برابر فشار ژاکوفسکی ایجاد کند [۳].

لی و والش^۲ برای بستن غیرخطی این پیشنهاد را دادند که اگر کاهش دبی شیر از زمان بستن آن تا شروع

¹ Moshnin

² Li and Walsh

جدایی ستون مایع به صورت خطی صورت گرفته باشد، ماکزیمم فشار در لوله قبل از متلاشی شدن حفره برابر H_{RV} بوده است [۳۶]. همچنین آنان برای اثبات روش‌های تحلیلی خود آزمایشاتی با لوله پلاستیکی ۲ اینچی انجام دادند. والش در مقاله‌ای دیگر نتایج تعدادی از آزمایشات را ارائه نمود. در مجموع نتایج آزمایشگاهی ارائه شده اختلاف گام‌های کوچکی در نمودار فشار و پالس‌های فشاری با بازه زمانی کوتاه مدت به واسطه متلاشی شدن حفره از خود نشان می‌داد.

یاماگوچی و ایچیکاوا^۱ در سال‌های ۱۹۷۶ و ۱۹۷۷ نمودارهایی از نتایج آزمایشگاهی که به خوبی و با دقت کافی پالس‌های فشاری با دوره کوتاه مدت را نشان می‌داد ارائه نمودند [۳۷]. در آزمایشات آنان بستن یک شیر پایین دست و یک شیر بالا دست مورد بررسی قرار گرفت. که در آن جا جدایی ستون نفت در جریان آرام مورد توجه بود. همچنین تصاویری از تشکیل و متلاشی شدن حفره در کنار شیر نشان داده شد.

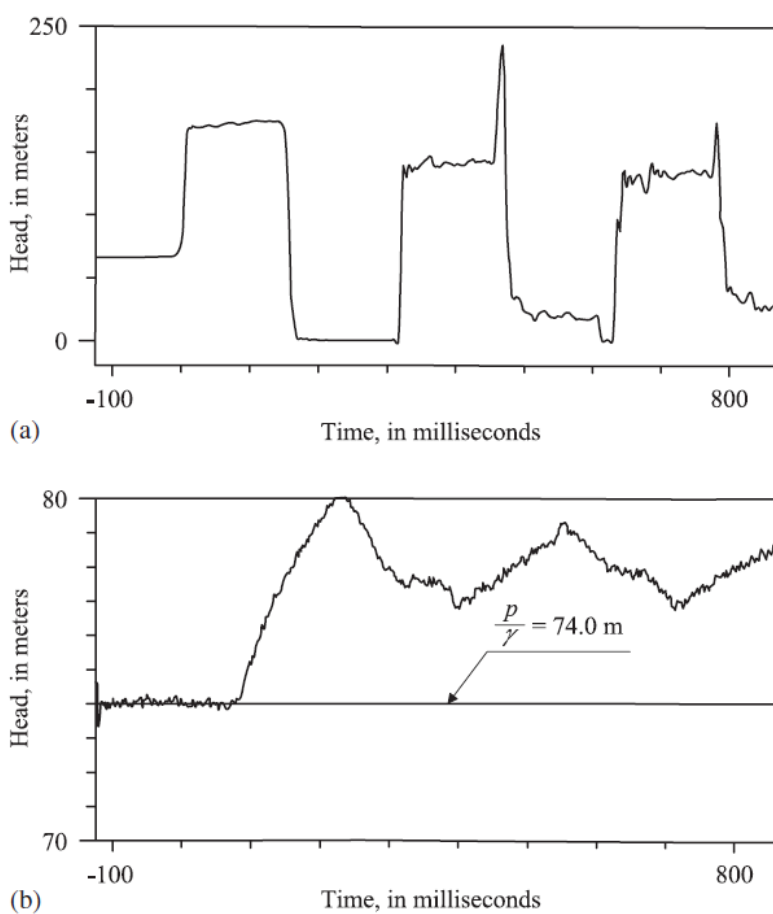
گاتلیب^۲ و همکاران اواخر سال ۱۹۸۱ تحقیقاتی را در مورد فشار ماکزیمم ایجاد شده در اثر نابودی حفره‌ها انجام دادند [۳۸]. آن‌ها در ارائه خود نتایج آزمایشگاهی و حل عددی را آوردند. مدل عددی یک مدل ساده حفره‌ای گسسته بود که برای هر گره بر اساس روش وایلی و استریتر ۱۹۶۷ محاسبه می‌شد. در آن جا چهار حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت که شامل لوله‌های فولادی و پلاستیکی می‌شد. در آزمایشات آن‌ها قله‌های بلند فشار که سریعاً در ادامه متلاشی شدن حفره ایجاد می‌شد، به ثبت رسید. پس از این افزایش فشار، مقدار فشار به اندازه ۴۰٪ فشار ماکزیمم رسیده و در حدود ۲ برابر L/a ثانیه در همین سطح باقی می‌ماند. در نهایت محققان آن به این نتیجه رسیدند که فشارهای ماکزیمم می‌تواند ناشی از ترکیب فشارهای پیک مرتبط با ترکیدن حباب‌های گاز در پمپ باشد.

مارتین در سال ۱۹۸۳ به تحقیق و اندازه‌گیری کاویتاسیون گذرا در یک سیستم ساده شیر، لوله، مخزن پرداخت [۳۹]. سیال مورد استفاده، آب با مقدار کمی گاز نامحلول بود. در این مطالعه بر خلاف نتایج

¹ Yamaguchi and Ichikawa

² Gottlieb

آزمایشات گذشته که کاویتاسیون شدیدی مشاهده می‌شد، کاویتاسیون محدودتری (مدت زمان کمتری حفره در مجاورت شیر وجود داشت) مشاهده شد. البته همچون گذشته دیده شد که اگر پالس فشاری با بازه کوتاه شکل بگیرد، ممکن است فشار ماکزیمم از فشار ژاکوفسکی فراتر برود (شکل ۲-۴). متأسفانه در این آزمایش فشار مخزن در خلال انجام آزمایشات به علت کوچکی اندازه تانک افزایش پیدا کرد. اندازه گیری فشار مخزن که در شکل ۲-۴ (نمودار پایینی) نشان داده شده است، برای تمام آزمایشاتی که در این رابطه انجام شده، مورد توجه بوده است.



شکل ۲-۴ نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده پالس‌های فشاری کوتاه مدت

گراز و هولچر^۱ (۱۹۸۳) در مورد احتمال وقوع قله‌های فشار شدید در ادامه متلاشی شدن حفره به تحقیق و

^۱ Graze and Horlacher

آزمایش پرداختند [۴۰]. قبل از آن در مورد پیک‌های فشار شدید در ابتدای از بین رفتن حفره، گزارشاتی ارائه شده بود. در نتیجه آنان مطالعه خود را بر روی افزایش فشار متمرکز کردند. نتایج عددی بر مبنای مدل حفره‌ای بخار گسسته که هوا و یا گاز آزادی وجود نداشت صورت گرفته بود که تطابق مناسب و منطقی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد. آزمایشات مختلفی با انواع مختلف مشخصات لوله انجام شد که زمان حضور اولین حفره تقریباً ۱۶ تا ۲۰ برابر L/a اندازه گیری شد. البته پالس‌های فشاری کوتاه در این آزمایشات مشاهده نشدند که احتمالاً به دلیل زمان نسبتاً طولانی باقی ماندن حفره در مجاورت شیر بوده است. این محققین از دو نوع اندازه گیر القایی^۱ و فشارسنج مقاومتی^۲ استفاده نمودند که حس گرهای القایی (از نوع گیج کرنشی)^۳ مقادیر بیشتری را نشان می‌داد. همچنین مقادیر فشار کمتر از فشار بخار نیز مشاهده گردید. اندازه گیرهای القایی پیک‌های فشاری مختلفی را نشان می‌دادند.

المیداً^۴، توزیع سرعت غیریکنواخت، تاثیر اصطکاک غیرماندگار، تاثیر ستون الاستیک و اثرات نقطه ای و محلی را دلایل ممکن برای افزایش فشار ناشی از متلاشی شدن حفره بیان نمود [۴۱].

کوجیما مدلی ریاضی برای پیش بینی افزایش فشار به همراه متلاشی شدن حفره و مدت زمان جدایی ستون ارائه داد. همچنین تصاویری از شکل گیری حفره و از بین رفتن آن در پایین دست شیر نشان داد. نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده‌ی پالس های فشاری با دوره‌ی کوتاه بودند. همچنین در مطالعات او تاثیر اصطکاک غیر ماندگار نیز بررسی شد [۴۲].

سیمسون در رساله‌ی دکتری خود مجموعه‌ای از پالس‌های فشاری کوتاه مدت اندازه گیری شده در یک سیستم شیر، لوله، مخزن با شیب روبه بالا را ارائه نمود [۳۰]. به دلیل شیب لوله، در بالای لوله حفره بخار

¹ Inductive transducer

² Piezo resistive transducer

³ Strain-gage type

⁴ De Almeida

به صورت محدود شده در مجاورت شیر باقی مانده و در طول لوله کاویتاسیون گسترده ایجاد نگردید (تا زمان از بین رفتن اولین حفره).

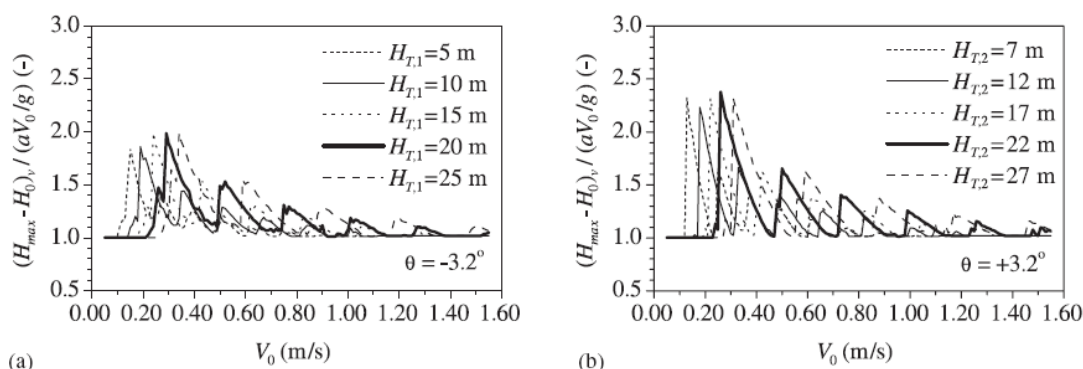
۲-۵ شدت و مقدار کاویتاسیون

محل و شدت جدایی ستون مایع به عوامل و پارامترهای مختلفی بستگی دارد که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. یکی از عوامل، تشکیل رژیم غیر ماندگار (ضربه قوچ) است که در اثر عواملی مانند بسته شدن سریع شیر، خرابی و از کار افتادگی پمپ و اختلال در عملکرد توربین ایجاد می‌شود. علت دوم طرح خطوط لوله است که شامل ابعاد لوله‌ها، پروفیل طولی و موقعیت شیرها است و علت آخر خصوصیات هیدرولیکی است که در این عامل پارامترهای سرعت جریان پایدار، هد فشار استاتیکی، اصطکاک سطح، ویژگی‌های کاویتاسیون سیال و جداره‌های لوله دخالت دارند. بنابراین برای مشخص کردن یک معیار طراحی با توجه به پارامترهای قابل توجه ذکر شده، با مشکلاتی رو به رو خواهیم بود. مثلاً برای یک سیستم ساده مخزن، لوله، شیر فشار بعد از متلاشی شدن حفره‌ها ممکن است از فشار ژوکوفسکی بیشتر شده و یا به آن مقدار نرسد.

برگانت و سیمسون در سال ۱۹۹۹ یک آنالیز عددی پارامتری را برای دسته بندی رژیم‌های مختلف جدایی ستون مایع بر اساس فشار ماکزیمم انجام دادند [۲۵]. در این بررسی که از سیستم مخزن، لوله، شیر استفاده شد، شرایط جریان بحرانی طبق آنچه از قبل بیان شد، محاسبه گردید. طیف گسترده ای از مقادیر برای سرعت اولیه جریان، فشار استاتیکی بالا دست در تانک و شیب لوله در نظر گرفته شد [۴۳]. همچنین مقیاس زمانی L/a و زمان بستن شیر، ثابت در نظر گرفته شد. نتایج حاصل شده به خوبی اثرات تغییرات پارامترها را نشان می‌دهد که قسمتی از این نتایج در شکل ۲-۵ آورده شده است. در نمودار نشان داده شده، فشار ماکزیمم بر اساس پارامتر بی بعد نسبت افزایش فشار در شیر $(H_{\max} - H_0)_v$ به مقدار فشار ژوکوفسکی می‌باشد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود برای سرعت‌های کم، ضربه قوچ بدون رخ دادن جدایی ستون

$$\text{ایجاد می‌گردد} \left((H_{\max} - H_0)_v / (aV / g) = 1 \right).$$

همچنین برداشت دیگری که از نتایج شد این بود که مقدار پالس فشار با دوره کوتاه با اندازه موج فشار کم (منفی) برگشتی از مخزن و شدت کاویتاسیون در طول لوله مرتبط است. با افزایش سرعت اولیه نیز مقدار فشار جدایی ستون مایع به تدریج کم شده و به مقدار فشار ژوکوفسکی نزدیک می‌شود. حجم‌های بزرگ حفره معمولاً در مجاورت شیر تشکیل می‌شوند، درحالی که در طول لوله حجم‌های کوچکتری از حفره‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۲- ۵ هد ماکزیمم محاسبه شده در شیر به عنوان تابعی از سرعت اولیه (a) لوله به سمت پایین (b) به سمت بالا

برگانت و سیمسون بر اساس فشار ماکزیمم ایجاد شده، جریان‌های غیر ماندگار در لوله را به شکل زیر دسته بندی کردند.

۱- جریان‌های ضربه قوچ، که در این جریان‌ها جدایی ستون مایع اتفاق نمی‌افتد و فشار ماکزیمم همان فشار ژوکوفسکی است.

۲- رژیم جریان جدایی ستون فعال^۱، در این نوع رژیم فشار ماکزیمم در اثر وقوع اولین جدایی ستون مایع در شیر و یا در طول لوله اتفاق می‌افتد. که فشار ماکزیمم در شیر به وسیله پالس فشار دوره کوتاه بدست می‌آید که از فشار ژوکوفسکی بیشتر خواهد بود.

^۱ active column separation flow regime

۳- رژیم جریان جدایی ستون غیر فعال^۱، ماکزیمم فشار توسط ضربه قوچ قبل کاویتاسیون رخ داده و در نتیجه فشار ماکزیمم همان فشار ژوکوفسکی می باشد.

این طبقه بندی بر اساس فشار ماکزیمم صورت گرفته است. برای ارزیابی و تخمین بارهای دینامیکی در خطوط لوله و تکیه گاه های سازه ها، شیب پیشانی موج پارامتر مهم دیگری است که احتمالاً عامل اصلی آن متلاشی شدن جدایی ستون می باشد. از بین رفتن جدایی ستون احتمالاً مهمترین منبع ایجاد موج با شیب پیشانی بسیار زیاد می باشد. طبقه بندی دیگری برای ضربه قوچ و جدایی ستون مایع در سال ۲۰۰۰ توسط فنلی^۲ به صورت زیر ارائه شد [۴۴].

۱- عدم وجود کاویتاسیون

۲- کاویتاسیون رخ داده اما حفره بسته نمی شود.

۳- کاویتاسیون همراه بسته شدن و نابودی حفره ها بوده اما فشار اضافی تولید نمی کند.

۴- کاویتاسیون همراه متلاشی شدن حفره ها بوده و سبب ایجاد فشارهای بیشتر از فشار ژاکوفسکی می شود.

¹ passive column separation flow regime

² Fanelli

فصل سوم

معادلات و روابط اساسی

۱-۳ مقدمه

در فصل قبل ایجاد دو نوع رژیم جریان در خطوط لوله بررسی گردید. اولین نوع جریان، رژیم ضربه قوچ است که در این رژیم فشار بالاتر از فشار بخار سیال بوده و کاویتاسیونی رخ نخواهد داد؛ همچنین عوامل ایجاد کننده و حالت‌های ممکن ضربه قوچ مورد بحث و بررسی قرار گرفتند. نوع دوم جریان، رژیم کاویتاسیون است که در این رژیم فشار به فشار بخار می‌رسد. همچنین چگونگی رخداد جدایی ستون مایع در یک سیستم مورد بحث قرار گرفت. همان طور که گفته شد نحوه ایجاد پدیده جدایی ستون مایع به دو دسته کلی تقسیم می‌شود. اول حفره بخار محلی که در نزدیکی شیرها در زمان بستن آن‌ها، در نزدیکی توربین‌ها و ورودی‌های آن و در نقاط ارتفاعی بلند در خطوط لوله (بیشینه نسبی تراز لوله) شکل می‌گیرد.

همچنین ممکن است در نقطه‌ای در میانه لوله که محل برخورد دو موج با فشار کم می باشد (نتیجه آن ایجاد فشار کمتر از فشار بخار سیال است) حفره بخار میانی شکل بگیرد. حفره بخار میانی محل جدایی دو ناحیه سیال و یا دو ناحیه بخاری گسترده است یا جدا کننده یک ناحیه بخاری گسترده و یک ناحیه سیال می باشد. در این نوع جدایی ستون مایع ضریب α قابل مقایسه با یک می باشد. نوع دوم جدایی ستون، کاویتاسیون بخاری گسترده می باشد که این نوع کاویتاسیون در طولی از لوله ایجاد می گردد که در آن قسمت، اندازه‌ی موج فشار عبوری از فشار بخار کمتر است و با ایجاد کاویتاسیون در آن ناحیه، فشار در حدود فشار بخار ثابت می ماند. نسبت تخلخل در نواحی که کاویتاسیون بخاری گسترده رخ داده است مقداری بسیار کم را (حدود صفر) داراست.

متلاشی شدن یک حفره بخار گسسته و یا حرکت پیشانی موج ضربه در یک ناحیه بخاری گسترده، در هر دو مورد سبب می شود که فاز بخار تبدیل به فاز سیال شود. نهایتاً آن که احتمال وقوع ضربه قوچ و جدایی ستون مایع در پدیده‌های غیر ماندگار در شبکه‌های لوله وجود خواهد داشت و هر سیستمی که شامل شبکه‌ای از لوله‌ها باشد، ممکن است آن را تجربه کند.

در بحث پیرامون تحلیل جریان‌های غیر ماندگار نواحی مختلفی از جریان قابل بررسی هستند که شامل موارد زیر می شوند.

نواحی ضربه قوچ (فاز سیال)، نواحی کاویتاسیون بخاری گسترده (مخلوط سیال و حباب‌های بخار-سیال) و حفره‌های گسسته (فاز بخار سیال) [۳۱،۳۰،۴۶،۴۵]. این نواحی مختلف، عکس العمل‌های متفاوتی بر یکدیگر خواهند گذاشت. در این قسمت مجموعه معادلاتی را برای توصیف پدیده جدایی ستون در شبکه‌های لوله در حالت کلی بدست می آوریم.

پدیده جدایی ستون مایع و رخدادهای پس از آن (تشکیل و متلاشی شدن حفره‌های میانی، منبسط و متراکم شدن نواحی کاویتاسیون بخاری گسترده) به طور کامل توسط معادلاتی که حالت‌های فیزیکی

خاصی از سیال را توصیف می‌کنند، قابل بیان است. همان طور که گفته شد این حالت‌ها شامل حالت سیال، مخلوط سیال و حباب‌های بخار-سیال و حفره‌های گسسته است که در نهایت منجر به معادلات زیر می‌شوند.

۱- معادلات ضربه قوچ. این معادلات بیان کننده وضعیت سیال هستند.

۲- معادلات جریان دو فازی^۱. این معادلات برای مخلوط همگن سیال و بخار-سیال به کار می‌روند.

۳- معادلات ضربه^۲. این معادلات برای متراکم کردن ناحیه مخلوط بخار-سیال و باز گرداندن آن به فاز سیال به کار می‌روند.

۴- معادلاتی که برای یک حفره بخار گسسته^۳ به کار می‌رود. که این حفره ممکن است حفره بخار محلی باشد که در مرزها و نواحی مرتفع لوله شکل می‌گیرد یا حفره بخار میانی که جدا کننده نواحی سیال و یا نواحی کلویتاسیون بخاری گسترده در طول لوله می‌باشد.

معادلات ضربه قوچ، جریان دو فازی و موج ضربه‌ای به کمک اصل انتگرال گیری از حجم کنترل برای جریان یک بعدی حاصل می‌گردند. معادلات حاصله شامل معادله پیوستگی و معادله مومنتوم می‌باشند. شکل انتگرالی این دو معادله به شکل زیر بدست می‌آیند.

۱- معادله پیوستگی

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV + \int_{cs} \rho \vec{V} d\vec{A} \quad (1-3)$$

که در معادله فوق t زمان، cv حجم کنترل، ρ چگالی، V حجم، cs سطح کنترل، \vec{V} سرعت جریان و H_0 مساحت لوله می‌باشد.

¹ Two phase flow equations

² Shock equations

³ Discrete vapor cavity

۲- معادله مومنوم

$$\sum F = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho v dV + \int_{cs} \rho v \vec{V} d\vec{A} \quad (2-3)$$

که در آن F نیروهای وارد بر حجم کنترل می‌باشد.

یک حفره بخاری گسسته همانند یک شرط مرزی رفتار می‌کند، در حقیقت یک ناپیوستگی^۱ در ناحیه جریان پیوسته ایجاد می‌کند (جدایی کامل ستون سیال). رشد و کوچک شدن حفره بخار گسسته به وسیله معادلات ضربه قوچ یا معادلات جریان دو فازی برای مخلوط بخار سیال و یا ترکیبی از هر دو و همچنین استفاده از معادله پیوستگی محاسبه می‌گردد [۴۷].

معادلات به دست آمده را می‌توان برای انواع لوله با مشخصات گوناگون و نیز برای عکس العمل بین فازهای مختلف به کار برد. در ادامه روش‌های عددی و تحلیلی برای معادلات جدایی ستون مایع شرح داده می‌شود.

۲-۳ معادلات ضربه قوچ

همان طور که می‌دانیم معادلات ضربه قوچ جهت محاسبه جریان سیال غیر ماندگار درون لوله هنگامی که فشار آن بزرگتر از فشار بخار سیال باشد به کار می‌رود، در نتیجه به محض آن که فشار از فشار بخار سیال کمتر گردد این معادلات اعتبار خود را از دست خواهند داد.

فرضیاتی که برای بدست آوردن معادلات ضربه قوچ به کار می‌روند به قرار زیراند [۳۰، ۳۱]:

۱- جریان در خطوط لوله به صورت تک بعدی فرض می‌گردد و سرعت و فشار در مقاطع انتخابی به صورت یکنواخت خواهد بود.

۲- لوله به صورت کاملاً پر فرض می‌گردد و در خلال جریان گذرا نیز به همین صورت خواهد بود.

¹ Discontinuity

۳- در زمان جریان غیر ماندگار، جدایی ستون رخ نمی‌دهد. به عبارت دیگر فشار بیشتر از فشار بخار می‌باشد.

۴- جدار لوله و سیال به صورت الاستیک خطی فرض می‌شوند.

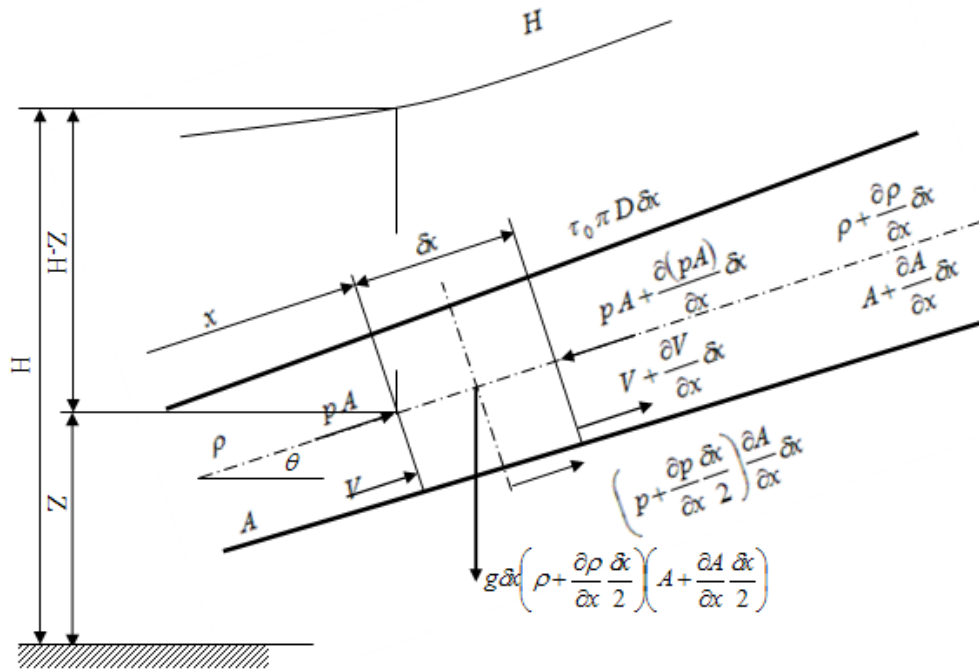
۵- افت اصطکاک غیر ماندگار همانند افت حالت پایدار محاسبه می‌شود. که این فرض را می‌توان با معرفی رابطه‌ای برای اعمال اثرات اصطکاک غیرماندگار در مدل روش خطوط مشخصه اصلاح کرد.

۶- مقدار گاز آزاد درون سیال در مقادیر کم فرض می‌شود به طوری که بتوان سرعت موج را ثابت فرض کرد.

۷- افزایش فشار ایجاد شده به واسطه امواج پیش رونده^۱ در جداره لوله در مقایسه با امواج فشاری به وجود آمده در سیال کوچک می‌باشد.

با در نظر گرفتن یک حجم کنترل در حالت کلی، همانطور که در شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود، معادلات ضربه قوچ به طور دقیق بدست آمده‌اند. دو معادله پیوستگی و مومنتوم با استفاده از روابط (۱-۳) و (۲-۳) حاصل می‌شوند.

^۱ Precursor wave



شکل ۳-۱ حجم کنترل برای معادلات ضربه قوچ

۳-۲-۱ معادله پیوستگی ضربه قوچ

اولین عبارت در معادله (۳-۱) نرخ افزایش جرم در حجم کنترل نسبت به زمان، در شکل ۳-۱ می‌باشد. که به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV = \frac{-\rho A \delta x + \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta t \right) \left(A + \frac{\partial A}{\partial t} \delta t \right) \left(x + \frac{\partial x}{\partial t} \delta t \right)}{\delta t} \quad (3-3)$$

که در آن δx طول حجم کنترل می‌باشد.

عبارت دوم در معادله (۳-۱) نرخ جریان خروجی از حجم کنترل نشان داده شده در شکل ۳-۱ است.

$$\int_{cs} \rho \vec{V} d\vec{A} = -\rho VA + \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} \delta x \right) \left(V + \frac{\partial V}{\partial x} \delta x \right) \left(A + \frac{\partial A}{\partial x} \delta x \right) \quad (4-3)$$

با جایگذاری معادلات دو معادله قبل در معادله (۳-۱) (پیوستگی) و ساده سازی آن و صرف نظر کردن از ترم‌های مرتبه بالاتر رابطه زیر حاصل می‌گردد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A \delta x) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho AV) \delta x = 0 \quad (۳-۵)$$

با معرفی مشتق کامل برای حرکت سیال به صورت زیر

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x} \quad (۳-۶)$$

و جایگذاری آن در معادله (۳-۵) و با فرض اینکه مقاطع عرضی ورودی و خروجی دارای فاصله جداگانه هستند (فاصله ثابت) و در واقع مستقل از جدار لوله می‌باشند ($d\delta x/dt = 0$) می‌توان معادله را به صورت زیر باز نویسی کرد.

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (۳-۷)$$

معادله فوق برای لوله‌های استوانه‌ای با مقطع همگرا و واگرا با هر شیب دلخواه برای هر نوع سیال و هر جنس جداره لوله برقرار می‌باشد [۴۵].

حال معادله (۳-۷) را برای حالت ضربه قوچ که مرتبط با جریان غیر ماندگار در سیال است بسط می‌دهیم.

اولین عبارت در این معادله قابلیت تراکم پذیری سیال^۱ را نشان می‌دهد که می‌توان آن را با استفاده از مدول بالک برای سیال در حالت الاستیک به صورت زیر بیان کرد:

^۱ Compressibility of liquid

$$K = -V \frac{dp}{dV} \quad (۸-۳)$$

که در آن K مدول بالک^۱ سیال الاستیک است. از قانون بقای جرم داریم

$$dm = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho \quad (۹-۳)$$

با ترکیب دو معادله فوق بدست می‌آوریم

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{K} \frac{dp}{dt} \quad (۱۰-۳)$$

معادله حاصل شده برای سیال با تراکم پذیری کم معتبر بوده، همچنین از اثرات ترمودینامیکی صرف نظر شده است.

عبارت دوم معادله، اثر الاستیک جداره لوله را اعمال می‌کند. در این قسمت به بررسی لوله استونه‌ای با جدار نازک در حالت الاستیک خطی می‌پردازیم که معمول‌ترین نوع لوله در نیروگاه‌های برق آبی و شبکه‌های آبرسانی می‌باشد. نرخ افزایش سطح مقطع نسبت به زمان به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{1}{\pi D^2} \pi \frac{d\varepsilon_2}{dt} \frac{D}{2} \quad (۱۱-۳)$$

در معادله بالا D قطر لوله و ε_2 کرنش کلی در جهت عرضی^۲ که می‌توان آن را به صورت معادله‌ای که در ادامه آمده است بیان کرد [۴۵].

^۱ Bulk modulus

^۲ Total strain in the lateral direction

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \mu\sigma_1) \quad (12-3)$$

که E مدول الاستیسته یانگ جداره لوله، σ_2 تنش جانبی (کمربندی)^۱، σ_1 تنش محوری و μ نسبت پواسون می باشد.

جایگذاری معادله فوق در معادله (۱۱-۳) منجر به رابطه زیر خواهد شد

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{2}{E} \left(\frac{d\sigma_2}{dt} - \mu \frac{d\sigma_1}{dt} \right) \quad (13-3)$$

با قرار دادن معادله فوق و معادله (۱۰-۳) در معادله (۷-۳) به فرم جدیدی برای معادله پیوستگی به صورت زیر دست می یابیم

$$\frac{1}{K} \frac{dp}{dt} + \frac{2}{E} \left(\frac{d\sigma_2}{dt} - \mu \frac{d\sigma_1}{dt} \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (14-3)$$

تنش های محوری و جانبی با فشار مرتبط اند و با فرض یک درز انبساطی برای اتصال لوله در سرتاسر لوله $\sigma_1 = 0$ خواهد بود و در نتیجه $d\sigma_1/dt = 0$ همچنین تنش جانبی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\sigma_2 = \frac{pD}{2e} \quad (15-3)$$

در رابطه فوق e ضخامت جداره لوله می باشد. در نتیجه

$$\frac{d\sigma_2}{dt} = \frac{D}{2e} \frac{dp}{dt} \quad (16-3)$$

¹ Lateral (hoop) stress

با جایگذاری این معادله در معادله (۱۴-۳) معادله پیوستگی به شکل زیر در می‌آید

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (17-3)$$

که در آن a سرعت موج ضربه قوچ است که به صورت زیر بیان می‌شود

$$a^2 = \frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K D}{E e} c_1} \quad (18-3)$$

که c_1 پارامتری بی بعد است که اثرات شرایط تکیه گاهی را بر سرعت موج اعمال می‌کند. به طوری که برای لوله با درز انبساطی مقدار c_1 یک خواهد بود. مقادیر دیگر این ضریب در منابع مرتبط موجود می‌باشد. همچنین چنانچه جداره لوله صلب باشد، مخرج کسر معادله به سمت یک میل خواهد کرد.

حال به دلیل اینکه عملاً، در محاسبات و طراحی‌های شبکه‌های آبیاری و نیروگاه‌های برق آبی از ارتفاع پیزومتری استفاده می‌شود، این متغیر را جایگزین پارامتر فشار می‌کنیم. که معادلات به اشکال زیر تبدیل خواهند شد.

$$p = \rho g(H - z) \quad (19-3)$$

که z تراز لوله است. در نتیجه با مشتق گیری نسبت به زمان خواهیم داشت

$$\frac{dp}{dt} = \rho g \left(\frac{dH}{dt} - \frac{dz}{dt} \right) \quad (20-3)$$

که رابطه فوق از تغییرات چگالی در مقایسه با تغییرات ارتفاع پیزومتری و تراز لوله صرف نظر شده است. با توجه به اینکه جداره لوله حرکتی ندارد بر اساس شکل ۳-۱ رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{dz}{dt} = V \frac{\partial z}{\partial x} = V \sin \theta \quad (21-3)$$

سرانجام پس از بازآرایی، معادله پیوستگی بر حسب متغیرهای سرعت (V) و ارتفاع پیزومتری (H) به صورت زیر بدست خواهد آمد.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} - V \sin \theta + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (22-3)$$

در بیشتر کاربردهای مهندسی از ترم شتاب جابجایی^۱ $V(\partial H / \partial x)$ و ترم شیب $V \sin \theta$ به علت این که در مقایسه با دیگر عبارتها بسیار کوچک می‌باشند، در معادله قبل می‌توان از آنها صرف نظر کرد. همچنین از متغیر دبی به جای سرعت جریان استفاده می‌شود. در نهایت با این ترکیب و ساده سازی، شکل ساده شده معادله پیوستگی حاصل می‌شود.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (23-3)$$

در معادله فوق پارامترهای مکان x و زمان t متغیرهای مستقل بوده در حالی که ارتفاع پیزومتری H (یا فشار p) و دبی Q (یا سرعت V) پارامترهای وابسته می‌باشند.

۲-۲-۳ معادله حرکت ضربه قوچ

سمت چپ معادله (۲-۳) برآیند نیروهای وارد بر حجم کنترل می‌باشد. با مراجعه به حجم کنترل در شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود که نیروهای وارده شامل نیروهای فشاری وارد بر انتهای حجم کنترل، نیروی وارد به سیال به واسطه تغییر سطح مقطع، مولفه نیروی جاذبه در راستای لوله و نیروی برشی ایجاد شده به واسطه

¹ Convective acceleration

اصطکاک لوله می‌شوند. که به صورت زیر نوشته می‌شوند

$$\sum F = pA - \left[pA + \frac{\partial}{\partial x}(pA)\delta x \right] + \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \right) \frac{\partial A}{\partial x} \delta x -$$

$$- g \delta x \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \right) \left(A + \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \right) \sin \theta - \tau_0 \pi D \delta x \quad (24-3)$$

تنش برشی τ_0 با استفاده از معادله دارسی و ایسباخ در حالت جریان پایدار به شکل زیر بیان می‌شود

$$\tau_0 = \frac{\rho f V |V|}{8} \quad (25-3)$$

که در این رابطه f ضریب اصطکاک دارسی و ایسباخ است.

اولین عبارت در سمت راست معادله (۲-۳) (معادله مومنتوم) نرخ تغییرات مومنتوم درون حجم کنترل

نسبت به زمان است که به شکل زیر نوشته می‌شود

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho V dV = \frac{-\rho V A \delta x + \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta t \right) \left(V + \frac{\partial V}{\partial t} \delta t \right) \left(A + \frac{\partial A}{\partial t} \delta t \right) \left(\delta x + \frac{\partial \delta x}{\partial t} \delta t \right)}{\delta t} \quad (26-3)$$

عبارت دوم در سمت راست آن مقدار خالص جریان خروجی از حجم کنترل می‌باشد که به شکل زیر نشان

داده می‌شود

$$\int_{cs} \rho V \vec{V} d\vec{A} = -\rho V^2 A + \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} \delta x \right) \left(V + \frac{\partial V}{\partial x} \delta x \right)^2 \left(A + \frac{\partial A}{\partial x} \delta x \right) \quad (27-3)$$

با ساده کردن معادلات (۲۴-۳)، (۲۶-۳) و (۲۷-۳) و حذف جملات مرتبه بالاتر و جایگزینی در معادله

(۲-۳) و به کار بردن معادلات (۵-۳) و معادله تنش برشی منجر به رابطه زیر خواهد شد:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (28-3)$$

همانند معادله پیوستگی مقدار فشار p با متغیر ارتفاع پیزومتری H جایگزین، و با استفاده از آن روابط معادله زیر حاصل خواهد شد.

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (29-3)$$

با صرف نظر کردن از شتاب جابجایی $V(\partial V/\partial x)$ که در مقایسه با سایر عبارات بسیار کوچک می‌باشد و همچنین استفاده از دبی به جای سرعت ($Q = AV$) در نهایت رابطه مومنوم به شکل زیر خواهد بود

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ|Q|}{2gDA^2} = 0 \quad (30-3)$$

۳-۳ معادلات جریان دو فازی برای مخلوط همگن سیال و حباب‌های بخار-سیال

یک مخلوط همگن سیال و حباب‌های بخار سیال در جریان لوله‌های تحت فشار هنگامی شکل می‌گیرد که یک موج با فشار منفی در ناحیه‌ای از طول لوله که فشار آن کاهش یافته عبور کند. این موج باعث می‌شود که فشار در طول گسترده‌ای از لوله برابر فشار بخار سیال گردد. معادلات جریان دو فازی برای یک مخلوط همگن سیال^۱ و حباب‌های بخار سیال^۲، به صورت زیر به دست می‌آیند.

فرضیاتی که برای توسعه معادلات جریان دو فازی برای مخلوط همگن سیال و حباب‌های بخار سیال به کار می‌رود شامل موارد زیر می‌شوند [۳۰، ۳۱]:

¹ Homogenous mixture of liquid

² Liquid vapor bubbles

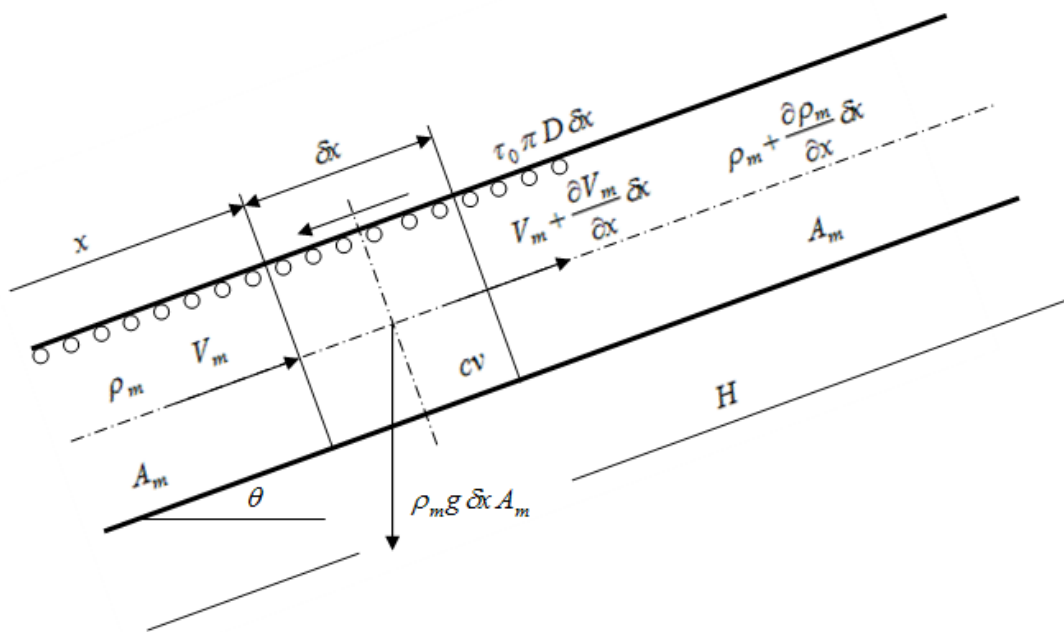
- ۱- جریان به صورت تک بعدی بوده که از مقادیر میانگین مقطعی، برای سرعت مخلوط، فشار، چگالی و نسبت تخلخل به کار می‌رود.
 - ۲- در خلال کاویتاسیون بخاری مقدار ناچیزی از گاز سیال به صورت حباب‌های بخار آزاد می‌گردد.
 - ۳- اثرات نیروهای گرانشی بر حباب‌ها، قابل صرف نظر کردن می‌باشد.
 - ۴- نسبت تخلخل بخار بسیار کوچکتر از واحد بوده بنابراین از جرم و مومنتوم حباب‌ها می‌توان چشم پوشی کرد.
 - ۵- فشار بخار سیال دارای مقدار ثابتی است و از اثرات کشش سطحی که سبب اختلاف فشار در عبور از حباب‌های بخار می‌شود نادیده گرفته می‌شود.
 - ۶- سیال و حباب‌های سیال در مخلوط هنگام کاویتاسیون بخاری دارای مقادیر سرعت یکسانی می‌باشند.
 - ۷- حباب‌های بخار سیال تحت تاثیر انقباض و انبساط حباب‌های مجاور قرار نمی‌گیرند.
 - ۸- کاویتاسیون بخاری به صورت کاویتاسیون هیدرودینامیکی بدست آمده است. (معادلات تا دمای ۵۵ درجه سلسیوس (۳۲۸ K) معتبر می‌باشند.
- معادلات جریان دو فازی برای ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده برای حجم کنترل نشان داده شده در شکل ۲-۳ در حالت کلی استخراج می‌شوند. دو معادله‌ای که برای ناحیه کاویتاسیون بخاری بدست می‌آیند معادلات پیوستگی و مومنتوم هستند که با استفاده از روابط (۱-۳) و (۲-۳) حاصل می‌شوند.

۳-۳-۱ معادله پیوستگی برای مخلوط بخار سیال

اولین عبارت در معادله نرخ افزایش جرم (مخلوط سیال و حباب‌های بخار گسترده در سیال) درون حجم کنترل نسبت به زمان است که به صورت زیر نوشته می‌شود

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV = \frac{-\rho_m A_m \delta x + \left(\rho_m + \frac{\partial \rho_m}{\partial t} \delta t \right) A_m \delta x}{\delta t} \quad (31-3)$$

که ρ_m چگالی مخلوط بخار سیال و A_m مساحت مقطع عرضی لوله که تماماً با مخلوط بخار سیال در ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده که در فشار ثابت (فشار بحر سیال) قرار دارد، پر شده است. به دلیل وجود فشار ثابت مساحت سطح مقطع ثابت می‌ماند.



شکل ۳-۲ حجم کنترل ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده، برای معادلات جریان دو فازی

عبارت دوم در معادله (۳-۱) نرخ خالص جرم خروجی از حجم کنترل است که در شکل ۳-۲ نمایش داده شده است

$$\int_{cs} \rho \vec{V} d\vec{A} = -\rho_m V_m A_m + \left(\rho_m + \frac{\partial \rho_m}{\partial x} \delta x \right) \left(V_m + \frac{\partial V_m}{\partial x} \delta x \right) A_m \quad (32-3)$$

V_m سرعت مخلوط بخار-سیال است.

با جایگذاری دو معادله قبل در معادله (۳-۱) و ساده نمودن آن و حذف جملات با مرتبه بالاتر به معادله بعد دست پیدا خواهیم کرد

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + V_m \frac{\partial \rho_m}{\partial x} + \rho_m \frac{\partial V_m}{\partial x} = 0 \quad (3-33)$$

نسبت تخلخل بخار (α_m) را به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$\alpha_m = \frac{V_v}{V_m} \quad (3-34)$$

که در آن V_v حجم حباب‌های بخار سیال که به طور همگن گسترده شده‌اند، می‌باشد. V_m حجم کل مخلوط بخار سیال است. هر دو این متغیرها در فشار بخار قرار دارند.

چگالی مخلوط بخار سیال^۱ را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\rho_m = \alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_l \quad (3-35)$$

که ρ_v چگالی بخار سیال و ρ_l چگالی سیال هستند. که چگالی بخار، بسیار کوچکتر از چگالی سیال می‌باشد. و هنگامی که نسبت‌های تخلخل کوچک باشند می‌توان از مقدار چگالی بخار صرف نظر نمود که معادله قبل به صورت زیر ساده می‌شود

$$\rho_m = (1 - \alpha_v) \rho_l(p_v) \quad (3-36)$$

¹ Liquid vapor mixture density

که $\rho_l(p_v)$ چگالی سیال در فشار بخار سیال است. با جایگزینی این معادله در (۳-۳۳) بدست می‌آید

$$\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + V_m \frac{\partial \alpha_v}{\partial x} - (1 - \alpha_v) \frac{\partial V_m}{\partial x} = 0 \quad (۳۷-۳)$$

با معرفی مشتق کامل برای حرکت مخلوط بخار-سیال به صورت زیر

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V_m \frac{\partial}{\partial x} \quad (۳۸-۳)$$

و با استفاده از معادله (۳۷-۳) و فرض مقدار کوچکی برای نسبت تخلخل به معادله زیر می‌رسیم

$$\frac{d \alpha_v}{dt} = \frac{\partial V_m}{\partial t} \quad (۳۹-۳)$$

که در این معادله نسبت تخلخل بخار α_v و سرعت مخلوط بخار سیال V_m متغیرهای وابسته می‌باشند.

۳-۳-۲ معادله حرکت برای مخلوط بخار-سیال

عبارت سمت چپ معادله (۲-۳) برآیند نیروهای وارد بر حجم کنترل است. تا زمانی که فشار در ناحیه بخاری ثابت است نیروهای عمل کننده بر انتهای حجم کنترل با هم برابر بوده و یکدیگر را خنثی می‌کنند. با مراجعه به حجم کنترل در شکل نیروهای وارد در جهت طول لوله شامل نیروهای گرانشی و نیروی برشی به واسطه افت اصطکاک به صورت زیراند:

$$\sum F = -\rho_m g \delta x A_m \sin \theta - \tau_0 \pi D \delta x \quad (۴۰-۳)$$

که فرض می‌گردد تنش برشی جداره در حالت جریان پایدار بوده به این معنی که از اثرات افت اصطکاکی حباب‌های بخار در مخلوط، برای مقادیر کوچک نسبت تخلخل، صرف نظر شده است.

$$\tau_0 = \frac{\rho f V_m |V_m|}{8} \quad (41-3)$$

اولین عبارت در سمت راست معادله (۲-۳) نرخ افزایش مومنتوم نسبت به زمان درون حجم کنترل است که در شکل ۲-۳ نیز نشان داده شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho V dV = \frac{-\rho_m V_m A_m \delta x + \left(\rho_m + \frac{\partial \rho_m}{\partial t} \delta t \right) \left(V_m + \frac{\partial V_m}{\partial t} \delta t \right) A_m \delta x}{\delta t} \quad (42-3)$$

عبارت دوم در سمت راست معادله مومنتوم خالص خروجی از حجم کنترل است که به صورت زیر نوشته می‌شود

$$\int_{cs} \rho V \vec{V} d\vec{A} = -\rho_m V_m^2 A_m + \left(\rho_m + \frac{\partial \rho_m}{\partial x} \delta x \right) \left(V_m + \frac{\partial V_m}{\partial x} \delta x \right)^2 A_m \quad (43-3)$$

با ساده کردن دو معادله قبل و حذف عبارات با مراتب بالاتر و جاگزینی آن‌ها در معادله مومنتوم اولیه و به همراه معادله (۴۰-۳) و با استفاده از معادله پیوستگی (۳۳-۳) و معادله تنش برشی (۴۱-۳) بدست می‌آید

$$\frac{\partial V_m}{\partial t} + V_m \frac{\partial V_m}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{f V_m |V_m|}{2D} = 0 \quad (44-3)$$

با تعریف مشتق کامل به صورت معادله (۳۸-۳)، معادله فوق به صورت زیر تبدیل خواهد شد

$$\frac{dV_m}{dt} = -g \sin \theta - \frac{f V_m |V_m|}{2D} \quad (45-3)$$

که در این رابطه سرعت مخلوط بخار-سیال V_m تنها متغیر وابسته معادله می‌باشد.

۳-۴ معادلات ضربه برای تراکم مخلوط بخار-سیال و بازگشت به فاز سیال

یک ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده با انتشار درون یک ناحیه ضربه قوچ گسترش پیدا می‌کند. هرگاه گسترش ناحیه بخاری گسترده متوقف شود، مرز جدا کننده نواحی ضربه قوچ و کاویتاسیون بخاری تمایل دارد که به درون ناحیه کاویتاسیون (بخاری) باز گردد. یک موج فشاری (موج ضربه) و یا متلاشی شدن یک حفره میانی که بین دو ناحیه مخلوط بخار سیال با منابع متفاوت قرار گرفته، سبب ایجاد امواج ضربه و تراکم ناحیه مخلوط بخار سیال و بازگشت آن به فاز سیال می‌شود. در ادامه سیال تحت فشار p_s قرار می‌گیرد که بدون قید و شرط این فشار بزرگتر از فشار بخار سیال p_v می‌باشد.

حرکت سطح مشترک^۱ بین سیال تک فازی (مایع) و سیال دو فازی تک مولفه‌ای^۲ (مخلوط همگن سیال و حباب‌های بخار سیال) توسط معادلات ضربه توصیف می‌گردد. در این قسمت معادلاتی که حرکت پیشانی موج ضربه را بیان می‌کنند به دست آورده می‌شود. علاوه بر فرضیاتی که قسمت‌های قبل برای سیال و مخلوط بخار-سیال آورده شد فرضیات دیگری نیز برای حرکت وجه مشترک بین دو فاز بیان خواهد شد که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته می‌شود [۳۰، ۳۱].

۱- عرض ناپیوستگی بسیار کوچک و قابل صرف نظر کردن است.

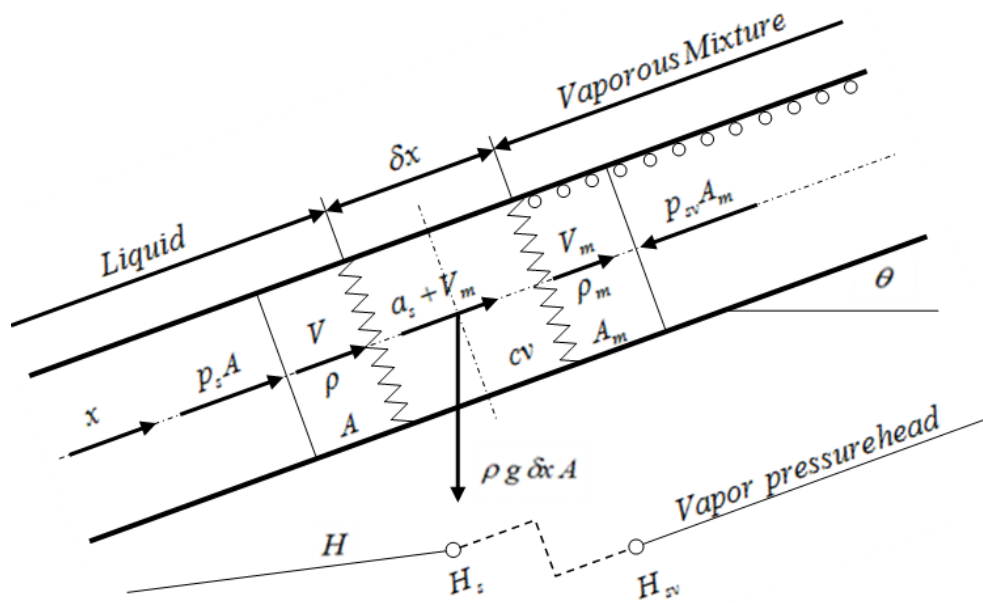
۲- افزایش دما در اثر عبور جرم از پیشانی موج ضربه کوچک می‌باشد.

۳- شرایط دمایی یکسانی در عبور از وجه مشترک فرض می‌شود.

۴- جرم و مومنتوم فاز بخاری مخلوط بخار- سیال قابل چشم پوشی است.

¹ Interface

² One component two phase fluid



شکل ۳-۳ حجم کنترل برای معادلات ضربه

با استفاده از حجم کنترل نمایش داده شده در شکل ۳-۳ معادلات ضربه را برای بدست آوردن حرکت کلی سطح مشترک (حرکت در هر دو جهت لوله) به دست می‌آوریم. دو معادله‌ای که برای بدست آوردن معادله حرکت سطح مشترک به کار می‌روند شامل معادله پیوستگی و معادله مومنوم هستند که به کمک معادلات اولیه انتگرال گیری از حجم کنترل قابل دستیابی‌اند. برای تمایز بین دو ناحیه در دو طرف پیشانی موج ضربه از زیر نویس‌های زیر استفاده می‌شود. برای ناحیه ضربه قوچ از زیر نویسی استفاده نمی‌گردد بجز پارامتر فشار که از نشانه p_s استفاده شده است. متغیرهایی که به ناحیه کاپیتاسیون بخاری اشاره دارند با زیر نویس m مشخص می‌شوند، بجز متغیر فشار که با p_{sv} نمایش داده شده است ($p_{sv} \equiv p_s$).

۳-۴-۱ معادله پیوستگی برای پیشانی موج ضربه^۱

اولین عبارت در معادله (۳-۱) نرخ افزایش جرم درون حجم کنترل در شکل ۳-۳ است.

^۱ Shock wave front

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV = \frac{\rho A \delta x - \rho_m A_m \delta x}{\delta t} \quad (46-3)$$

افزایش جرم، تشکیل شده از حجم بخار که با تراکم آن به فاز سیال تبدیل شده است، افزایش جرم به واسطه افزایش چگالی سیال و در نهایت افزایش سطح مقطع لوله به واسطه افزایش فشار و بالاتر رفتن آن از فشار بخار سیال.

عبارت دوم در معادله نرخ خالص جریان خروجی از حجم کنترل می‌باشد. که به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\int_{cs} \rho \vec{V} d\vec{A} = -\rho VA + \rho_m V_m A_m \quad (47-3)$$

با جایگذاری دو معادله قبل در معادله اولیه پیوستگی داریم

$$(\rho A - \rho_m A_m) \frac{\delta x}{\delta t} + \rho_m V_m A_m - \rho VA = 0 \quad (48-3)$$

اکنون به بررسی تغییرات چگالی و سطح مقطع لوله می‌پردازیم. اختلاف چگالی بین سیال و مخلوط $\rho - \rho_m$ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\rho - \rho_m = (\rho - \rho(p_v)) + (\rho(p_v) - \rho_m) \quad (49-3)$$

با جایگزینی تغییرات چگالی $\Delta\rho$ به جای اختلاف چگالی‌ها که در حقیقت تفاوت فشار بین ناحیه ضربه قوچ و فشار بخار سیال است، داریم

$$\Delta\rho = \rho - \rho(p_v) \quad (50-3)$$

با ترکیب دو معادله قبل عبارتی برای چگالی ناحیه کاویتاسیون بخاری حاصل می‌شود

$$\rho_m = \rho - [\Delta\rho + (\rho(p_v) - \rho_m)] \quad (51-3)$$

همچنین برای مساحت مقطع عرضی لوله در ناحیه بخاری داریم

$$A_m = A - (A - A_m) \quad (52-3)$$

مساحت عرضی لوله در ناحیه کاویتاسیون بخاری مقداری است ثابت که مقدار آن با ناحیه ضربه قوچ با ضربه قوچ با فشاری برابر فشار بخار سیال، برابر است. تغییرات مساحت لوله را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\Delta A = A - A_m \quad (53-3)$$

یا به عبارت دیگر خواهیم داشت

$$A_m = A - \Delta A \quad (54-3)$$

در هنگام تراکم ناحیه بخاری، پیشانی موج ضربه فاصله δx را در زمان δt طبق رابطه زیر خواهد پیمود

$$\delta x = (a_s + V_m) \delta t \quad (55-3)$$

که a_s سرعت موج ضربه است. با جاگذاری معادله (51-3) و دو معادله قبل و ساده سازی و حذف جملات مراتب بالاتر رابطه زیر حاصل می‌شود [48]:

$$a_s \left[\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\rho(p_v) - \rho_m}{\rho} \right] - (V - V_m) = 0 \quad (56-3)$$

با استفاده از رابطه (36-3) و تعریف نسبت تخلخل در رابطه بالا خواهیم داشت

$$a_s \left[\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\alpha_v \rho(\rho_v)}{\rho} \right] - (V - V_m) = 0 \quad (57-3)$$

رابطه موج سیال با تغییرات چگالی سیال و تغییرات مساحت مقطع عرضی با استفاده از رابطه پایین قابل بیان خواهد بود

$$a^2 = \frac{\frac{\Delta p}{\rho}}{\frac{\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho}}{\rho}} \quad (58-3)$$

که در آن Δp تغییرات فشار به ازای حرکت پیشانی موج ضربه در فاصله δx می باشد. با جاگذاری معادله قبل در معادله (57-3) رابطه زیر بدست می آید

$$a_s \left[\frac{\Delta p}{\rho a^2} + \frac{\alpha_v \rho(\rho_v)}{\rho} \right] - (V - V_m) = 0 \quad (59-3)$$

تغییرات فشار را می توان با استفاده از رابطه زیر، با تغییرات ارتفاع پیزومتر ΔH جایگزین نمود. (با فرض ناپوستگی بسیار کوچک، برای تراز لوله داریم $(z_s = z_{sv} = z)$)

$$\Delta p = p_s - p_{sv} = \rho g (H_s - H_{sv}) \quad (60-3)$$

که H_s ارتفاع پیزومتر سمت ناحیه ضربه قوچ وجه مشترک و H_{sv} ارتفاع پیزومتر سمت ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده، وجه مشترک می باشد. همچنین در ناحیه ضربه قوچ نسبت $\rho(p_v)/\rho$ تقریباً برابر یک خواهد بود [48]، با این تخمین می توان معادله قبل را به شکل زیر بازنویسی کرد که معادله نهایی پیوستگی موج ضربه می باشد

$$a_s \left[\frac{g}{a^2} (H_s - H_{sv}) + \alpha_v \right] - (V - V_m) = 0 \quad (۶۱-۳)$$

در معادله پیوستگی بدست آمده مجهولات شامل سرعت موج ضربه a_s ، ارتفاع پیزومتری سمت ناحیه ضربه قوچ پیشانی موج ضربه H_s ، نسبت تخلخل مخلوط در ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده مجاور موج ضربه α_v ، سرعت جریان در ناحیه ضربه قوچ V و سرانجام سرعت جریان در ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده مجاور پیشانی موج ضربه V_m .

۲-۴-۳ معادله حرکت برای پیشانی موج ضربه

سمت چپ معادله (۲-۳) برآیند نیروهای وارد بر حجم کنترل است. با مراجعه به حجم کنترل نشان داده شده در شکل ۳-۳ برآیند نیروها، شامل نیروهای فشاری وارد بر انتهای حجم کنترل و نیروهای گرانشی در راستای لوله می‌باشند، که به صورت زیر بیان می‌شوند

$$\sum F = p_s A - p_{sv} A_m - \rho g A \delta x \sin \theta \quad (۶۲-۳)$$

که از نیروی اصطکاک به علت کوچک بودن مقدار آن صرف نظر می‌شود (عرض ناپیوستگی بسیار کوچک است). برای محاسبه نیروی جاذبه از چگالی و مساحت ناحیه سمت ضربه قوچ وجه مشترک استفاده می‌شود (که از مقدار کوچک نسبت تخلخل و مقدار کوچک تغییرات مقطع لوله در محاسبه وزن سیال چشم پوشی شده است).

عبارت اول در سمت راست معادله نرخ افزایش مومنتوم درون حجم کنترل نسبت به زمان است که با توجه به شکل ۳-۳ داریم:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho V dV = \frac{\rho VA \delta x - \rho_m V_m A_m \delta x}{\delta t} \quad (۶۳-۳)$$

عبارت دوم در سمت راست آن معادله مقدار خالص مومنتوم خروجی از حجم کنترل است که به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\int_{cs} \rho V \vec{V} d\vec{A} = -\rho V^2 A + \rho_m V_m^2 A_m \quad (۶۴-۳)$$

جاگذاری سه معادله قبل در معادله (۳-۲) منجر به رابطه زیر می شود

$$p_s A - p_{sv} A_m - \rho g A \delta x \sin \theta = (\rho VA - \rho_m V_m A_m) \frac{\delta x}{\delta t} + \rho_m V_m^2 A_m - \rho V^2 A = 0 \quad (۶۵-۳)$$

عبارت سوم شامل $\delta x \sin \theta$ است که با توجه به شکل می توان آن را با تغییرات تراز جایگزین کرد

$$\delta x \sin \theta = z_{sv} - z_s \quad (۶۶-۳)$$

با لحاظ کردن این معادله و معادلات (۵۱-۳) و (۵۲-۳) در معادله (۶۵-۳) و استفاده از معادلات (۱۹-۳) و

(۵۵-۳) و ساده سازی و حذف عبارات با مراتب بالاتر معادله جدید به صورت زیر قابل دست یابی است

[۳۰، ۳۱].

$$\rho g (H_s A - H_{sv} A_m) = \rho A (a_s + V_m) (V - V_m) + a_s V_m [A(\rho - \rho_m) + \rho(A - A_m)] - \rho A (V^2 - V_m^2) \quad (۶۷-۳)$$

برای ساده نمودن رابطه بدست آمده فرض می شود که افزایش سطح مقطع لوله در سمت ناحیه ضربه قوچ وجه مشترک نسبت به سطح مقطع لوله در ناحیه کاویتاسیون بخاری کوچک باشد ($A = A_m$). با استفاده از این ساده سازی و معادله پیوستگی (۵۶-۳) (چگالی و سطح مقطع لوله در معادله (۵۶-۳) به وسیله معادلات

(۵۱-۳) و (۵۳-۳) بیان شده‌اند. و معادله (۵۶-۳) در ρAV_m ضرب شده است) و ادغام آن در معادله و انجام عملیات جبری شکل نهایی معادله مومنتوم برای پیشانی موج ضربه به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$g(H_s - H_{sv}) + (V - V_m)(V - V_m - a_s) = 0 \quad (۶۸-۳)$$

در معادله مومنتوم بدست آمده مجهولات در برگیرنده متغیرهای زیر می‌باشد. ارتفاع پیزومتری در سمت ضربه قوچ پیشانی موج ضربه (H_s) ، سرعت جریان در سمت ناحیه ضربه قوچ پیشانی موج ضربه (V) ، سرعت جریان در ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده مجاور پیشانی موج ضربه (V_m) و سرعت موج ضربه (a_s) .

۳-۵ معادلات حفره بخار گسسته

هنگامی که فشار از فشار بخار سیال کمتر شود یک حفره بخار گسسته می‌تواند در مرزها (پمپ، شیر، توربین و ...) و یا در نقاط با ارتفاع نسبی زیاد (در محل تغییر شیب به صورت محدب) تشکیل شود. همچنین یک حفره میانی زمانی شکل می‌گیرد که دو موج کم فشار در خلاف جهت هم حرکت کنند و با تلاقی آن‌ها و اثر مجموع آن‌ها سبب کاهش فشار به فشاری کمتر از فشار بخار سیال شود. حفره‌های میانی می‌توانند در هر نقطه‌ای در طول خطوط لوله تشکیل شوند.

یک حفره بخار گسسته می‌تواند بین موقعیت‌های زیر قرار داشته باشد [۳۰، ۴۶]:

۱- دو ناحیه سیال

۲- دو ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده

۳- در میان یک ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده و یک ناحیه سیال

۴- در فاصله مرزهای انتهایی و ناحیه سیال

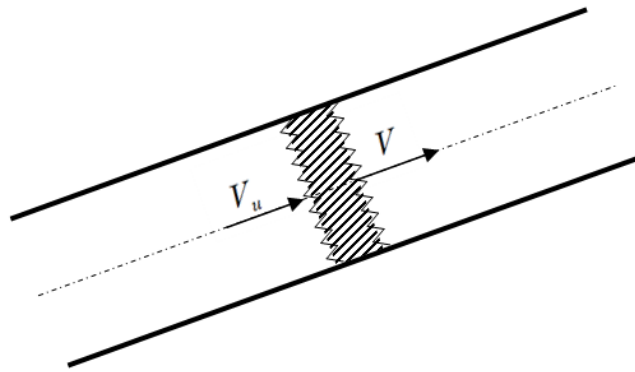
۵- مرزهای انتهایی و ناحیه کاویتاسیون بخاری

فرضیاتی که برای رشد کردن، کوچک شدن و متلاشی شدن حفره بخار گسسته به کار می‌روند موارد زیر را در بر می‌گیرد

- ۱- اندازه فشار در یک حفره برابر فشار بخار سیال است.
 - ۲- ماکزیمم حجم حفره در مقایسه با طول و حجم ستون سیال (سیال یا مخلوط بخار سیال) بسیار کوچک می‌باشد.
 - ۳- امواج ضربه قوچ در حفره‌ها بازتابیده می‌شود و فرض می‌گردد که حفره تمامی مقطع عرضی لوله را در بر می‌گیرد.
 - ۴- حفره بخار گسسته هیچگونه حرکتی نخواهد داشت.
 - ۵- حفره بخار حاوی بخار خالص سیال است.
 - ۶- جرم و مومنتوم بخار سیال که تمامی حفره را پر کرده است بسیار ناچیز می‌باشد.
 - ۷- در یک حفره شرایط دمایی یکسانی برقرار می‌باشد.
 - ۸- در لحظه‌ای که ستون‌های سیال به یکدیگر می‌رسند و یا حفره متلاشی می‌گردد بخار سریعاً به طور کامل متراکم شده و به حالت قبلی باز می‌گردد.
 - ۹- تشکیل حفره‌ها اثری بر افت‌های اصطکاک در طول لوله نخواهد داشت.
- رشد و کوچک شدن حفره‌های بخار گسسته همان طور که در شکل ۳-۴ نمایش داده شده است توسط رابطه پیوستگی که در ادامه آمده است تعریف می‌شود

$$V_{vc} = \int_{t_{in}}^t A(V - V_u) dt \quad (۶۹-۳)$$

که در آن V_{vc} حجم بخار حفره گسسته، t_{in} زمان شروع تشکیل حفره بخار گسسته، V سرعت جریان خروجی در پایین دست ناپیوستگی (وجه مشترک) و V_u سرعت جریان ورودی در بالا دست ناپیوستگی می‌باشند.



شکل ۳-۴ حفره بخار گسسته در طول لوله

برای محاسبه سرعت جریان‌های فوق از معادلات ضربه قوچ معمولی و یا معادلات جریان مخلوط بخار-سیال دو فازی و یا ترکیبی از این روابط استفاده می‌شود. متلاشی شدن حفره زمانی اتفاق خواهد افتاد که مجموع حجم‌های تجمعی حفره در طی گذشت زمان، کوچکتر از صفر شود [۵۰] که در نتیجه آن حفره از بین رفته و جریان سیال تک فازی تشکیل خواهد شد. متلاشی شدن حفره سبب تشکیل نواحی ضربه قوچ، شروع موج ضربه و یا هر دو آن‌ها می‌شود که در فصول بعد به تفصیل در مورد آن‌ها بحث خواهد شد.

فصل چهارم

مدل وجه مشترک کاویتاسیون بخاری تعمیر یافته

۴-۱ مقدمه

تا سال ۱۹۶۰ به علت در دسترس نبودن کامپیوتر انجام تحقیقات گسترده‌ای در مورد جدایی ستون مایع در لوله‌ها امکان پذیر نبود. تا اینکه در دهه ۷۰ میلادی اولین مطالعات در مورد شبیه سازی کامپیوتری پدیده‌های غیر ماندگار توسط تیبرسد^۱، لای^۲ و دیگران مانند استریتر و وایلی در دانشگاه میشیگان و دانشمندان دیگری در کشورهای بلژیک و هلند صورت گرفت. مدل‌های وجه مشترک، مدل‌های پیشرفته‌ای

¹ Thibessard

² Lai

می‌باشند که در آن‌ها، نواحی کاویتاسیون بخاری گسترده در لوله، موج‌های حرکت و گونه‌های مختلف حفره‌های مجزا، همه جنبه‌های مهمی در اصلاح کردن مدل‌های قبلی بودند. مدل وجه مشترک برای لوله-های افقی و شیب‌دار، اثرات متقابل بین پدیده ضربه قوچ، کاویتاسیون بخاری، جدایی ستون مایع داخلی (در طول لوله) و در مرزها (نقاط مرتفع، شیرها) قابل کاربرد است. در واقع این مدل با استفاده از مدل سازی جریان دو فاز و ترکیب آن با مدل‌های قبل حالت عمل و عکس‌العملی بین حالت‌های مختلف را ایجاد می‌کند. در این مدل به علت اثر پذیری وضعیت گره‌ها و دامنه‌های مجاور از یکدیگر، در اعمال حالات مختلف، خصوصاً اعمال شرایط مرزی مختلف می‌بایست دقت و توجه فراوانی نمود. در مدل‌های وجه مشترک با توجه به این که مدل فیزیکی فرض شده با فیزیک واقعی مسئله نزدیک می‌باشد این مدل‌ها قابلیت اعتماد بالاتری نسبت به مدل‌های قبلی دارند.

۴-۲ مدل وجه مشترک کاویتاسیون بخاری تعمیم یافته (GIVCM)

برای بررسی این مدل نیاز به روش‌های تحلیلی و عددی برای حل مجموعه معادلات جدایی ستون که در زیر آورده شده است می‌باشد [۴۸].

۱- روش حل خطوط مشخصه برای معادلات ضربه قوچ

۲- انتگرال گیری عددی و تحلیلی برای معادلات جریان دوفازی در ناحیه مخلوط بخار سیال

۳- حل تداخلی معادلات ضربه

۴- انتگرال گیری عددی جهت حل معادله پیوستگی حفره بخار گسسته

با استفاده از مجموعه معادلات فوق یک مدل عددی وجه مشترک تعمیم یافته ارائه خواهد شد، که به صورت هم‌زمان با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی برای حل معادلات جدایی ستون برای انواع مشخصات لوله به کار می‌رود. در این صورت حالت‌های مختلفی از عکس‌العمل بین نواحی ضربه قوچ، نواحی کاویتاسیون بخاری گسترده، حفره‌های میانی و حفره‌هایی که در مرزها تشکیل می‌شوند، وجود خواهد

داشت. برای شکل دادن الگوریتم کلی این مدل از الگوریتم استاندارد مدل حفره‌ایی بخار گسسته به عنوان پایه اساسی استفاده می‌شود. این الگوریتم استاندارد اجازه می‌دهد حفره‌ها در مقاطع محاسباتی روش خطوط مشخصه شکل بگیرند.

مهمترین مشخصه در اصلاح این الگوریتم افزودن معادلات جریان دو فازی برای مخلوط بخار سیال و همچنین استفاده از معادلات ضربه برای تراکم مخلوط بخار سیال و بازگرداندن آن به فاز سیال می‌باشد. در چهار زیر بخش آتی ابزارهای عددی اساسی جهت توسعه الگوریتم جدایی ستون برای انواع مختلف مشخصات لوله ارائه می‌شوند.

۴-۲-۱ روش خطوط مشخصه برای معادلات ضربه قوچ

با توجه به اینکه در نواحی ضربه قوچ فشار بیشتر از فشار بخار سیال است، این نواحی فقط حاوی سیال بوده و در نتیجه مشخصات و شرایط حاکم آن (مجهولات و معادلات) مانند ضربه قوچ معمولی است و معادلاتی که برای حل مجهولات به کار می‌رود همان معادلاتی است که قبلاً در فصل ۳ بیان شد.

این معادلات یک مجموعه معادلات شبه خطی را تشکیل می‌دهند که حل عمومی مستقیمی برای آن‌ها وجود ندارد. روش حل استاندارد برای حل معادلات ضربه قوچ استفاده از روش خطوط مشخصه می‌باشد [۷]. با تبدیل معادلات (۳-۲۳) و (۳-۳۰) با استفاده از روش خطوط مشخصه، معادلات تبدیل به چهار معادله دیفرانسیل معمولی می‌شوند که شامل دو معادله سازگاری C^+ و C^- و دو رابطه برای خطوط مشخصه می‌شوند. دو معادله سازگاری به صورت زیر خواهند بود.

$$\pm \frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{fa}{2gDA^2} Q|Q| = 0 \quad (1-4)$$

هر معادله سازگاری در امتداد خطوط مشخصه C^+ و C^- ، که با روابط زیر بدست می‌آیند معتبر خواهد بود

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (2-4)$$

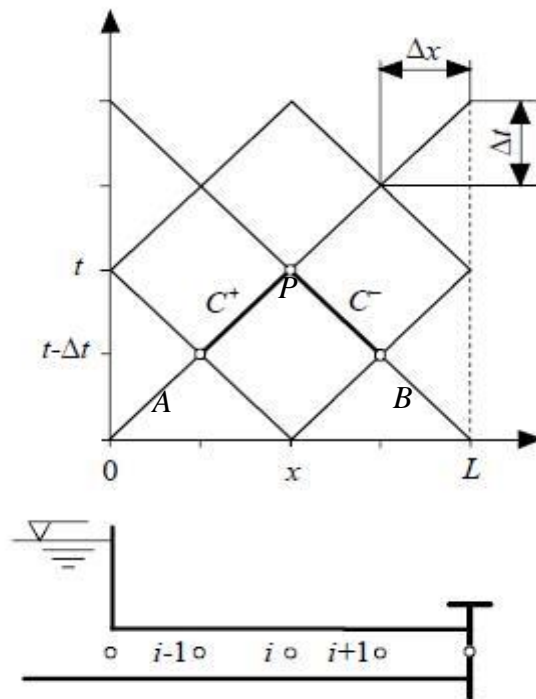
شکل ۱-۴ خطوط مشخصه را در صفحه $x-t$ نشان می‌دهد. که از یک شبکه مستطیلی معمولی تشکیل شده است که در حقیقت خود این شبکه از دو شبکه ضربدری مستقل شکل گرفته است. در اجرای کامپیوتری استفاده از شبکه ضربدری بیشتر توصیه می‌شود. با فرض ثابت بودن سرعت موج a و ضریب اصطکاک داریسی و ایسباخ f با انتگرال گیری از معادله (۱-۴) در امتداد خطوط مشخصه C^+ و C^- منجر به یک حل عددی پایدار می‌شود که روابط آن در زیر آورده شده است.

در امتداد خط مشخصه مثبت $(\Delta x / \Delta t = a)$

$$H_P - H_A + \frac{a}{gA} (Q_P - Q_A) + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_P |Q_A| = 0 \quad (3-4)$$

در امتداد خط مشخصه منفی $(\Delta x / \Delta t = -a)$

$$H_P - H_B + \frac{a}{gA} (Q_P - Q_B) + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_P |Q_B| = 0 \quad (4-4)$$



شکل ۴-۱ خطوط شبکه مشخصه در صفحه $x-t$

که در معادلات قبل H_A ، H_B ، Q_A و Q_B فشارهای پیزومتری و دبی‌های معلوم در زمان $t - \Delta t$ می‌باشند. H_P و Q_P فشار پیزومتری و دبی مجهول در زمان t هستند. Δx طول دامنه محاسباتی و Δt گام زمانی است. که با استفاده از دو معادله فوق می‌توان به روش زیر دو مجهول H_P و Q_P را محاسبه نمود. معادلات (۳-۴) و (۴-۴) را می‌توان به شکل ساده‌تری به صورت زیر برای هر گره داخلی در مقاطع محاسباتی نوشت. سپس در ادامه مدل سازی جدایی ستون، این معادلات با مدل‌های جدایی ستون مایع ترکیب خواهند شد.

$$C^+ : H_j - C_P + B_P Q_{ij} = 0 \quad (۵-۴)$$

و رابطه C^- به شکل زیر خواهد بود

$$C^- : H_j - C_M - B_M Q_j = 0 \quad (۶-۴)$$

که B_M ، B_P ، C_M و C_P ضرایب ثابت معلوم در معادلات سازگاری ضربه قوچ هستند که در ادامه آورده شده‌اند. دبی در سمت بالا دست گره محاسباتی Q_{uj} و دبی در سمت پایین گره محاسباتی Q_j برای حالت ضربه قوچ، یکسان می‌باشند ($Q_{uj} = Q_j$). به این معنی که فشار در آن مقاطع بزرگتر از فشار بخار سیال می‌باشد. در مرزها، متناسب با شرایط فیزیکی، معادله شرط مرزی با یکی از معادلات سازگاری جایگزین خواهد شد.

$$\begin{aligned}
 B_M &= \frac{a}{gA} + R|Q_{u\ i-1}| \\
 B_P &= \frac{a}{gA} + R|Q_{i+1}| \\
 C_M &= H_{i+1} + RQ_{u\ i+1}|Q_{u\ i+1}| \\
 C_P &= H_{i-1} - RQ_{i-1}|Q_{i-1}|
 \end{aligned}
 \tag{۷-۴}$$

۴-۲-۲-۲ انتگرال گیری تحلیلی و عددی از معادلات جریان دو فازی

معادلات جریان دو فازی که برای مخلوط سیال-بخار به کار می‌روند یک جفت معادله دیفرانسیل جزئی هذلولوی را تشکیل می‌دهند. از آن جا که امواج فشاری نمی‌توانند در مخلوط بخار سیال انتشار یابند (به علت فشار ثابت بخار سیال) بنابراین نمی‌توان روش خطوط مشخصه را برای حل این معادلات به کار برد. با تعریف و افزودن مشتق کامل در این معادلات به معادلاتی دست می‌یابیم که امکان حل تحلیلی بخشی از آن وجود دارد. اولین بار این معادلات توسط سیمسون برای یک لوله به سمت بالا و سپس برای لوله‌های افقی و به سمت پایین توسط برگنت تکمیل گردید.

روش حل بدین گونه است که ابتدا سرعت مخلوط بخار سیال (V_m) از معادله حرکت جریان دو فازی (۳-۴۵) با استفاده از روش تحلیلی محاسبه می‌شود، سپس نسبت تخلخل (α_v) را با استفاده از انتگرال گیری عددی از معادله پیوستگی بدست می‌آوریم.

حل معادله حرکت (۳-۴۵) برای مجهول V_m به شیب لوله (افقی، روبه بالا یا روبه پایین) وابسته است. با استفاده از این معادله سرعت نهایی^۱ V_{mi} در جریان حالت پایدار در فشار بخار با صفر قرار دادن شتاب بخار سیال ($dV_m / dt = 0$) به صورت زیر بدست می‌آید.

$$V_{mi} = \sqrt{\frac{2gD|\sin \theta|}{f}} \quad (۸-۴)$$

سرعت اولیه مخلوط بخار سیال با V_{mi} نشان داده می‌شود، که در زمان شروع کاپیتاسیون t_i در فاصله x در طول لوله در جایی که فشار به زیر فشار بخار برسد شکل می‌گیرد. در نهایت با انتگرال گیری از معادله (۳-۴۵) در زمان t می‌توان سرعت مخلوط بخار سیال (V_m) را به شکل زیر بیابیم.

$$\int_{V_{mi}}^{V_m} \frac{dV_m}{V_m - g \sin \theta - \frac{fV_m|V_m|}{2D}} = \int_{t_i}^t dt \quad (۹-۴)$$

سرعت اولیه را می‌توان به وسیله یکی از معادلات مشخصه ضربه قوچ (C^+ و C^-) در شبکه روش عددی خطوط مشخصه با قرار دادن فشار برابر فشار بخار محاسبه نمود. زمانی که جریان به سمت بالادست باشد از معادله C^- و زمانی که جریان به سمت پایین دست باشد از معادله C^+ استفاده می‌کنیم. در ادامه نتایج انتگرال گیری تحلیلی برای محاسبه V_m آورده شده است.

الف) لوله شیب دار با $\theta V_{mi} > 0$

با این فرض دو حالت وجود خواهد داشت. اول شیب و سرعت اولیه هر دو مثبت باشند. دوم هر دو پارامتر منفی باشند. در این حالات ابتدا یک جریان رو به بالا برقرار خواهد بود، با توجه به اینکه فشار در این ناحیه

^۱ Terminal velocity

ثابت می‌باشد، سرعت جریان در اثر وزن آن در لحظه بازگشت¹ (t_r) به صفر می‌رسد. و بعد از آن جهت جریان عکس می‌گردد. در نهایت برای محاسبه سرعت قبل از t_r از رابطه زیر استفاده خواهد شد

$$V_m = V_{mt} \tan \left(\tan^{-1} \left(\frac{V_{mi}}{V_{mt}} \right) - \text{sign}(\theta) \frac{fV_{mt}}{2D} (t - t_i) \right) \quad (10-4)$$

که در رابطه فوق sign تابع علامت می‌باشد. بعد از تغییر جهت جریان ($t > t_r$) خواهیم داشت

$$V_m = V_{mt} \frac{e^{-\text{sign}(\theta) fV_{mt}(t-t_r)/D} - 1}{e^{-\text{sign}(\theta) fV_{mt}(t-t_r)/D} + 1} \quad (11-4)$$

همچنین زمان تغییر جهت جریان (t_r) از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$t_r = t_i + \text{sign}(\theta) \frac{2D}{fV_{mt}} \tan^{-1} \left(\frac{V_{mi}}{V_{mt}} \right) \quad (12-4)$$

لوله شیب دار با $\theta V_{mi} < 0$

این حالت شامل جریان روبه بالا و شیب منفی و یا جریان روبه پایین و شیب مثبت می‌شود. که سرعت مخلوط از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$V_m = V_{mt} \frac{V_{mi} - V_{mt} + (V_{mt} + V_{mt}) e^{-\text{sign}(\theta) fV_{mt}(t-t_r)/D} - 1}{V_{mt} - V_{mi} + (V_{mt} + V_{mt}) e^{-\text{sign}(\theta) fV_{mt}(t-t_r)/D} + 1} \quad (13-4)$$

و در لوله‌های افقی داریم:

1 Reversal time

$$V_m = V_{mi} \frac{2DV_{mi}}{2D + \text{sign}(V_{mi})fV_{mi}(t-t_i)} \quad (14-4)$$

با محاسبه سرعت مخلوط بخار سیال از روابط فوق می‌توان با انتگرال گیری از معادله پیوستگی (۳-۳۹) در زمان t ، برای محاسبه نسبت تخلخل با فرض گام زمانی Δt و ضریب وزن ψ در جهت محور زمان، رابطه زیر را بدست آورد:

$$(\alpha_v)_{k,t} = (\alpha_v)_{k,t-\Delta t} + \psi((V_m)_{j+1,t} - (V_m)_{j,t})\Delta t / \Delta x + (1-\psi)((V_m)_{j+1,t-\Delta t} - (V_m)_{j,t-\Delta t})\Delta t / \Delta x \quad (15-4)$$

که در آن j شماره گره بالا دست و $j+1$ شماره گره پایین دست در دامنه محاسباتی k با طول Δx می‌باشد.

۳-۲-۴ حل تداخلی معادلات ضربه

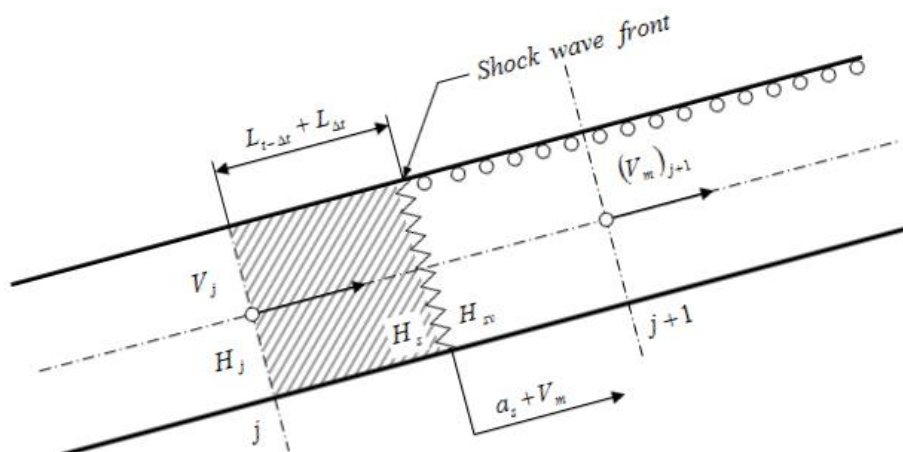
معادلات ضربه ((۳-۶۱) و ((۳-۶۸) یک سیستم معادلات جبری راتشکیل می‌دهند که حرکت پیشانی موج ضربه را در مخلوط بخار سیال توصیف می‌کنند. این معادلات با یکی از معادلات سازگاری ضربه قوچ مقتضی ترکیب می‌شود (چنانچه موج به سمت بالا دست حرکت کند از رابطه مشخصه مثبت و اگر موج به سمت پایین دست حرکت کند از رابطه مشخصه منفی استفاده خواهد شد). همچنین برای مسیر طی شده توسط موج ضربه ($L_{\Delta t}$) در زمان یک گام زمانی (Δt) می‌توان رابطه زیر را نوشت :

$$L_{\Delta t} - (a_s + V_m)\Delta t = 0 \quad (16-4)$$

اگر معادله حرکت را طبق شکل ۲-۴ برای سیال متراکم شده در فاصله $L_{t-\Delta t} + L_{\Delta t}$ بنویسیم معادله زیر حاصل می‌شود [۴۸].

$$H_j - H_s - f \frac{L_{t-\Delta t} + L_{\Delta t}}{D} \frac{V|V|}{2g} = \frac{L_{t-\Delta t} + L_{\Delta t}}{g} \frac{dV}{dt} \quad (17-4)$$

که در این معادله H_j هد پیزومتری در بالا دست سیال متراکم شده می‌باشد (مقطع j).



شکل ۴-۲ حرکت پیشانی موج ضربه در محدوده محاسباتی

معادله حرکت بدست آمده می‌بایست برای حرکت موج ضربه در شبکه محاسباتی باز نویسی شود. با گسسته سازی عبارت لختی در معادله قبل، انتگرال گیری از عبارت اصطکاک و استفاده از دبی به جای سرعت $(Q = AV)$ به رابطه زیر دست خواهیم یافت

$$H_j - H_s - \frac{f(L_{t-\Delta t} + L_{\Delta t})}{2gDA^2} Q_j |Q_{j,t-\Delta t}| - \frac{L_{t-\Delta t} + L_{\Delta t}}{gA\Delta t} (Q_j - Q_{j,t-\Delta t}) = 0 \quad (18-4)$$

همچنین معادلات ضربه برای حرکت وجه مشترک در فاصله نقاط شبکه به صورت‌های زیر نوشته می‌شوند.

- معادله پیوستگی برای حرکت پیشانی موج ضربه

$$a_s \left[\frac{g}{a^2} (H_s - H_{sv}) + (\alpha_v)_k \right] - \left(\frac{Q_j}{A} - (V_m)_{j+1} \right) = 0 \quad (19-4)$$

- معادله حرکت برای حرکت پیشانی موج ضربه

$$g(H_s - H_{sv}) + \left(\frac{Q_j}{A} - (V_m)_{j+1} \right) \left(\frac{Q_j}{A} - (V_m)_{j+1} - a_s \right) = 0 \quad (20-4)$$

که در این روابط $(V_m)_{j+1}$ مستقیماً از یکی از روابط (۱۰-۴) تا (۱۴-۴) محاسبه می‌شود (که به شیب لوله و سرعت شروع کاویتاسیون بستگی دارد).

مجهولات در این سیستم پنج معادله غیر خطی، ((۵-۴) یا (۶-۴)، (۱۶-۴)، (۱۸-۴)، (۱۹-۴) و (۲۰-۴)) شامل هد پیزومتری (H_j) ، فشار (H_s) در وجه مشترک سمت ضربه قوچ، دبی (Q_j) ، سرعت موج ضربه (a_s) و طول حرکت موج وجه مشترک (L_M) در زمان Δt می‌باشند. که مجهولات این دستگاه معادلات غیر خطی می‌بایست با یکی از روش‌های عددی مانند روش نیوتون-رافسون بدست آیند.

۴-۲-۴ انتگرال عددی معادله پیوستگی حفره گسسته

حفره‌های بخار گسسته به مقاطع محاسباتی، در شبکه خطوط مشخصه محدود می‌شوند. یک حفره بخار زمانی می‌تواند در گره‌های داخلی و یا مرزهای انتهایی (شیر، پمپ و ...) تشکیل شود که فشار محاسبه شده (H_j) در ناحیه ضربه قوچ از فشار بخار کمتر شود. هد فشار به وسیله یکی از معادلات سازگاری ضربه قوچ محاسبه می‌شود. در گره‌های داخلی هر دو معادله و در مرزها یکی از معادلات به کار گرفته می‌شوند.

افزایش و کاهش حجم حفره بخار گسسته به وسیله معادله پیوستگی (۳-۶۹) تعریف می‌شود. این معادله نیز که برای محاسبه حجم حفره به کار می‌رود توسط انتگرال گیری عددی و استفاده از ضریب وزن در جهت زمان در شبکه ضربدری روش خطوط مشخصه به کار گرفته می‌شود. در نتیجه آن رابطه زیر حاصل خواهد

شد.

$$V_V = \int_{t_{in}}^t (Q_P - Q_{Pu}) dt$$

$$(\mathbb{V}_{vc})_{j,t} = (\mathbb{V}_{vc})_{j,t-2\Delta t} + [(1-\psi)(Q_{j,t-2\Delta t} - Q_{uj,t-2\Delta t}) + \psi(Q_{j,t} - Q_{uj,t})] 2\Delta t \quad (21-4)$$

هنگامی که دو ناحیه مجاور حفره، حاوی سیال خالص باشد، برای محاسبه دبی در دو طرف حفره از معادلات سازگاری ضربه قوچ با فشار برابر فشار بخار ($H_j = H_v$) استفاده می‌شود. زمانی که نواحی مجاور حفره حالت بخاری پیدا کند، سرعت در ناحیه کاویتاسیون بخاری توسط یکی از معادلات جریان دو فازی که رابط آن قبلاً بدست آمد، محاسبه خواهد شد، و برای محاسبه حجم حفره از دبی نظیر آن ($Q = V_m A$) استفاده می‌شود.

با حل مجموعه معادلات فوق، مدل عددی وجه مشترک تعمیم یافته ارائه خواهد شد، که به صورت هم زمان با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی برای حل معادلات جدایی ستون به کار می‌رود. در زیر، حالت‌های مختلفی که ممکن است در لوله برای نواحی و گره‌های مختلف رخ بدهد آورده شده است. تمامی این حالات در برنامه کامپیوتری متلب لحاظ شده‌اند.

۴-۳ حالات مختلف محتمل برای نواحی و گره‌های محاسباتی

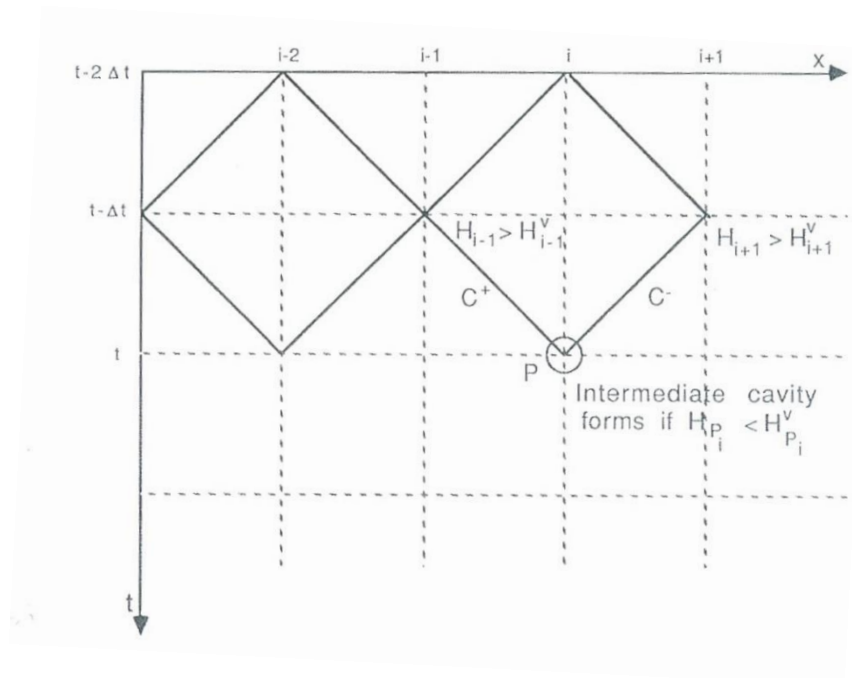
معیار شکل‌گیری حفرات بخار میانی با تشکیل و یا گسترش یک ناحیه بخاری گسترده متفاوت است. شرط اصلی شکل‌گیری هر دو حالت کاهش فشار و رسیدن آن به فشار بخار سیال می‌باشد. در مقطعی با فشار بخار سیال باید چگونگی تشکیل حفره بخار میانی و ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده از هم متمایز شود که این امر به مقدار فشار در مقاطع محاسباتی بالادست و پایین دست مقطع مورد نظر بستگی دارد [۴۹].

۱-۳-۴ تشکیل حفره بخار میانی

همان‌طور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود یک حفره بخار گسسته در گره‌های داخلی، زمانی شکل می‌گیرد که فشار گره‌های مجاور در گام زمانی قبلی بیشتر از فشار بخار باشد. زمانی که یک حفره بخار گسسته در مدل عددی در گره‌های داخلی شکل بگیرد، فشار پیزومتری را در معادلات مشخصه برابر فشار بخار قرار می‌دهیم. این فشار به صورت زیر بیان می‌شود

$$H_j = H_v = z_j - \frac{p_b^*}{\gamma} + \frac{p_v^*}{\gamma} \quad (۲۲-۴)$$

که p_b^* فشار بارومتریک مطلق، p_v^* فشار بخار مطلق و γ وزن مخصوص سیال می‌باشد.



شکل ۳-۴ تشکیل حفره بخار میانی

۱-۱-۳-۴ تشکیل حفره بخار در مقطع شیر

اگر در شرط مرزی شیر فشار به فشار بخار سیال برسد در آنجا حفره بخار شروع به رشد می‌کند. دبی

بالادست شیر با استفاده از معادله سازگاری C^+ در روش خطوط مشخصه محاسبه می شود. حجم حفره از رابطه زیر بدست می آید:

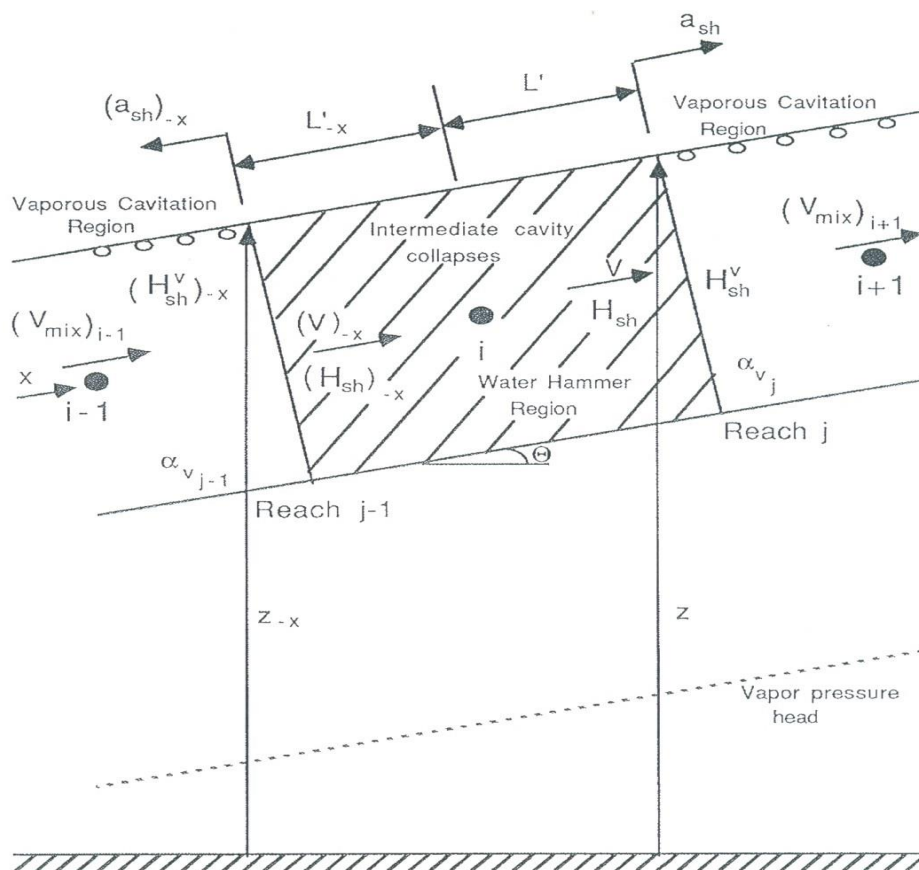
$$V_V = \int_{t_{in}}^t -Q_{Pu} dt \quad (۲۳-۴)$$

۴-۳-۲ متلاشی شدن حفره بخار میانی

هنگامی اتفاق می افتد که در زمان فعلی، حجم تجمعی محاسبه شده حفره کوچکتر از صفر شود و در نتیجه در آن گره، مجددا جریان تک فازی سیال تشکیل خواهد شد. از بین رفتن حفره سبب تشکیل موج ضربه، ناحیه ضربه قوچ و یا هر دو خواهد شد. که متناسب با حالت شکل گرفته در هر سمت آن از معادلات ضربه قوچ و/یا معادلات ضربه برای جریان سیال و/یا تراکم ناحیه مخلوط بخار سیال به فاز سیال استفاده می شود.

با متلاشی شدن یک حفره امکان وقوع سه حالت مختلف پیش می آید. حالت اول این است که هر دو طرف لوله سیال هستند و فشاری بالاتر از فشار بخار سیال دارند که در این حالت روش حل خطوط مشخصه برای محاسبه فشار و دبی مقطع مورد نظر استفاده می شود. در حالت دوم، یک سمت حفره متلاشی شده ناحیه ضربه قوچ و در طرف دیگر ناحیه کاویتاسیون بخاری وجود دارد. در این حالت یک موج ضربه از سمت حفره متلاشی به طرف ناحیه کاویتاسیون بخاری شکل می گیرد. همان طور که گفته شد مجهولات در این حالت شامل هد پیزومتری (H_j) ، فشار (H_s) در وجه مشترک سمت ضربه قوچ، دبی (Q_j) ، سرعت موج ضربه (a_s) و طول حرکت موج وجه مشترک (L_M) در زمان Δt می باشند. در حالت سوم هر دو سمت مقطع مورد نظر، ناحیه کاویتاسیون بخاری وجود دارد. همان طور که در شکل ۴-۴ مشاهده می شود، از بین رفتن یک حفره میانی که بین دو ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده قرار دارد ترکیبی از حرکت دو وجه مشترک به سمت بالا دست و پایین دست را ایجاد خواهد کرد. در این حالت معادله ضربه قوچ را نمی توان به کاربرد. روابط موجود در این حالت شامل موارد زیراند، معادلات ضربه، معادله کینماتیکی (۳-۵۵) که این معادلات برای هر دو سمت ناحیه تازه تشکیل شده، نوشته می شوند. رابطه دیگری که اضافه خواهد شد معادله حرکت (۴-

۱۷) است که برای هر دو سمت آن نوشته می‌شود. در این صورت مجهولات عبارت‌اند از دبی، سرعت موج ضربه، فشار پیژومتری در سمت ضربه قوچ و وجه مشترک و طول حرکت پیشانی وجه مشترک در یک گام زمانی، که این مجهولات برای هر دو سمت می‌بایست همزمان بدست آیند. در این حالت نیز با یک سیستم غیر خطی معادلات روبه‌رو هستیم که به کمک یکی از روش‌های عددی حل می‌گردد.

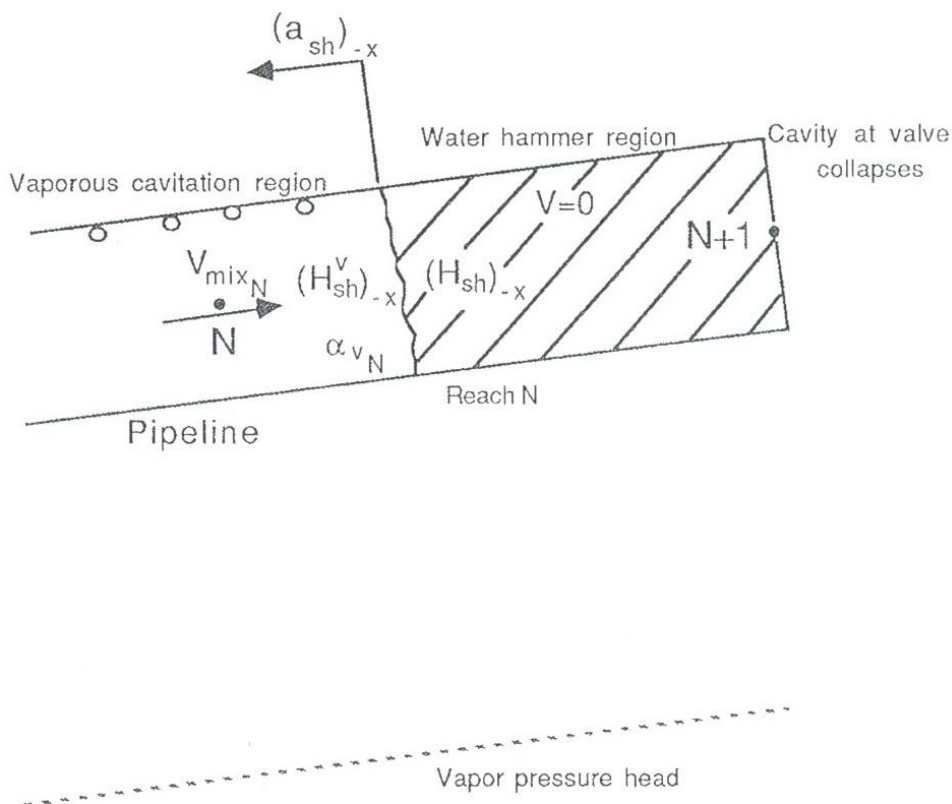


شکل ۴-۴ متلاشی شدن حفره بخار میانی بین دو ناحیه کاویتاسیون بخاری

۴-۳-۲-۱ متلاشی شدن حفره بخار در گره شیر

با متلاشی شدن حفره بخار در مقطع شیر چنانچه ناحیه بالادست شیر سیال باشد با استفاده از روش حل خطوط مشخصه، فشار و دبی گره شیر محاسبه می‌شوند. اما زمانی که ناحیه مجاور آن، ناحیه کاویتاسیون بخاری باشد، موج ضربه از سمت شیر به ناحیه بالادست شکل می‌گیرد (حرکت موج ضربه از راست به چپ)

[۴۹]. در این حالت، در معادلات ضربه مقدار عددی سرعت در ناحیه سیال برابر با صفر در نظر گرفته می شود (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵ متلاشی شدن حفره در گره شیر

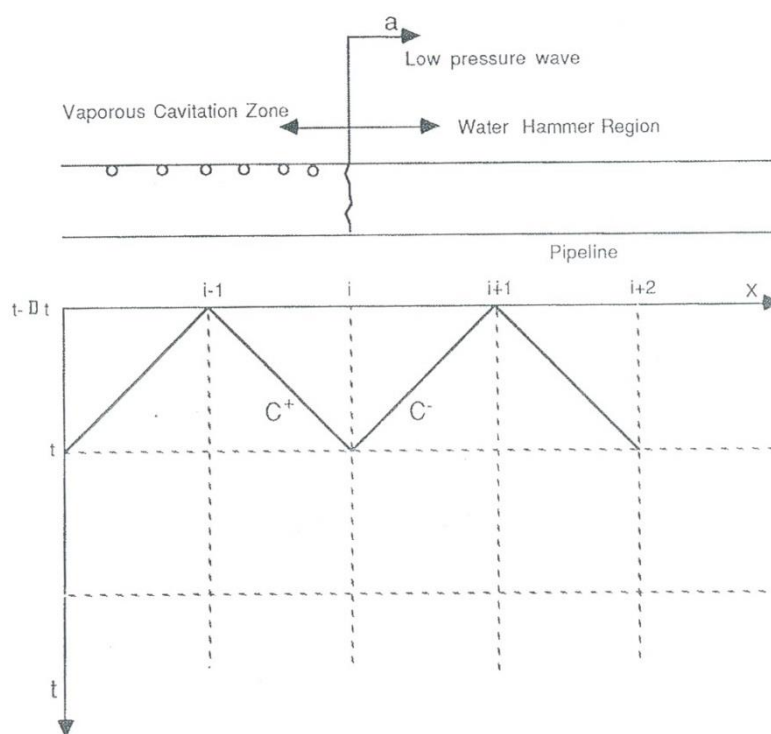
۴-۳-۳ تشکیل یا گسترش ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده

اگر فشار نقطه محاسباتی کمتر از فشار بخار سیال شود و در بازه زمانی قبلی یکی از مقاطع محاسباتی بالادست یا پایین دست مقطع مورد نظر، فشاری برابر فشار بخار داشته باشد (حفره ای در آن ایجاد شده باشد) و یا یک ناحیه بخاری گسترده بوده باشد، فرض می‌گردد که در آن ناحیه محاسباتی، یک ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده به سمت گره مورد نظر شکل بگیرد [۴۹]. برای این حالت می‌بایست سرعت اولیه (V_m) برای گره z محاسبه شود. همچنین نسبت تخلخل برای رشد و کوچک شدن ناحیه‌ی بخاری در آن دامنه محاسبه خواهد شد. در مقطع مورد نظر همین که فشار سیال از فشار بخار بیشتر شود گسترش

ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده متوقف می شود و امکان حرکت موج ضربه به وجود می آید که دو ناحیه ضربه قوچ و کاویتاسیون را از هم جدا خواهد کرد.

۱-۳-۳-۴ گسترش ناحیه بخاری از چپ به راست خط لوله

همان طور که در شکل ۶-۴ دیده می شود، در نتیجه حرکت یک موج به سمت یک ناحیه با فشار کمتر، از چپ به راست در خط لوله یک ناحیه کاویتاسیون بخاری شکل می گیرد.



شکل ۶-۴ گسترش ناحیه بخاری از چپ به راست خط لوله

استریتز (۱۹۸۳) برای به دست آوردن سرعت اولیه به هنگام تشکیل بخار از یک تکنیک میانمایی استفاده کرد. اگر چه این روش برای جریان های ناماندگاری که به صورت آنی ایجاد شده بودند مناسب و قابل قبول نبود اما برای جریان های ناماندگار تدریجی دقت کافی داشت و نتایج مناسب و قابل قبولی را ارائه می داد.*

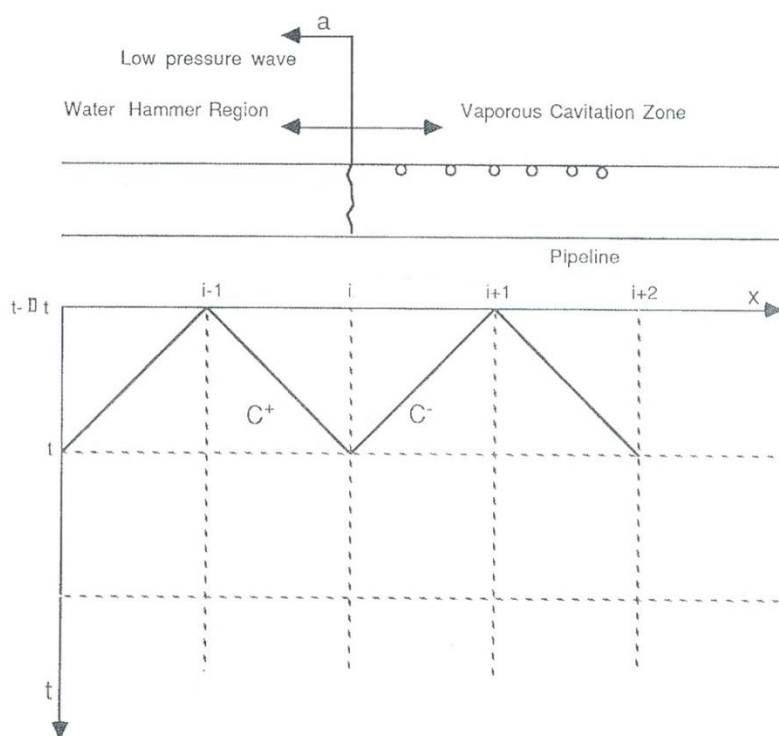
روش جدید محاسبه سرعت اولیه در ناحیه کاویتاسیون بخاری، برای جریان های ناماندگار آنی و تدریجی

مناسب است. در این روش به هنگام تشکیل بخار، دبی پایین دست مقطع موردنظر با استفاده از معادله سازگاری C^- محاسبه می شود، به این صورت که دبی و فشار مقطع $i+1$ از زمان قبلی معلوم است، فشار در مقطع i هم برابر فشار بخار سیال می باشد، در نتیجه تنها مجهول در این معادله دبی در نقطه i می باشد. با داشتن دبی و تقسیم آن بر سطح مقطع لوله، سرعت اولیه به آسانی قابل محاسبه است:

$$V_{mix}^{in} = \frac{Q_p}{A} \quad (24-4)$$

۲-۳-۳-۴ گسترش ناحیه بخاری از راست به چپ خط لوله

شکل گیری ناحیه بخاری از سمت راست به چپ در شکل ۷-۴ نشان داده شده است. با استفاده از معادله C^+ و معلوم بودن دبی و فشار مقطع $i-1$ از زمان قبلی، دبی بالادست نقطه i قابل محاسبه است (فشار نقطه i همان فشار بخار سیال است).



شکل ۷-۴ گسترش ناحیه بخاری از راست به چپ خط لوله

۴-۳-۴ حرکت موج ضربه

همان طور که گفته شد یک ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده با انتشار درون یک ناحیه ضربه قوچ گسترش پیدا می‌کند. هرگاه گسترش ناحیه بخاری گسترده متوقف شود، مرز جدا کننده نواحی ضربه قوچ و کاویتاسیون بخاری تمایل دارد که به درون ناحیه کاویتاسیون (بخاری) باز گردد. یک موج فشاری (موج ضربه) و یا متلاشی شدن یک حفره میانی که بین دو ناحیه مخلوط بخار سیال با منابع متفاوت قرار گرفته، سبب ایجاد امواج ضربه و تراکم ناحیه مخلوط بخار سیال و بازگشت آن به فاز سیال می‌شود.

۴-۳-۴-۱ حرکت موج ضربه از چپ به راست

در شکل ۴-۸ حرکت موج ضربه از چپ به راست در لوله نشان داده شده است. معیار شروع حرکت موج ضربه از گره i در یک گام زمانی، بیشتر بودن سرعت گره i در ناحیه ضربه قوچ نسبت به سرعت بخاری در گره $i+1$ می‌باشد [۴۹]. همان طور که می‌دانیم در گام زمانی فعلی سرعت بخاری در گره $i+1$ از زمان قبلی معلوم است، اما سرعت گره i که در ناحیه سیال است، مجهول می‌باشد. واضح است که کمترین فشار نقطه i یعنی همان فشار بخار سیال، بیشترین سرعت ممکن در ناحیه ضربه قوچ را نتیجه می‌دهد. برای مقایسه دو سرعت بخاری گره $i+1$ و سرعت گره i نیز باید بیشترین سرعت ممکن در گره i را استفاده کنیم. در این حالت چنانچه بیشترین سرعت در ناحیه ضربه قوچ از سرعت بخاری گره $i+1$ کمتر شود، موج ضربه امکان نفوذ به ناحیه کاویتاسیون بخاری را ندارد.

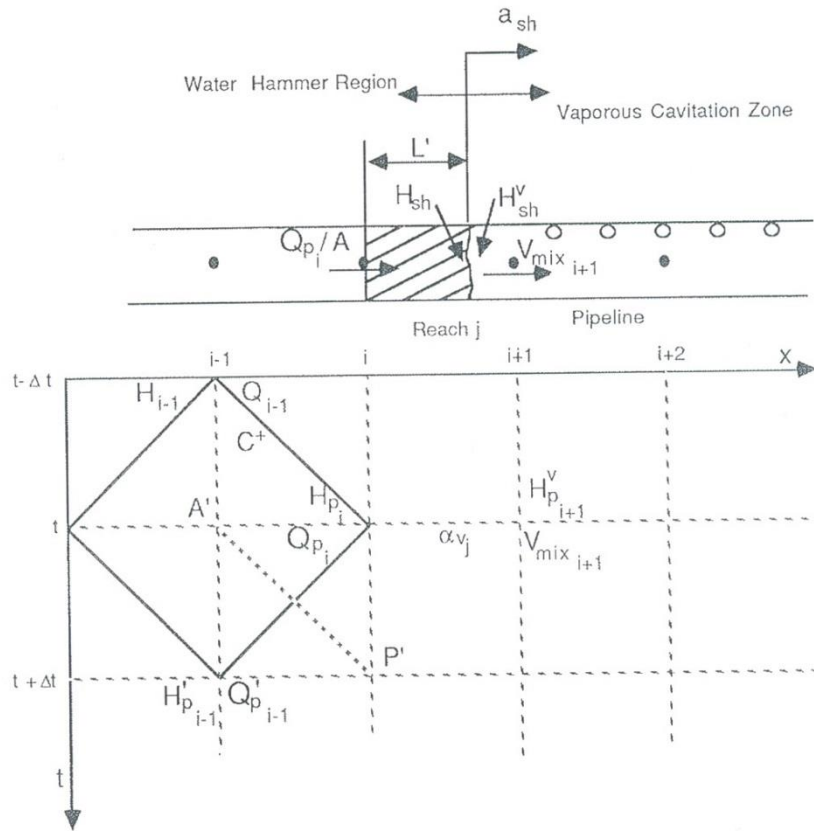
بیشترین سرعت در گره i با استفاده از معادله سازگاری C^+ به دست می‌آید.

$$(Q_{Pu_i})_{max} = \frac{C_P - H_{P_i}^v}{B_P} \quad (۲۵-۴)$$

شرط حرکت موج ضربه از چپ به راست به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{(Q_{P_i})_{max}}{A} \geq (V_{mix})_{i+1} \quad (۲۶-۴)$$

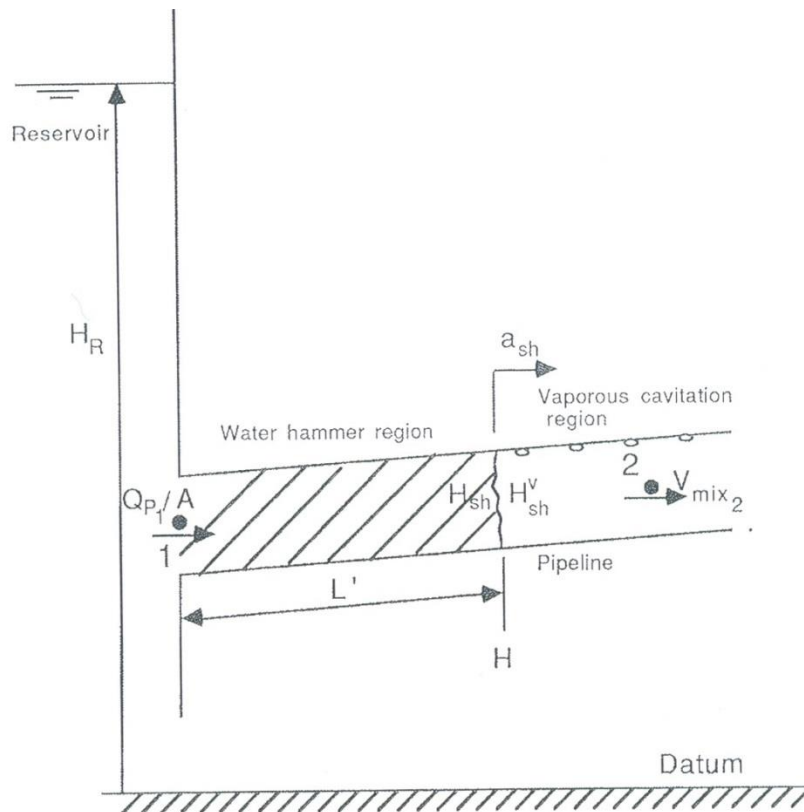
چنانچه شرط فوق برقرار شود معادلات ضربه برای گره i قابل حل هستند.



شکل ۴-۸ حرکت موج ضربه از چپ به راست خط لوله

۴-۳-۲ تشکیل ناحیه بخاری در مجاورت گره مخزن و حرکت موج ضربه از چپ به راست

چنانچه فشار در مقطع مجاور مخزن از فشار بخار سیال بالاتر باشد، با استفاده از معادلات ضربه قوچ، مقدار دبی مخزن محاسبه می شود. در حالت وجود ناحیه کاویتاسیون بخاری مجاور مخزن، موج ضربه از سمت مخزن به پایین دست لوله شکل می گیرد (حرکت موج ضربه از چپ به راست). تنها تفاوت، در حل معادلات ضربه این حالت با معادلات ضربه چپ به راست نقاط میانی لوله این است که به جای استفاده از معادله ضربه قوچ C^+ ، فشار ثابت و معلوم گره مخزن استفاده می شود (شکل ۴-۹).



شکل ۴-۹ حرکت موج ضربه از مخزن به سمت پایین دست

۴-۳-۳-۴ حرکت موج ضربه از راست به چپ

شکل ۴-۱۰ حرکت موج ضربه از راست به چپ لوله را نمایش می دهد. معیار شروع حرکت موج ضربه از گره i در یک گام زمانی، کمتر بودن سرعت گره i در ناحیه ضربه قوچ نسبت به سرعت بخاری در گره $i-1$ می باشد [۴۹]. همان طور که می دانیم در گام زمانی فعلی سرعت بخاری در گره $i-1$ از زمان قبلی معلوم است، اما سرعت گره i که در ناحیه سیال است، مجهول می باشد. واضح است که کمترین فشار نقطه i یعنی همان فشار بخار سیال، بیشترین سرعت ممکن در ناحیه ضربه قوچ را نتیجه می دهد. برای مقایسه دو سرعت بخاری گره $i-1$ و سرعت گره i نیز باید بیشترین سرعت ممکن در گره i را استفاده کنیم. در این حالت چنانچه بیشترین سرعت در ناحیه ضربه قوچ از سرعت بخاری گره $i-1$ بیشتر شود، موج ضربه امکان نفوذ به ناحیه کاویتاسیون بخاری را ندارد.

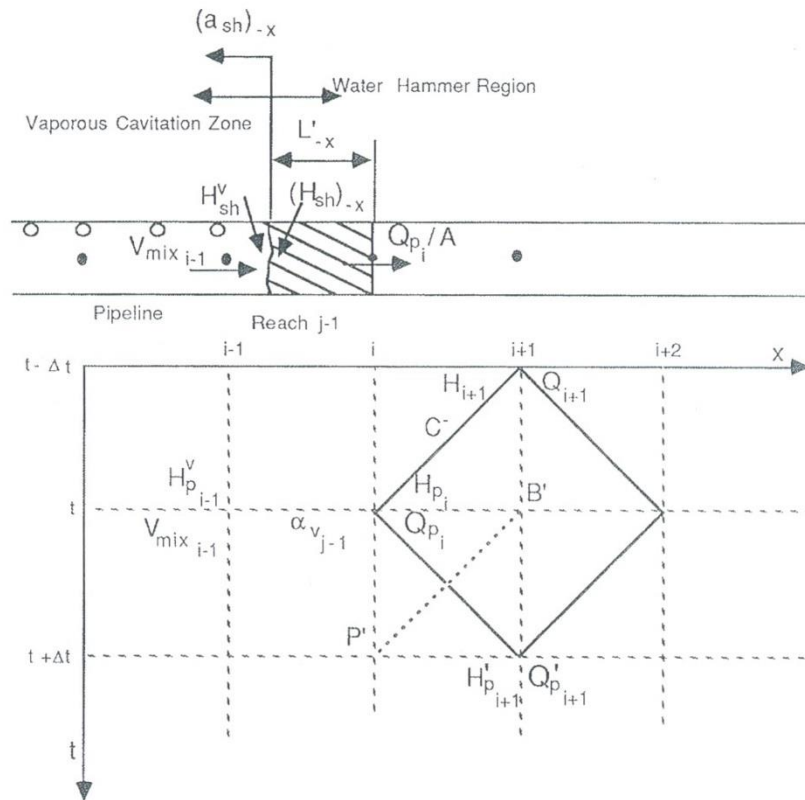
بیشترین سرعت در گره i با استفاده از معادله سازگاری C^- به دست می آید.

$$(Q_{Pi})_{max} = \frac{H_{Pi}^v - C_M}{B_M} \quad (27-4)$$

شرط حرکت موج ضربه از راست به چپ به صورت زیر به دست می آید:

$$\frac{(Q_{Pi})_{max}}{A} \leq (V_{mix})_{i-1} \quad (28-4)$$

چنانچه شرط فوق برقرار شود معادلات ضربه برای گره i قابل حل هستند.



شکل ۴-۱۰ حرکت موج ضربه از راست به چپ خط لوله

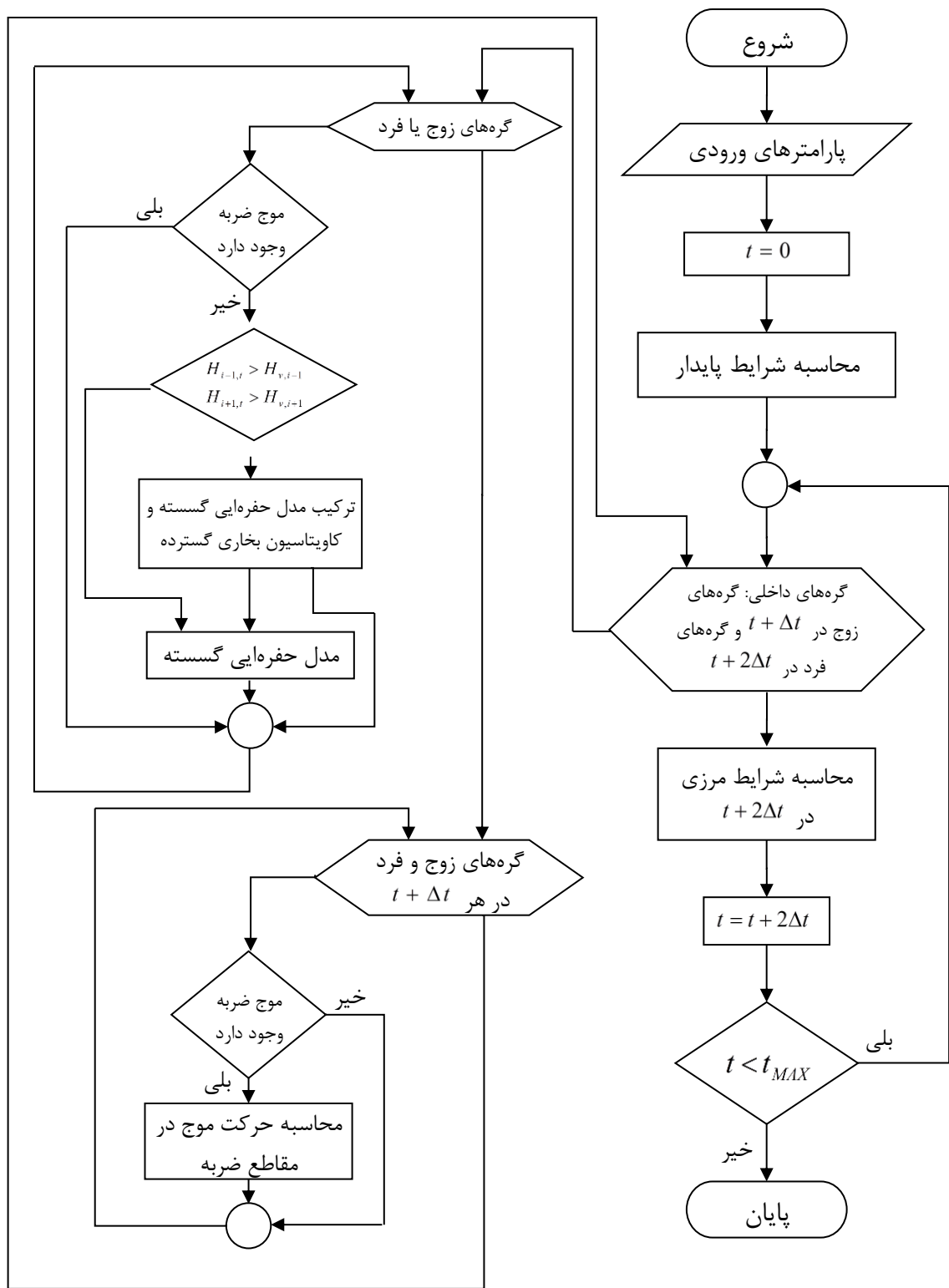
۴-۴ مدل سازی کامپیوتری

ساختار کلی روش عددی در زیر بخش های قبلی بیان شد. در این قسمت به تشریح جزئیات آن برای یک لوله با شیب دلخواه پراخته می شود. لازم به ذکر است در حل کامپیوتری از نرم افزار متلب استفاده شده است. از روش حل خطوط مشخصه و شبکه ضربدری استفاده شده است. شرط مرزی بالا دست، مخزن با هد ثابت می باشد و شرط مرزی پایین دست، یک شیر در انتهای لوله است. طول لوله به فواصل یکسان و مشخصی به نام Δx تقسیم می شود و بازه های محاسبه فشار و دبی در هر گره روی لوله در فواصل زمانی Δt می باشند. گره هایی که فشار و دبی آن ها محاسبه می شوند با متغیر i مشخص می شوند، در نتیجه گره $i=1$ مربوط به شرط مرزی بالادست یعنی مخزن است و واضح است که انتهایی ترین گره همان گره شیر است. همانطور که قبلا بیان شد از الگوریتم استاندارد مدل حفره ایی بخار گسسته به عنوان پایه اساسی برای ایجاد مدل وجه مشترک استفاده می شود. در ضمن در طی مطالعات صورت گرفته، استفاده از شبکه ضربدری پیش بینی بهتری از تشکیل یک حفره در مقایسه با شبکه مستطیلی می دهد. همچنین نتایج بدست آمده از این شبکه در محدوده گسترده ای از پارامترها همخوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی نسبت به شبکه مستطیلی دارد. اولین گام در تحلیل مدل، محاسبه شرایط جریان حالت پایدار است. گام دوم محاسبه جریان غیرماندگار خواهد بود که این مرحله خود از دو قسمت محاسبه گره های داخلی و سپس محاسبه شرایط مرزی انتهایی تشکیل می شود. محاسبه شرایط اولیه در زمان $t=0$ انجام می گیرد، در این زمان دبی و فشار برای تمام نقاط محاسبه می شود. در انجام حلقه غیرماندگار، ابتدا گره های داخلی مورد تحلیل و محاسبه قرار می گیرند. مقادیر مجهول گره های محاسباتی با شماره زوج در اولین گام زمانی Δt تعیین می شوند. سپس گره های محاسباتی با شماره فرد در گام زمانی بعدی $2\Delta t$ محاسبه می شوند. اعمال شرایط مرزی انتهایی بعد از گذشت یک جفت گام زمانی صورت می گیرد (هر دو شرط مرزی مخزن و شیر، مقاطع محاسباتی فرد می باشند). در نهایت، این ترتیب محاسبات برای هر جفت گام های زمانی تکرار خواهد شد و

همین روند تا بازه زمانی انتهایی ادامه می یابد $(3\Delta t, 4\Delta t), (5\Delta t, 6\Delta t), \dots$.

در شکل ۴-۱۱ ساختار کلی مدل وجه مشترک تعمیم یافته در یک فلوجارت نشان داده شده است. که در

ادامه شرح جزئیات آن آورده شده است.



شکل ۴-۱۱ فلوچارت مدل وجه مشترک کائویناسیون بخاری تعمیم یافته (GIVCM)

۴-۴-۱ عملکرد گره‌های محاسباتی داخلی

عملکرد گره‌های محاسباتی داخلی در طول لوله در شرایط غیرماندگار خود شامل دو بخش عمده است. الف) محاسبه وضعیت جریان در تمامی گره‌های داخلی (حلقه A در شکل ۴-۱۱) که جزییات آن در ادامه آورده شده است (قسمت الف). ب) محاسبات حرکت موج ضربه‌ی شکل یافته درون ناحیه کاویتاسیون بخاری در هر گام زمانی (حلقه B در شکل ۴-۱۱)، توضیحات آن در قسمت ب آمده است. برای حرکت موج ضربه نیاز به درون یابی در فواصل بین شبکه محاسباتی می‌باشد.

الف) محاسبه وضعیت جریان در گره‌های داخلی در گام‌های زمانی به صورت یک در میان محاسبه خط گرادیان هیدرولیکی و دبی در این گره‌ها در دو قسمت انجام می‌شود. ابتدا بررسی می‌شود که آیا در گره مورد نظر موج ضربه از قبل وجود داشته یا خیر (حلقه A). سپس کنترل دیگری صورت می‌گیرد که آیا فشار گره‌های مجاور از فشار بخار بیشتر است یا نه. چنانچه پاسخ هر دو سؤال مثبت باشد، به این معنی که در آن گره نه موج ضربه وجود دارد، نه فشار گره‌های مجاور کمتر از فشار است. در این حالت روش خطوط مشخصه در نواحی ضربه قوچ (معادلات سازگاری) و مدل حفره‌ایی گسسته که خود از این معادلات استفاده می‌کند، به کار خواهند رفت. چنانچه کنترل اول منفی باشد (وجود موج ضربه در گره) محاسبات به قسمت ب انتقال می‌یابد، و اگر شرط کنترل کننده دوم منفی باشد، (فشار یکی از گره‌ها کمتر از فشار بخار باشد) می‌بایست از ترکیب روش‌های حفره بخار گسسته و کاویتاسیون گسترده استفاده شود (موضوع پارگراف آتی).

چنانچه فشار در یک یا هر دو مقطع مجاور در حال بررسی، کمتر از فشار بخار (برابر فشار بخار) باشد، برای تحلیل آن گره از مدل کاویتاسیون گسترده همراه با مدل حفره‌ایی گسسته، در یک فرآیند سه مرحله‌ای بهره جسته می‌شود. که مراحل آن عبارتند از

۱- مرحله اول گره‌هایی را شامل می‌شود که در آن گره‌ها حفره‌های میانی از قبل شکل گرفته و در مجاورت

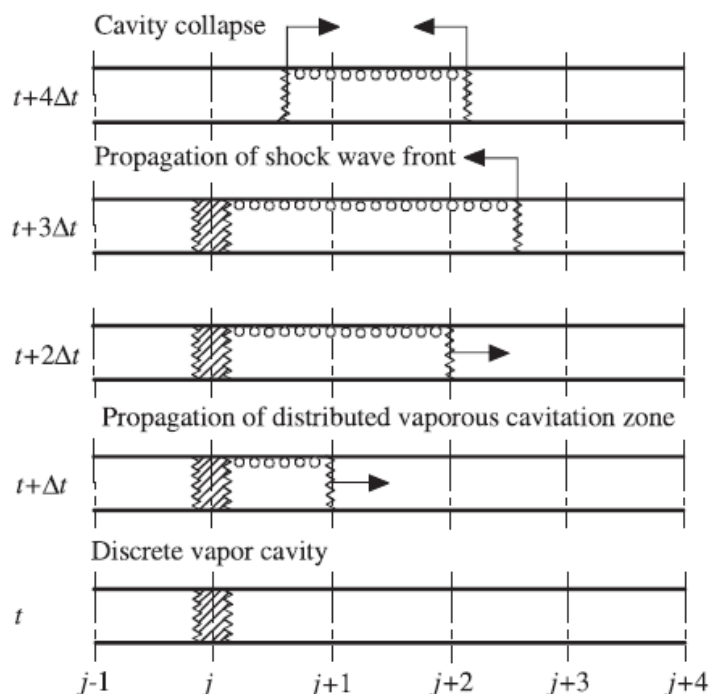
این حفره‌های میانی یک یا دو ناحیه کاویتاسیون بخاری قرار دارد. برای این گونه مقاطع می‌بایست حجم حفره بخار گسسته را محاسبه نمود. که برای بدست آوردن دبی بالا دست و پایین دست حفره از معادلات متناسب با وضعیت موجود استفاده می‌شود (از معادله مشخصه برای ناحیه ضربه قوچ و از معادلات جریان دو فازی برای ناحیه کاویتاسیون گسترده) حال اگر حجم حفره منفی یا صفر گردد (متلاشی شدن حفره) سبب ایجاد موج ضربه خواهد شد. که در واقع نقطه شروع موج ضربه می‌باشد و بعد از آن باید معادلات ضربه برای آن گره به کار روند. اگر یک طرف حفره ناحیه بخاری باشد بعد از متلاشی شدن حفره، فقط یک موج در ناحیه بخاری پیشرفت خواهد کرد (شکل ۴-۱۲ A) و اگر حفره در میان دو ناحیه بخاری باشد دو موج جداگانه در هر دو جهت (در دو ناحیه) پیش خواهند رفت. توضیحات حرکت موج در قسمت ب آورده شده است.

۲- در مرحله دوم گره‌های بخاری^۱ تحلیل می‌شوند. این گره‌ها، گره‌هایی هستند که حفره‌ایی در آن‌ها تشکیل نشده است، ولی در دو ناحیه مجاور آن گره، جریان دو فازی برقرار می‌باشد (ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده شکل ۴-۱۲ E)، لذا در آن گره فشار ثابت، و برابر فشار بخار است. مجهولاتی که در این گره و دامنه‌های کناری می‌بایست محاسبه شوند، سرعت مخلوط بخاری (V_m) و نسبت تخلخل دامنه‌ها است.

۳- گره‌های باقیمانده که شرایط این مراحل را دارا هستند و در دو دسته اول قرار نمی‌گیرند در این قسمت بررسی می‌شوند. چنانچه فشار محاسبه شده در این گره‌ها از فشار بخار کمتر شود و با توجه به اینکه فشار گره مجاور برابر فشار بخار بوده لذا این ناحیه تبدیل به ناحیه کاویتاسیون بخاری خواهد شد. این گسترش می‌تواند یا از یک حفره گسسته باشد (شکل ۴-۱۲ B) و یا اینکه از ناحیه بخاری مجاور آن شکل گرفته باشد، و در نتیجه یک ناحیه بخاری و یک گره بخاری جدید شکل بگیرد (شکل ۴-۱۲ C). و چنانچه فشار محاسبه شده از فشار بخار بیشتر باشد و یکی از نواحی کناری از نوع کاویتاسیون بخاری گسترده بوده باشد

¹ Vaporous sections

سبب ایجاد موج ضربه خواهد شد، و با شروع موج ضربه، این موج در ناحیه کاویتاسیون بخاری پیشرفت خواهد نمود (شکل ۴-۱۲ D) که این حالت نوع دیگری از شروع موج ضربه را شکل می‌دهد.



شکل ۴-۱۲ تشکیل کاویتاسیون و موج ضربه در یک لوله افقی

(ب) محاسبه حرکت موج ضربه در هر گام زمانی

محاسبات ضربه در هر گره، زمانی انجام می‌شود که شرایط تشکیل دهنده موج ضربه در آن گره رخ داده باشد و گره مورد نظر به عنوان ضربه تشخیص داده شود (با نشانه گذاری در آغاز ضربه). حرکت وجه مشترک بین نواحی سیال و کاویتاسیون بخاری، نتیجه پیشروی موج فشار مثبت درون ناحیه کاویتاسیون بخاری می‌باشد. که تراکم مخلوط بخاری را و تبدیل آن به سیال در پی خواهد داشت.

در مدل کامپیوتری محاسبات ضربه در مقاطع مقتضی که با ایجاد ضربه مشخص می‌شوند در تمامی گام‌های زمانی صورت می‌گیرد. در حالت کلی حرکت موج ضربه در ناحیه بخاری به سه دسته تقسیم می‌شود:

۱- حرکت وجه مشترک به سمت بالا دست لوله

۲- حرکت وجه مشترک به سمت پایین دست لوله

۳- با از بین رفتن یک حفره میانی مابین دو ناحیه بخاری دو موج ضربه در دو سمت منتشر شود

همانطور که قبلا بیان شد برای دو حالت اول، دستگاه پنج معادله پنج مجهول غیر خطی شکل می‌گیرد که معادلات به صورت خلاصه عبارتند از ۱- معادله پیوستگی ۲- معادله مومنتوم ۳- معادله سازگاری ضربه قوچ (مشخصه مثبت یا مشخصه منفی) ۴- معادله حرکت برای سیال متراکم شده ۵- معادله کینماتیک برای طول طی شده موج ضربه. و برای حالت سوم معادله ضربه قوچ حذف شده و معادله حرکت برای سیال افزوده شده، اضافه می‌شود.

۴-۴-۲ شرایط مرزی

مدل عددی برای دو شرط مرزی بسط داده شده است: اول یک مخزن بالا دست با هد ثابت و دوم یک شیر در پایین دست لوله.

الف) مخزن بالا دست

همان طور که می‌دانیم فشار در گره مخزن همواره ثابت و بالاتر از فشار بخار سیال است. در نتیجه تنها، مقدار فشار گره پایین دست مخزن تعیین کننده وقوع حالات مختلف می باشد. چنانچه فشار در گره پایین دست مخزن بالاتر از فشار بخار سیال باشد، دبی را می‌توان با استفاده از معادله استاندارد ضربه قوچ محاسبه نمود. حالت ممکن دوم، زمانی است که در ناحیه مجاور مخزن کاویتاسیون بخاری گسترده رخ دهد، در نتیجه یک موج ضربه از مخزن شروع می‌شود و به سمت پایین دست حرکت خواهد کرد، فرآیند حرکت موج در قسمت‌های قبل بیان شد. تنها تفاوت آن جایگزینی معادله مشخصه مثبت ضربه قوچ با شرط هد ثابت مخزن می‌باشد.

ب) شیر پایین دست

برای مدل سازی شیر، از یک تابع نمایی که رابطه بستن شیر را ارائه می‌دهد و روابط اندازه گیری شده در

آزمایشگاه استفاده شده است. در ادامه رخ دادهایی که ممکن است برای شیر همراه با پدیده کاویتاسیون به وقوع بپیوندد، آورده شده است.

۱- فشار در گره شیر از فشار بخار سیال بالاتر باشد دو حالت ممکن است رخ دهد.

۱-۱ فشار در گره بالا دست مخزن، بالاتر از فشار بخار سیال باشد، در این حالت دبی را می‌توان با استفاده از معادله استاندارد ضربه قوچ محاسبه نمود.

۱-۲ حالت دوم زمانی است که در ناحیه مجاور مخزن کاویتاسیون بخاری گسترده وجود دارد، در نتیجه یک موج ضربه از شیر شروع می‌شود و به سمت بالا دست حرکت خواهد کرد. ممکن است این موج ضربه در اثر متلاشی شدن حفره موجود در گره شیر باشد که از معادلات ضربه و معادله کینماتیک حرکت برای حل آن استفاده می‌شود.

۲- فشار در گره شیر از فشار بخار سیال کمتر باشد

۱-۲ چنانچه فشار در گره بالا دست مخزن، بالاتر از فشار بخار سیال باشد یک حفره بخار گسسته در گره شیر تشکیل شده است بدون آن که ناحیه مجاور آن (اولین دامنه محاسباتی بالا دست شیر) کاویتاسیون بخاری گسترده باشد. در گام‌های زمانی بعدی ممکن است یک ناحیه کاویتاسیون بخاری از حفره مجاور شیر گسترش پیدا کند و به سمت بالا دست شیر انتشار یابد.

۲-۲ چنانچه فشار در گره بالا دست مخزن، کمتر از فشار بخار سیال باشد بدین معنی است که ناحیه بخاری از گره بالا دست به سمت شیر گسترش یافته است. در گام‌های زمانی بعدی ممکن است حرکت وجه مشترک در ناحیه بخاری از مقطع بالا دست به سمت حفره در شیر رخ دهد.

حالت‌های خاص دیگری وجود دارد که خارج از بحث‌های این قسمت‌اند. در فصل بعد پیرامون نتایج خروجی برنامه مدل‌های عددی بحث و بررسی خواهد شد.

فصل پنجم

مقایسه و تحلیل نتایج عددی و آزمایشگاهی

۵-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا به توضیح و تشریح یک مدل آزمایشگاهی به عنوان مدل مرجع پرداخته می شود. سپس نتایج روش عددی مورد پژوهش ارائه و نکات مهم آن تحلیل شده و در قسمت بعد نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی مقایسه شده است.

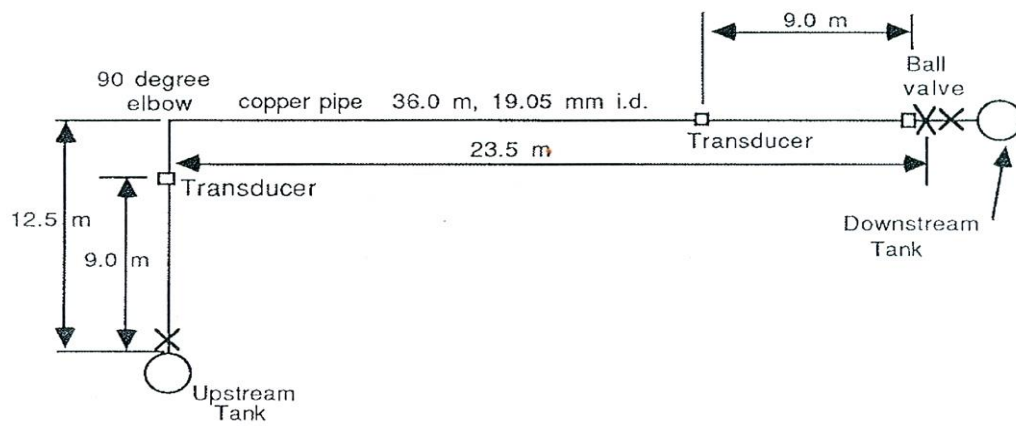
۵-۲ مدل آزمایشگاهی مرجع

مدل آزمایشگاهی که در این قسمت بررسی می‌شود توسط سیمسون در دانشگاه میشیگان آمریکا طراحی و ساخته شده است [۴۹]. هدف از طراحی این سیستم ساخت مدلی دقیق و قابل تنظیم جهت مقادیر مختلف سرعت‌های اولیه، فشارهای اولیه متفاوت و بستن‌های مختلف شیر بوده است که به بررسی پدیده جدایی ستون مایع اختصاص داشته است.

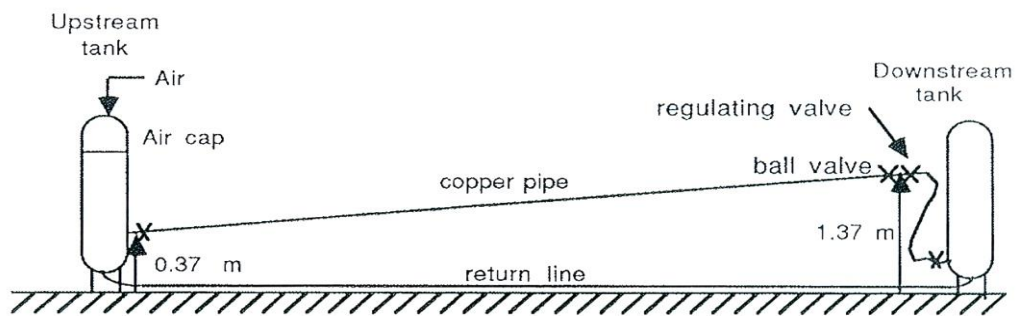
این مدل که شکل شماتیک آن در شکل ۵-۱ آورده شده است، از دو مخزن تحت فشار که به صورت کامپیوتری کنترل می‌شوند، تشکیل شده است. مخازن توسط یک لوله مسی با شیب $2/77$ درصد به یکدیگر متصل شده‌اند. اختلاف تراز دو مخزن ۱ متر می‌باشد. در کنار مخزن پایین دست یک شیر توپی قرار گرفته است. شیر توسط یک فنر پیچشی^۱ محرک بسته می‌شود و زمان بسته شدن آن حدود ۵ میلی ثانیه تا ۱۰ میلی ثانیه می‌باشد که به یک سیستم نوری جهت ثبت مکان شیر به صورت لحظه‌ای مجهز می‌باشد. طول لوله به کار رفته در این آزمایش ۳۶ متر است و در فاصله $12/5$ متری مخزن بالادست، یک خم 90° درجه به سمت راست وجود دارد. مشخصات لوله به کار رفته در آزمایش در جدول ۱ آورده شده است. جهت اندازه گیری فشار از چهار مبدل فشار^۲ (فشار سنج) استفاده شد که اطلاعات مربوط به این نقاط در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

¹ Torsional spring

² Pressure transducer



PLAN VIEW



SIDE VIEW (not to scale)

شکل ۱-۵ طرح سیستم آزمایشگاهی

جدول ۱-۵ مشخصات لوله مورد آزمایش

مشخصات لوله	مقادیر (m)
طول لوله (L)	۳۶
قطر داخلی لوله (D)	۰/۰۱۹۰۵
ضخامت جداره (e)	۰/۰۰۱۵۸۸

جدول ۵-۲ مشخصات مکان های فشارسنج

ارتفاع (m)	فاصله از مبدا (m)	موقعیت
۰/۳۷	۰	مخزن
۰/۶۲	۹	نقطه یک چهارم از بالادست
۱/۱۲	۲۷	نقطه یک چهارم از پایین دست
۱/۳۷	۳۶	شیر

سرعت موج تئوری برای لوله مسی با مشخصات فوق در مجاری جداره ضخیم، طبق رابطه زیر (معادله ۳-۱۸) محاسبه می شود

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K D}{E e} c_1}} = \sqrt{\frac{\frac{2.19 \times 10^9}{997.3}}{1 + \frac{2.19 \times 10^9 \cdot 0.01905}{119 \times 10^9 \cdot 0.0015} \cdot 1.02}} = 1280 \text{ (m/s)} \quad (1-5)$$

که متغیر بی بعد c_1 اثرات شرایط مرزی را در سرعت موج اعمال می کند. که توسط رابطه زیر محاسبه می شود.

$$c_1 = \frac{2e}{D}(1 + \mu) + \frac{D(1 - \mu^2)}{D + e} \quad (2-5)$$

$$c_1 = \frac{2 \times 0.0015}{0.01905}(1 + 0.34) + \frac{0.01905 \times (1 - 0.34^2)}{0.001905 + 0.0015} = 1.02$$

در مدل آزمایشگاهی از آب خالص جهت انجام آزمایش استفاده شده است. مشخصات سیال به کار رفته در آزمایشات و روابط فوق در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۵-۳ مشخصات سیال (آب)

ویژگی های سیال	مقادیر
دما (T_w)	23.9 ($^{\circ}C$)
چگالی (ρ)	997.3 (kg/m^3)
مدول بالک (K)	2.19×10^9 (N/m^2)
لزجت سینماتیکی (ν)	1.01×10^{-6} (m^2/s)
فشار مطلق بخار (p_v^*)	2.34 (kPa)

در آزمایشات گسترده ای که انجام شد اثر کمیت های زیر در وقوع رخ داد کاویتاسیون غیرماندگار در

سیستم های لوله مورد بررسی قرار گرفت

۱- سرعت جریان اولیه در لوله

۲- هد فشار استاتیکی در هر کدام از مخازن

۳- شیب لوله (روبه بالا و روبه پایین)

۴- موقعیت شیر در لوله

۵- زمان بسته شدن شیر

۵-۳ نتایج مدل عددی

در ادامه این فصل نتایج مدل عددی اجرا شده آورده شده و نکات مهم آن تحلیل شده است. برای سرعت های اولیه آزمایش شده سه نمودار زمان-فشار برای گره شیر ($i=33$)، گره یک چهارم بالادست لوله ($i=9$) و گره یک چهارم پایین دست لوله ($i=25$) رسم شده است و نتایج آزمایشگاهی و عددی مقایسه و تحلیل شده اند. در جدول ۴ اطلاعات استفاده شده در مدل آزمایشگاهی که برای اجرای مدل عددی نیز مورد نیاز است،

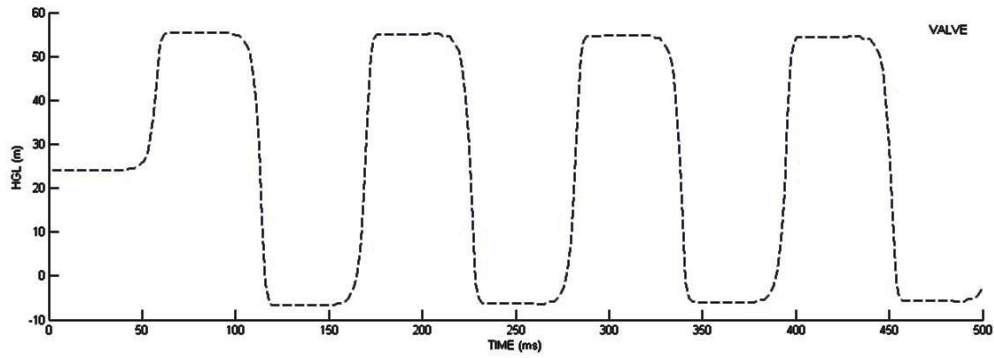
آورده شده است.

جدول ۴-۵ خلاصه ای از اطلاعات استفاده شده در مدل آزمایشگاهی

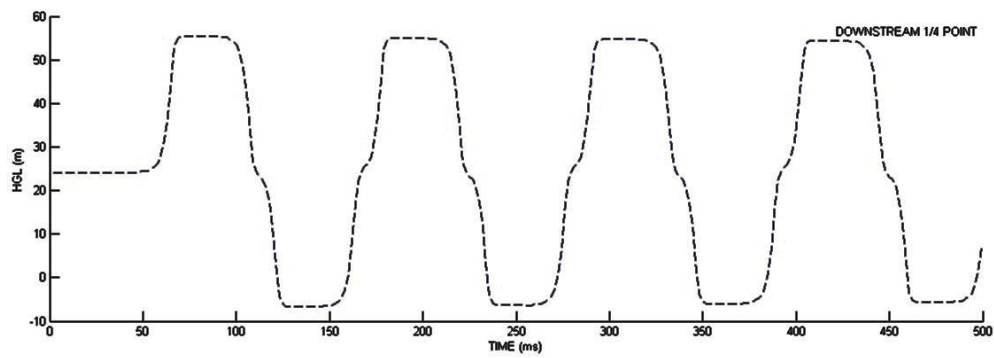
فاکتور اصطکاک	افت فشار (m)	فشار مخزن (m)	سرعت اولیه
۰/۰۳۲۵	۰/۱۸	۲۴/۳	۰/۲۳۹
۰/۰۳۱۵	۰/۳۳	۲۳/۴۱	۰/۳۳۲
۰/۰۲۸	۰/۵۹	۲۳/۱۶	۰/۴۶۶
۰/۰۲۳	۲/۸	۲۱/۷۴	۱/۱۲۵

سرعت اولیه ۰/۲۳۹ متر بر ثانیه

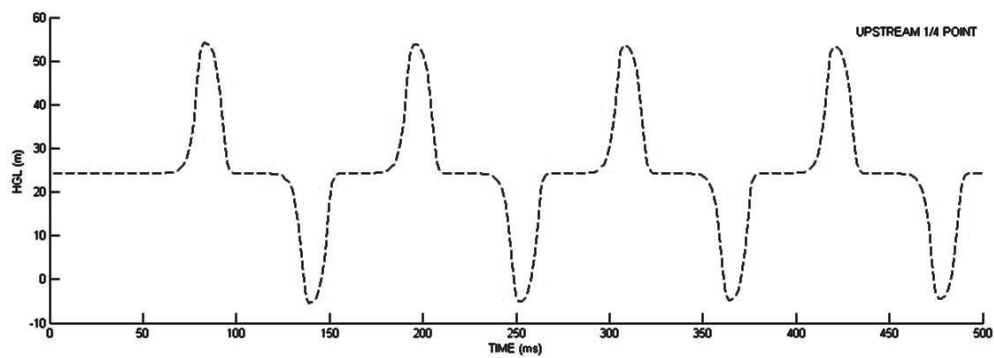
با سرعت اولیه ۰/۲۳۹ متر بر ثانیه فشار سیال هیچ گاه به فشار بخار نمی رسد و کلویتاسیونی رخ نمی دهد. بنابراین فشار و سرعت گره های محاسباتی همواره از معادلات ضربه قوچ پیروی می کنند. در این آزمایش شیر در لحظه ۴۷ میلی ثانیه شروع به بسته شدن می کند و ۱۷ میلی ثانیه بعد به طور کامل بسته شده است. با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی واضح است مدل عددی به خوبی می تواند پدیده ضربه قوچ را خصوصا در دو پیک ابتدایی پیش بینی کند. اما نتایج عددی میرایی کمتری نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می دهند و با گذشت زمان در زمان بندی مقادیر فشار اختلاف ایجاد می شود که یکی از عوامل مهم و تاثیر گذار فرض اصطکاک ماندگار در مدل اولیه می باشد.



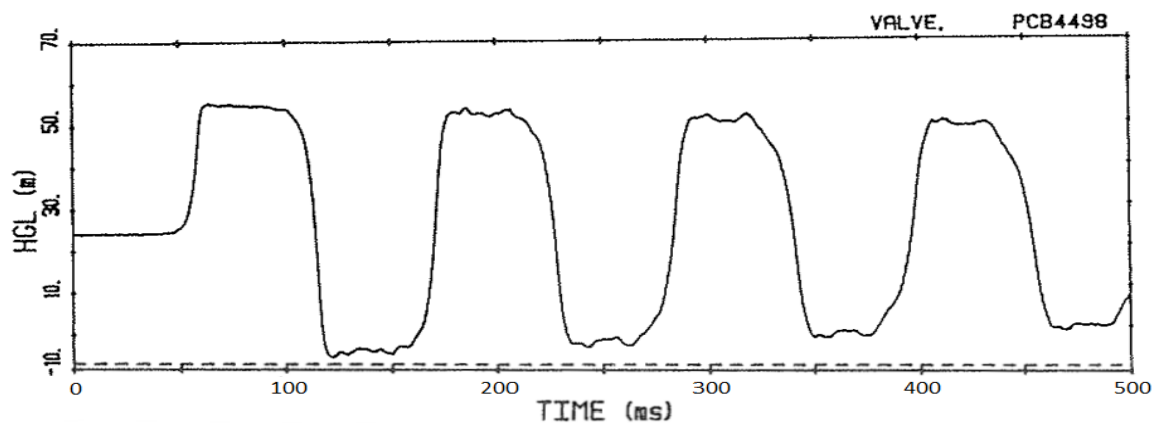
شکل ۵-۲ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=0.239$ m/s در مدل عددی



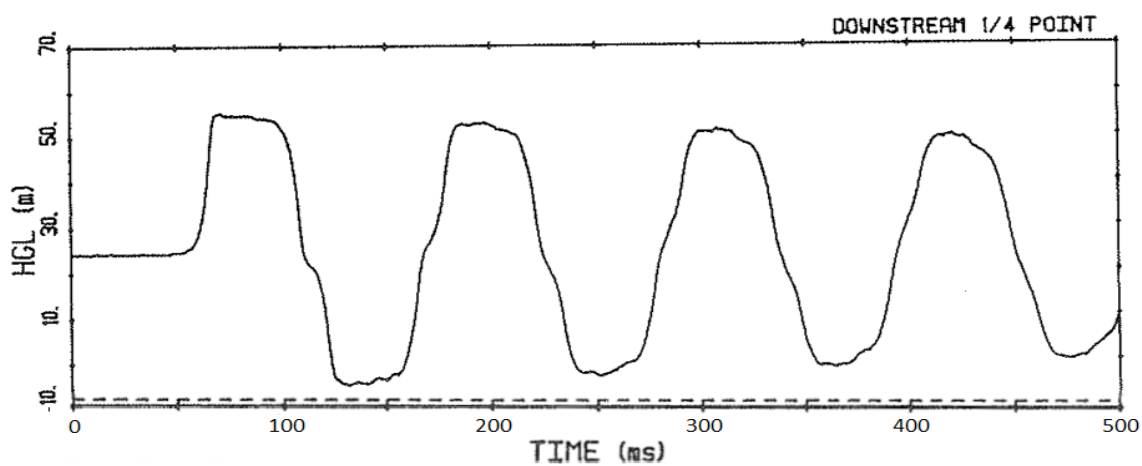
شکل ۵-۳ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=0.239$ m/s در مدل عددی



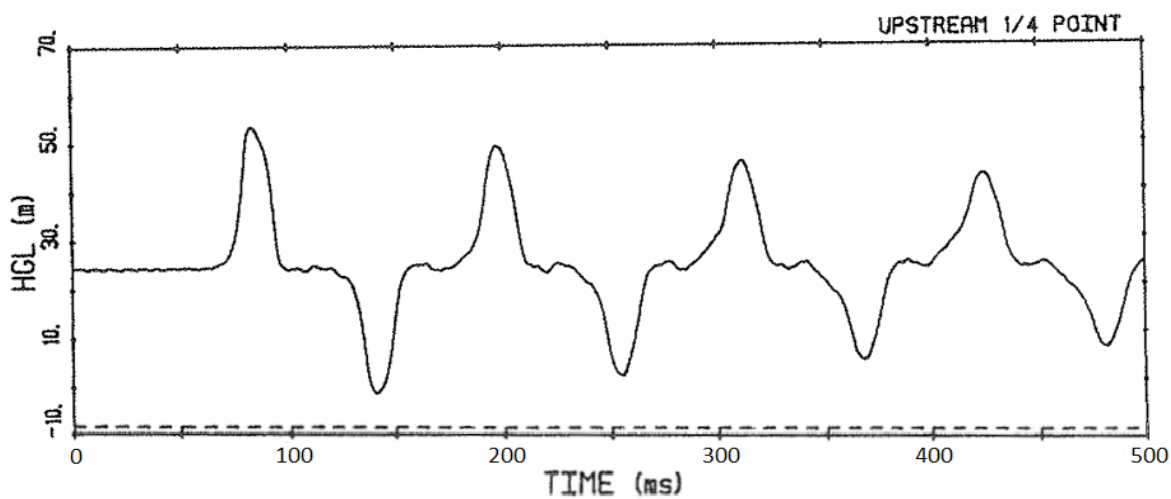
شکل ۵-۴ نمودار فشار در گره یک چهارم بالا دست به ازای $v_0=0.239$ m/s در مدل عددی



شکل ۵-۵ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=0.239$ m/s در مدل آزمایشگاهی



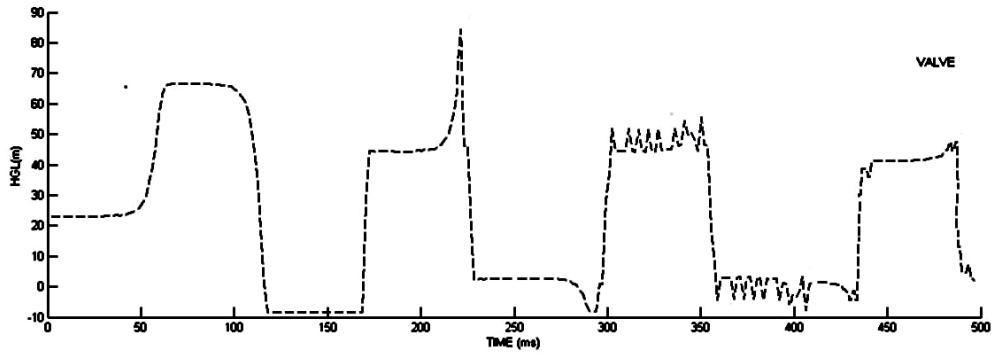
شکل ۵-۶ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=0.239$ m/s در مدل آزمایشگاهی



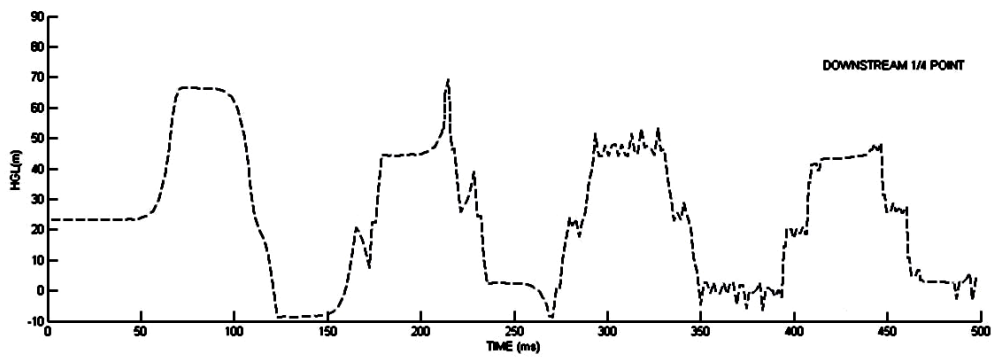
شکل ۵-۷ نمودار فشار در گره یک چهارم بالادست به ازای $v_0=0.239$ m/s در مدل آزمایشگاهی

سرعت اولیه ۰/۳۳۲ متر بر ثانیه

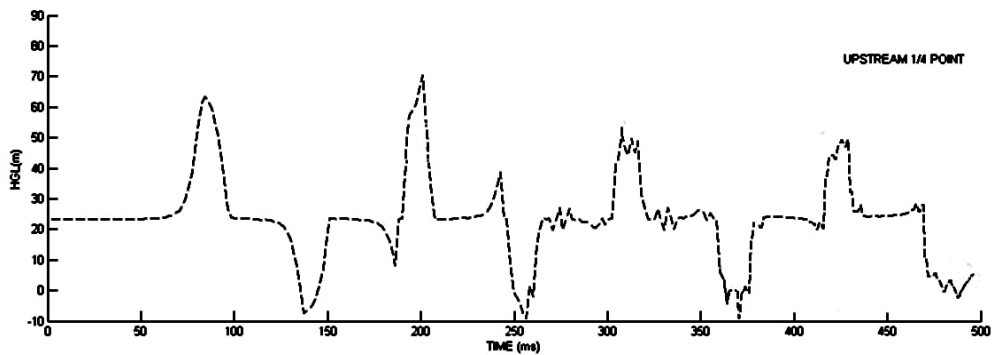
در این آزمایش شیر در لحظه ۴۳ میلی ثانیه شروع به بسته شدن می کند و در ۳۲ میلی ثانیه بعد به طور کامل بسته شده است. در این مثال همان طور که در نمودارها دیده می شود فشاری که در اولین موج ضربه قوچ ایجاد می شود برابر ۶۶/۷ متر می باشد و جدایی ستون در لحظه ۱۲۳ میلی ثانیه در محل شیر آغاز می شود و حفره محلی در مجاورت شیر تا زمان ۱۷۵ میلی ثانیه باقی می ماند. دیده می شود متلاشی شدن حفره باعث افزایش فشاری می شود که از افزایش فشار ناشی از بستن شیر کمتر است. با بازگشت موج مثبت ناشی از بستن شیر برای اولین بار پس از متلاشی شدن حفره افزایش فشار دیده می شود که این مقدار فشار بیشینه در نتایج آزمایشگاهی ۹۱ متر و در نتایج عددی ۸۵/۱ متر می باشد. با مشاهده نمودار گره یک چهارم پایین دست لوله مشاهده می شود که فشار سیال در این نقطه، در زمان وجود حفره در شیر، بسیار نزدیک به فشار بخار می باشد. در لحظه ۶۴ میلی ثانیه برای اولین بار فشار در گره ربع بالادست لوله به فشار بخار می رسد. دیده می شود ۱۴ میلی ثانیه بعد در ربع پایین دست لوله فشار به فشار بخار می رسد. فشارسنج های قرار گرفته در طول لوله شکل گیری یک حفره میانی بین مخزن و یک چهارم بالا دست لوله را نشان می دهند، که با انتشار موج کم فشار سبب تشکیل یک ناحیه کاویتاسیون بخاری گسترده می شود که به سمت شیر حرکت می کند.



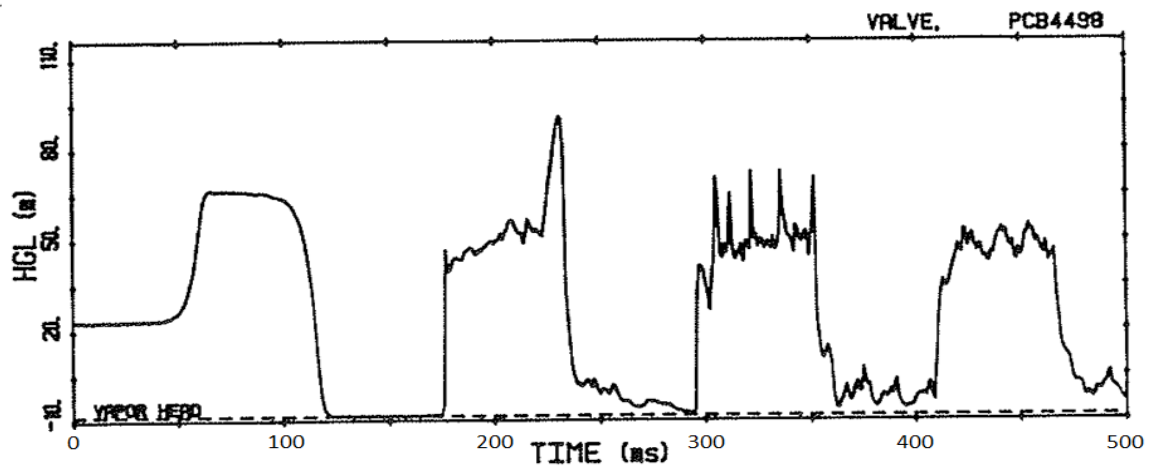
شکل ۵-۸ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=0.332$ m/s در مدل عددی



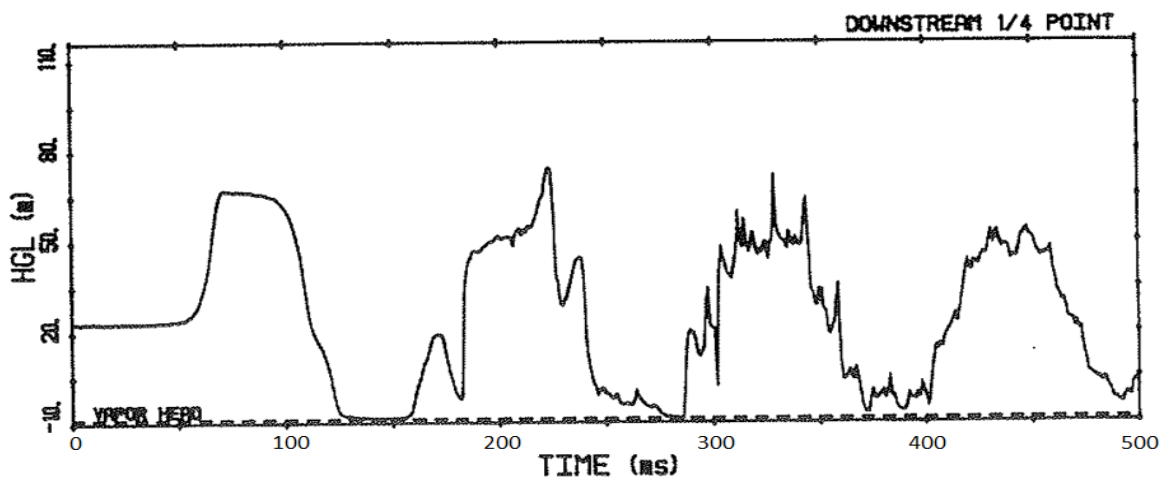
شکل ۵-۹ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=0.332$ m/s در مدل عددی



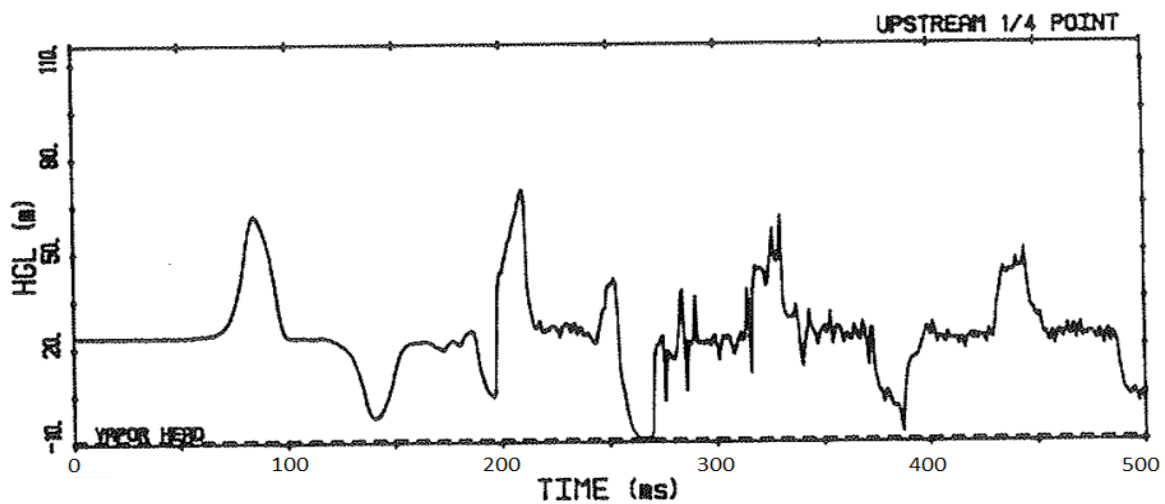
شکل ۵-۱۰ نمودار فشار در گره یک چهارم بالا دست به ازای $v_0=0.332$ m/s در مدل عددی



شکل ۵-۱۱ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=0.332$ m/s در مدل آزمایشگاهی



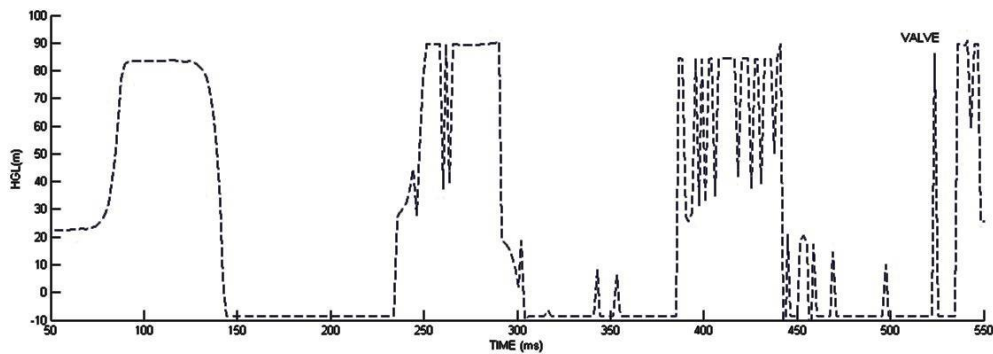
شکل ۵-۱۲ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=0.332$ m/s در مدل آزمایشگاهی



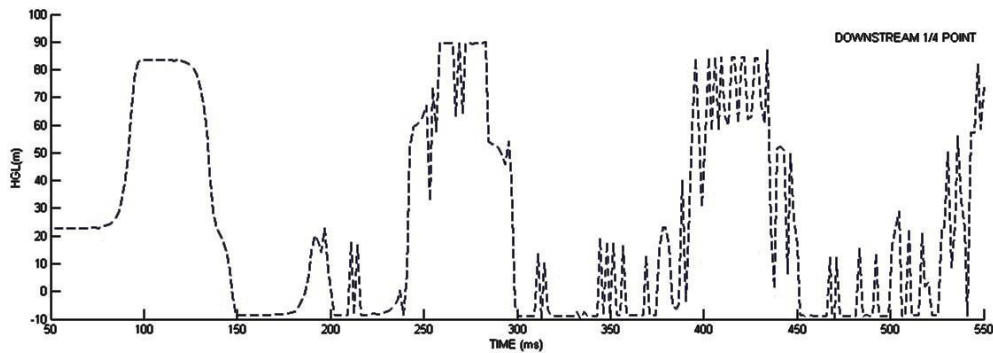
شکل ۵-۱۳ نمودار فشار در گره یک چهارم بالا دست به ازای $v_0=0.332$ m/s در مدل آزمایشگاهی

سرعت اولیه ۰/۴۶۶ متر بر ثانیه

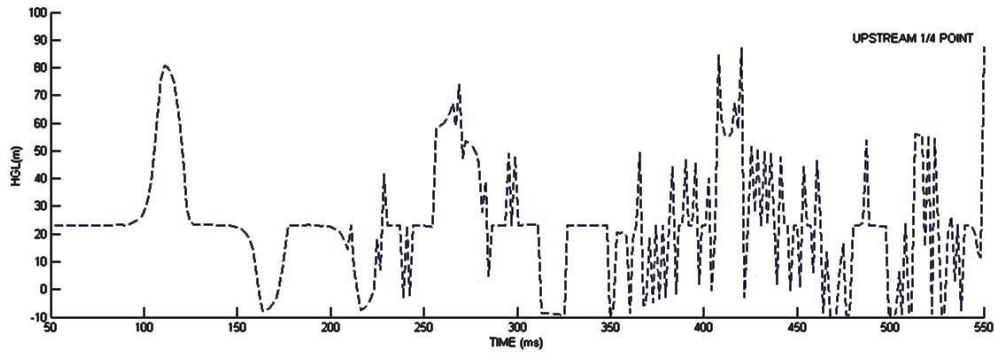
شیر در لحظه ۷۱ میلی ثانیه شروع به بسته شدن می‌کند و در لحظه ۹۵ میلی ثانیه به طور کامل بسته شده است. حفره شکل گرفته در گره شیر ۸۲ میلی ثانیه وجود دارد. هنگامی که موج فشار ناشی از متلاشی شدن حفره برای اولین بار به شیر می‌رسد حفره دوم شکل می‌گیرد. افزایش فشار ناشی از متلاشی شدن حفره گره شیر در مدل عددی بیشتر از افزایش فشار ناشی از بستن شیر شده است و برابر ۹۰/۳۸ متر است.



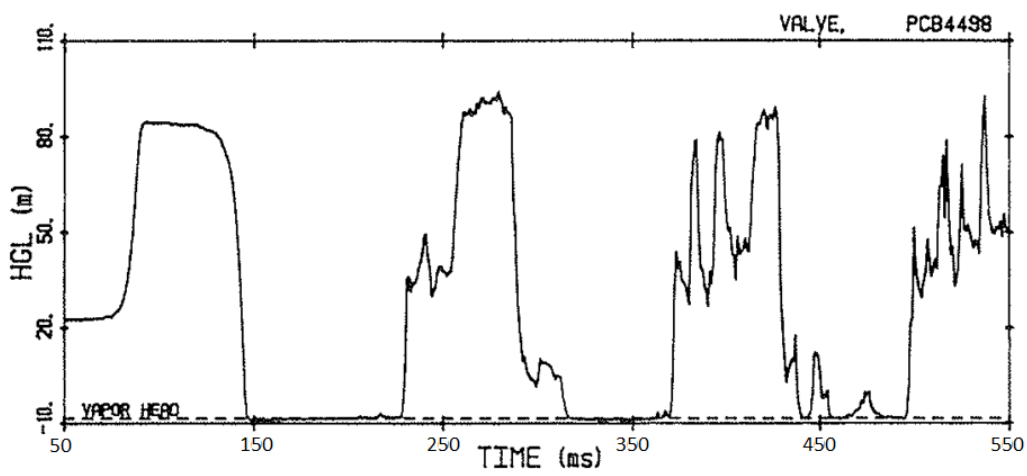
شکل ۵-۱۴ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=0.466$ m/s در مدل عددی



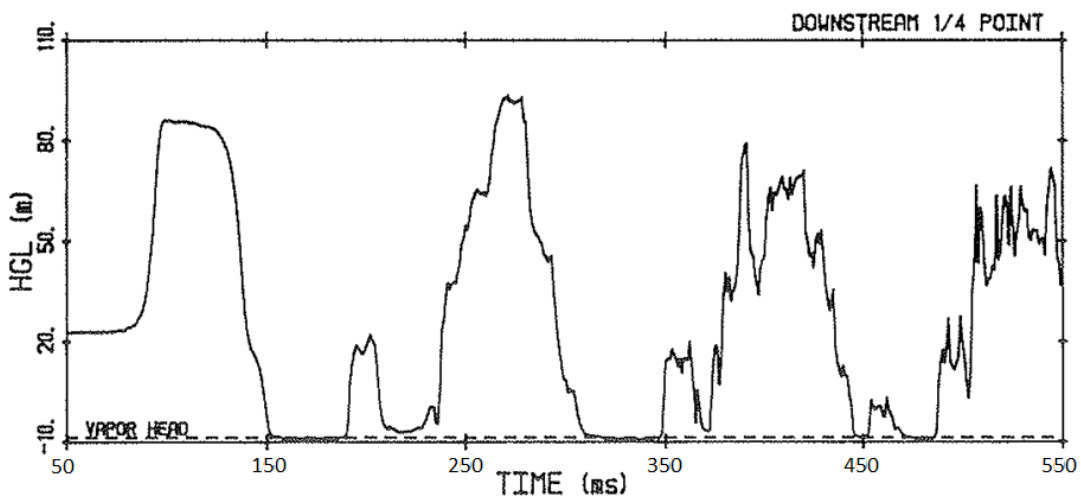
شکل ۵-۱۵ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=0.466$ m/s در مدل عددی



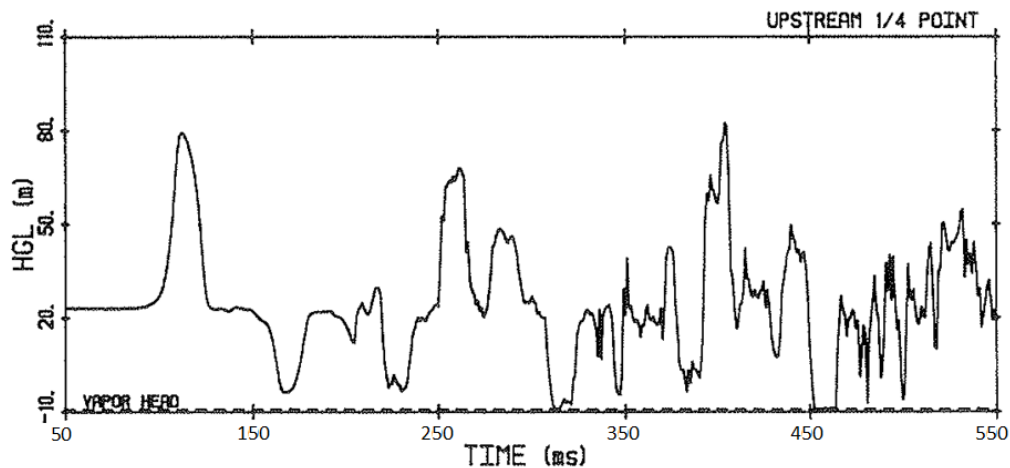
شکل ۵-۱۶ نمودار فشار در گره یک چهارم بالا دست به ازای $v_0=0.466$ m/s در مدل عددی



شکل ۵-۱۷ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=0.466$ m/s در مدل آزمایشگاهی



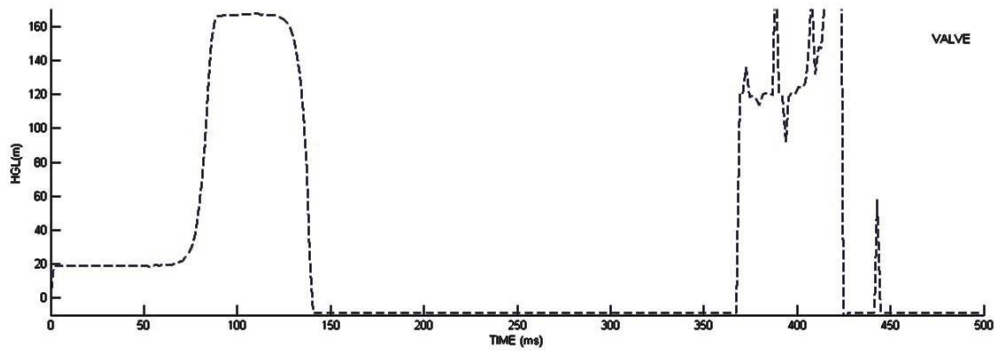
شکل ۵-۱۸ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=0.466$ m/s در مدل آزمایشگاهی



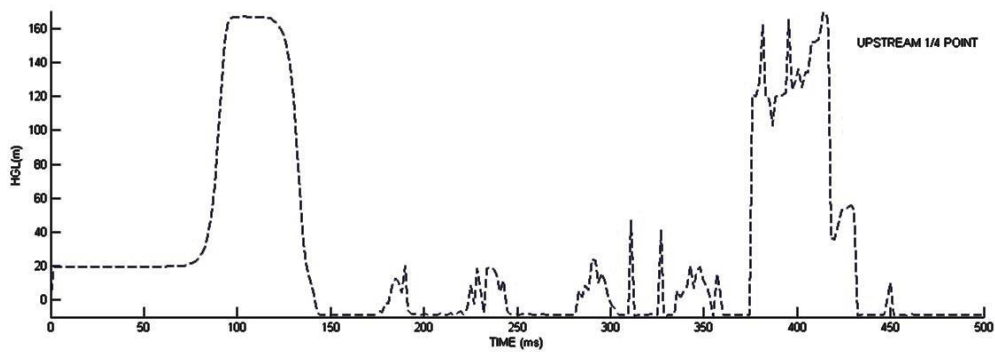
شکل ۵-۱۹ نمودار فشار در گره یک چهارم بالا دست به ازای $v_0=0.466$ m/s در مدل آزمایشگاهی

سرعت اولیه ۱/۱۲۵ متر بر ثانیه

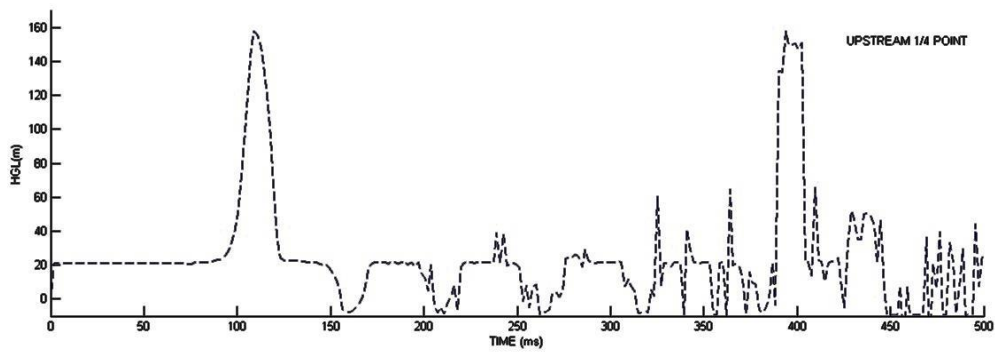
بسته شدن شیر در لحظه ۶۷ میلی ثانیه شروع می شود و ۲۴ میلی ثانیه بعد به طور کامل بسته شده است. همان طور که در این اشکال مشاهده می شود فشار ایجاد شده در اثر بسته شدن شیر حدود ۱۶۶/۴ متر می باشد بعد از تشکیل حفره در مجاورت شیر یک ناحیه کاویتاسیون بخاری در کنار حفره شکل می گیرد. زمان باقی ماندن حفره در اندازه گیری آزمایشگاهی برابر ۲۱۶ میلی ثانیه و در اندازه گیری عددی ۲۲۰ میلی ثانیه می باشد، که نسبت به مثال قبلی زمان بیشتری حضور دارد. مشاهده می شود در این سرعت افزایش فشار ناشی از متلاشی شدن حفره گره شیر در نتایج آزمایشگاهی کمتر از افزایش فشار ناشی از بسته شدن شیر می باشد و برابر ۱۶۰/۳ می باشد، در حالی که افزایش فشار ناشی از متلاشی شدن حفره گره شیر در مدل عددی بیشتر از افزایش فشار ناشی از بستن شیر شده است و برابر ۱۶۸/۳ متر است. در گره یک چهارم بالادست، فشار در لحظه ۲۱۰ میلی ثانیه به فشار بخار سیال می رسد و ۱۴ میلی ثانیه بعد کاهش فشار گره یک چهارم پایین دست مشاهده می شود. واضح است عبور موج کم فشار به سمت پایین دست باعث ایجاد ناحیه کاویتاسیون بخاری می شود.



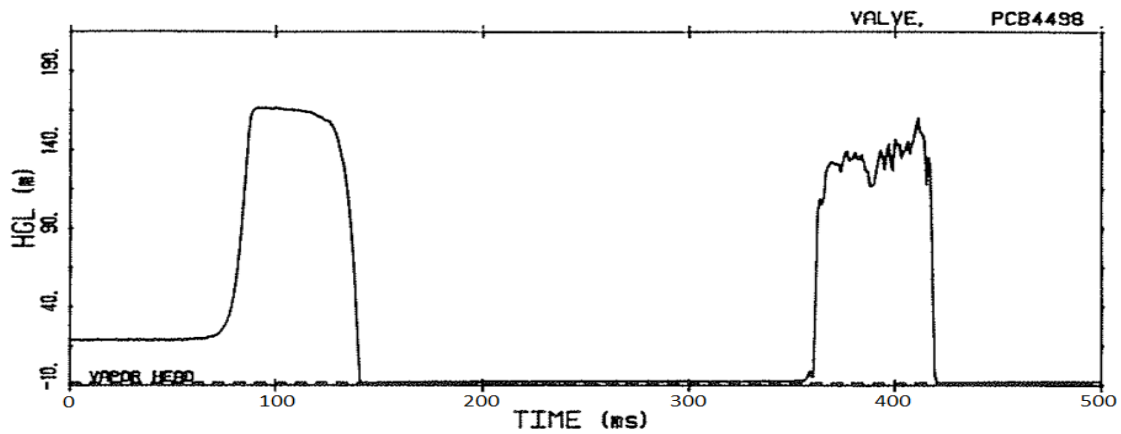
شکل ۵-۲۰ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=1.125$ m/s در مدل عددی



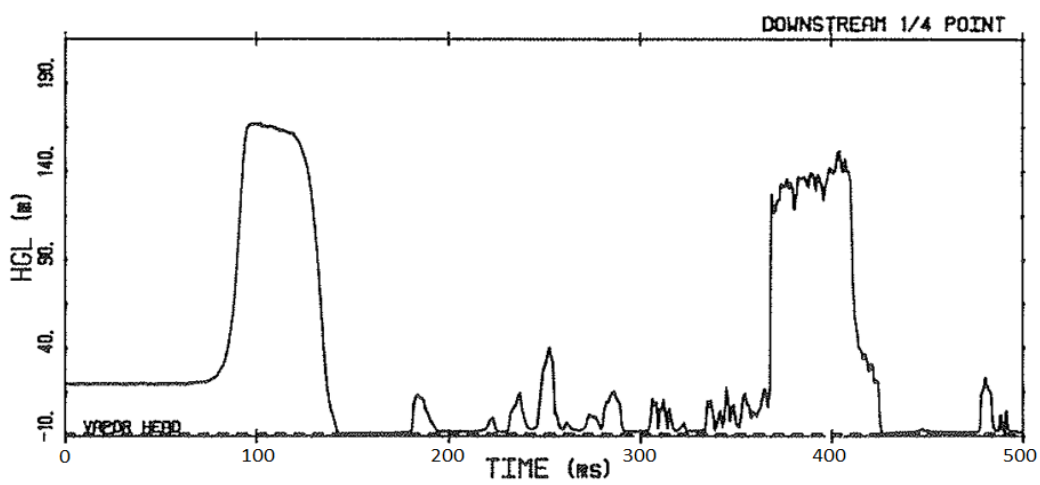
شکل ۵-۲۱ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=1.125$ m/s در مدل عددی



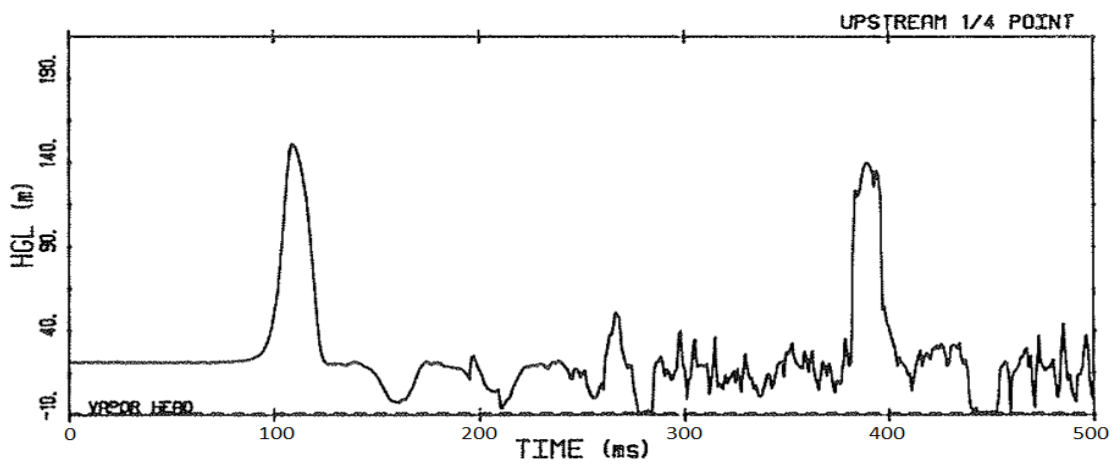
شکل ۵-۲۲ نمودار فشار در گره یک چهارم بالا دست به ازای $v_0=1.125$ m/s در مدل عددی



شکل ۵-۲۳ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=1.125$ m/s در مدل آزمایشگاهی

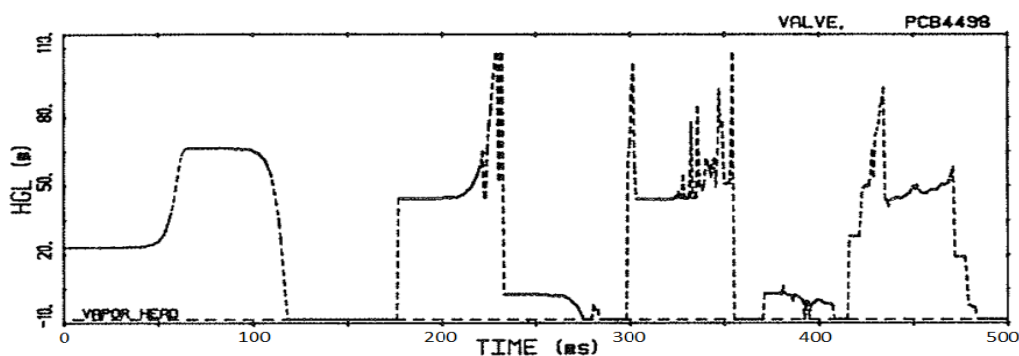


شکل ۵-۲۴ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=1.125$ m/s در مدل آزمایشگاهی

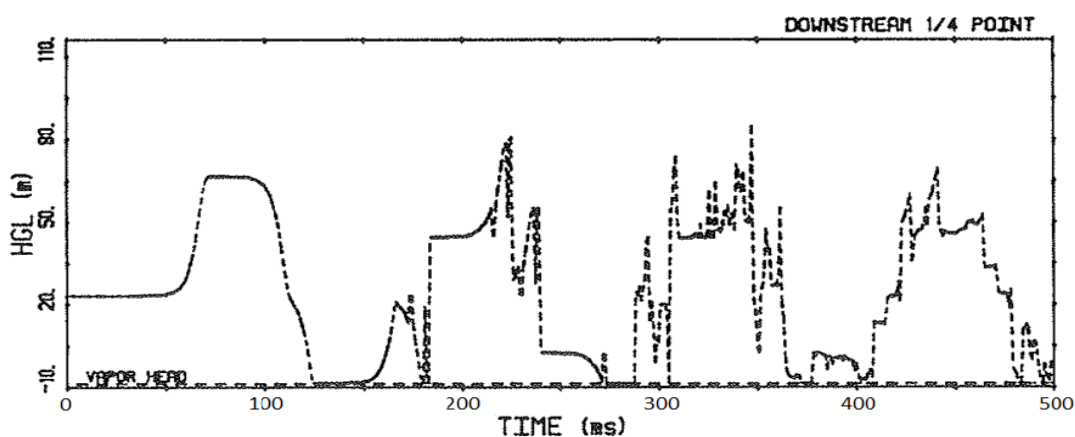


شکل ۵-۲۵ نمودار فشار در گره یک چهارم بالا دست به ازای $v_0=1.125$ m/s در مدل آزمایشگاهی

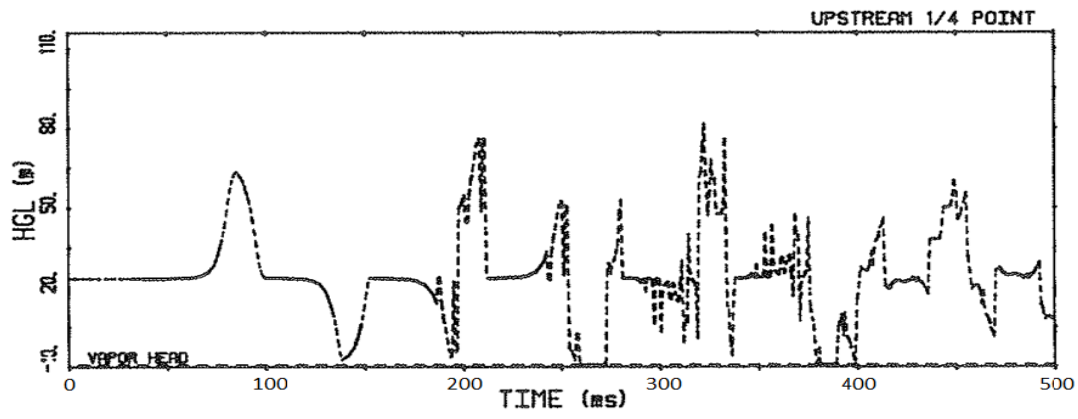
جهت مقایسه نتایج دو مدل عددی وجه مشترک کاویتاسیون بخاری گسترده و مدل حفره ای بخارگسسته، به طور نمونه برای سرعت 0.332 متر بر ثانیه نمودارهای فشار در سه گره مورد نظر با استفاده از روش حفره ای بخار گسسته (DVCM)، انجام شده توسط سیمسون آورده شده است [۴۹]. همانطور که مشاهده می‌شود بیشینه فشار ایجاد شده در محل شیر در این مدل تفاوت زیادی با نتایج آزمایشگاهی و مدل وجه مشترک دارد و برابر 106 متر می‌باشد، همچنین نوسانات غیرواقعی فشار در این مدل بیشتر مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۲۶ نمودار فشار در محل شیر به ازای $v_0=0.332$ m/s در مدل عددی DVCM



شکل ۵-۲۷ نمودار فشار در گره یک چهارم پایین دست به ازای $v_0=0.332$ m/s در مدل عددی DVCM



شکل ۵-۲۸ نمودار فشار در گره یک چهارم بالادست به ازای $v_0=0.332$ m/s در مدل عددی DVCM

در جدول زیر خلاصه نکات مهم نتایج عددی و آزمایشگاهی به صورت مختصر آورده شده است. مشاهده می شود بیشترین ناهمخوانی بین این نتایج مربوط به سرعت $1/125$ متر بر ثانیه می باشد.

جدول ۵-۵ خلاصه نکات مهم نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی

۱/۱۲۵	۰/۴۶۶	۰/۳۳۲	۰/۲۳۹	(۱)	سرعت اولیه m/s
۳/۸۴	۱/۴۶	۰/۹۲	-	نتایج آزمایشگاهی	(۲) مدت حضور حفره $t/(2L/a)$
۳/۹۱	۱/۶	۰/۸۳	-	نتایج عددی	
۲۱/۷۴	۲۳/۱۶	۲۳/۴۱	۲۴/۳	(۳)	فشار مخزن m
۱۶۶/۴	۸۴/۶	۶۶/۷	۵۵/۳	نتایج آزمایشگاهی	(۴) فشارناشی از بستن شیر m
۱۶۶/۴	۸۴/۶	۶۶/۷	۵۵/۳	نتایج عددی	
۱۶۰/۳	۹۴/۱	۹۱	۵۳/۸	نتایج آزمایشگاهی	(۵) بیشینه پالس مثبت فشار
۱۶۸/۳	۹۰/۳۸	۸۵/۱	۵۵/۳	نتایج عددی	
-۶/۱	۹/۵	۲۴/۳	-۱/۵	نتایج آزمایشگاهی	(۶) (۵)-(۴)
۱/۹	۵/۷۸	۱۸/۴	۰	نتایج عددی	
۱۴۴/۶۶	۶۱/۴۴	۴۳/۲۹	۳۱	نتایج آزمایشگاهی	(۷) افزایش فشار ژاکوفسکی (۴)-(۳)
۱۴۴/۶۶	۶۱/۴۴	۴۳/۲۹	۳۱	نتایج عددی	
-۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۵۶	۰/۰۵	نتایج آزمایشگاهی	(۸) (۶)/(۷)
۰/۰۱۳	۰/۰۹۴	۰/۴۷	۰	نتایج عددی	

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۶ مقدمه

در این پژوهش همان گونه که آورده شد ، ابتدا به تشریح پدیده جدایی ستون مایع و حالت های مختلف آن پرداخته شد، سپس معادلات حاکم بر این پدیده که شامل روابط ضربه قوچ، معادلات جریان دو فازی و معادلات موج ضربه و رابطه پیوستگی برای یک حفره گسسته بود، شرح داده شد. در ادامه روش عددی وجه مشترک و الگوریتم آن برای تحلیل جدایی ستون به تفصیل بسط داده شد. در نهایت مروری مختصر بر آزمایشات انجام شده، صورت گرفت و بعد از بیان جزییات یک مدل آزمایشگاهی، نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد.

۶-۲ نتیجه گیری

- مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل عددی وجه مشترک به خوبی می‌تواند پدیده جدایی ستون را خصوصا در دو پیک ابتدایی پیش بینی کنند. اما با گذشت زمان در زمان بندی مقادیر فشار اختلاف ایجاد می‌شود. که یکی از عوامل مهم و تاثیر گذار فرض اصطکاک ماندگار در مدل‌های اولیه می‌باشد.
- مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت تفاوت نتایج آزمایشگاهی و عددی بیشتر می‌شود.
- در سه سرعت اولیه بررسی شده در مدل عددی، افزایش فشار بعد از متلاشی شدن حفره در گره شیر بیشتر از افزایش فشار ضربه قوچ است.
- افزایش فشار بعد از متلاشی شدن حفره در مدل عددی در بیشترین سرعت اولیه بررسی شده، نسبت به سایر سرعت ها تفاوت بیشتری با نتایج آزمایشگاهی داشت و با وقوع جریان غیرماندگار، گره شیر اولین گره‌ی است که در آن کاویتاسیون رخ می‌دهد.
- در مدل استفاده شده در این پژوهش به علت اثرپذیری وضعیت گره‌ها و دامنه‌های مجاور از یکدیگر، در اعمال حالات مختلف محتمل برای نواحی و گره‌های محاسباتی و خصوصا شرایط مرزی مختلف می‌بایست دقت و توجه فراوانی نمود.
- در مدل کاویتاسیون وجه مشترک تعمیم یافته با توجه به این که مدل ریاضی آن به فیزیک مسئله نزدیک‌تر می‌باشد نسبت به مدل‌های قبلی قابل اعتمادتر است. لیکن به دلیل پیچیده بودن الگوریتم و زمانبر بودن محاسبات آن در کاربردهای عملی به سختی می‌توان از آن بهره جست.
- با توجه به نتایج مدل عددی شاید بتوان در موارد کاربردی بازه زمانی بسته شدن شیر را به گونه‌ای تنظیم کرد که از ایجاد کاویتاسیون در گره شیر جلوگیری شود، که این موضوع نیاز به بررسی‌های آزمایشگاهی دقیقی دارد.

۳-۶ پیشنهادات

- اعمال اثرات مدل‌های مختلف اصطکاک غیرماندگار و بررسی آن‌ها و تشخیص مدل مناسب جهت استفاده در مدل‌های جدایی ستون
- اعمال شرط برای شروع حرکت موج ضربه در مدل وجه مشترک
- اعمال اثرات عکس‌العمل سازه در مدل‌های جدایی ستون مایع
- افزودن شرایط مرزی مختلف مانند پمپ، سرچ تانک، تقاطع در مدل وجه مشترک
- بررسی و مدلسازی روش‌های کاربردی کاهش‌دهنده خسارات پدیده جدایی ستون

1. [Http://en.wikipedia.org/wiki/SayanoShushenskaya_Dam](http://en.wikipedia.org/wiki/SayanoShushenskaya_Dam)
2. Bonin, C.C., 1960. Water-hammer damage to Oigawa Power Station. ASME Journal of Engineering for Power 82, 111-119.
3. Kottmann, A., 1989. Vorgänge beim Abreißen einer Wassersäule. (Phenomena during breakaway of a water column.) 3R international 28, 106-110 (in German).
4. List, E.J., Burnam, J., Solbrig, R., Hogatt, J., 1999. Vapor cavity formation and collapse: field evidence for major pipeline damage. In: Proceedings of the 3rd ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference, Symposium S-290 Water Hammer, San Francisco, USA, July 1999, ASME-FED 248, Paper FEDSM99-6886, 7 pp.
5. Rouse, H., Ince, S., 1957. History of Hydraulics. Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, Ames, Iowa, USA. (Reprint in 1963, New York: Dover Publications.)
6. Martin, C.S., 1973. Status of fluid transients in Western Europe and the United Kingdom. Report on laboratory visits by Freeman scholar. ASME Journal of Fluids Engineering 95, 301-318.
7. Whitehurst, John (1775) "Account of a machine for raising water, executed at Oulton, in Cheshire, in 1772," Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 65 : 277-279. (See also plate preceeding page 277.)
8. Montgolfier, J.M. de (1803). "Note sur le béliér hydraulique, et sur la manière d'en calculer les effets" (Note on the hydraulic ram, and on the method of calculating its effects), Journal des Mines, 13 (73) : 42-51. Available on-line at: Journal des Mines.
9. Tijsseling, A.S., Anderson, A. (2008). "Thomas Young's research on fluid transients: 200 years on," Proceedings of the 10th International Conference on Pressure Surges, Edinburgh, U. K., pages 21-33; see page 22. Available on-line at: Technical University of Eindhoven.
10. Ménabréa, L.-F., 1858. Note sur les effets du choc de l'eau dans les conduites. (Note on the effects of water shock in conduits.) Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, Paris, 47, 221-224 (in French). (English translation by A. Anderson (1976).)
11. Michaud, J. (1878) "Coups de béliér dans les conduites. Étude des moyens employés pour en atténuer les effects" (Water hammer in pipes. Study of means used to mitigate its effects), Bulletin de la Société Vaudoise des Ingénieurs et des Architectes
12. J. von Kries (1883) "Ueber die Beziehungen zwischen Druck und Geschwindigkeit, welche bei der Wellenbewegung in elastischen Schläuchen bestehen" (On the relationship between pressure and velocity, which exist in connection with wave motion in elastic tubing), Festschrift der 56. Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte (Festschrift of the 56th Convention of German Scientists and Physicians), (Tübingen, Germany: Akademische Verlagsbuchhandlung, 1883), pages 67-88.
13. Frizzell, J.P. (1898) "Pressures resulting from changes of velocity of water in pipes," Transactions of the American Society of Civil Engineers.

14. Joukowsky, N., 1900. Über den hydraulischen Stoss in Wasserleitungsröhren. (On the hydraulic hammer in water supply pipes.) Mémoires de l'Académie Impériale des Sciences de St.-Pétersbourg, 1900, Series 8, Vol. 9, No. 5 (in German). (English translation, partly, by Simin, O., 1904.)
15. Allievi, L. (1902) "Teoria generale del moto perturbato dell'acqua nei tubi in pressione (colpo d'ariete)" (General theory of the perturbed motion of water in pipes under pressure (water hammer)), Annali della Società degli Ingegneri ed Architetti Italiani (Annals of the Society of Italian Engineers and Architects).
16. Kranenburg, C., 1974a. Transient cavitation in pipelines. PhD Thesis, Delft University of Technology, Dept. of Civil Engineering, Laboratory of Fluid Mechanics, Delft, The Netherlands. Also: Communications on Hydraulics, Delft University of Technology, Dept. of Civil Engineering, Report No. 73-2, 1973.
17. Lee, I.Y., Kitagawa, A., Takenaka, T., 1985. On the transient behaviour of oil flow under negative pressure. Bulletin of JSME 28(240), 1097-1104.
18. Trevena, D.H., 1984. Cavitation and the generation of tension in liquids. Journal of Physics, D: Applied Physics 17(11), 2139-2164.
19. Williams, P.R., Williams, P.M., Brown, S.W.J., Temperley, H.N.V., 1999. On the tensile strength of water under pulsed dynamic stressing. Proceedings of the Royal Society: Mathematical, Physical and Engineering Sciences A, 455, 3311-3323.
20. Williams, P.R., Williams, R.L., 2000. On anomalously low values of the tensile strength of water. Proceedings of the Royal Society (London) A: Mathematical and Physical Sciences, 456, 1321-1332.
21. Brown, S.W.J., Williams, P.R., 2000. The tensile behaviour of elastic liquids under dynamic stressing. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 90, 1-11.
22. LeConte, J.N., 1937. Experiments and calculations on the resurge phase of water hammer. Transactions of the ASME 59, Paper HYD-59-12, 691-694.
23. Lupton, H.R., 1953. Graphical analysis of pressure surges in pumping systems. Journal of the Institution of Water Engineers 7, 87-125.
24. O'Neill, I.C., 1959. Water-hammer in simple pipe systems. MSc Thesis, University of Melbourne, Melbourne, Australia.
25. Sharp, B.B., 1960. Cavity formation in simple pipes due to rupture of the water column. Nature 185(4709), 302-303.
26. Jordan, V., 1961. Vpliv povratne lopute na hidravlicni udar pri izklopu crpalke. (The influence of check valves on water hammer at pump failure.) Strojnicki Vestnik 7(4, 5), 19-21 (in Slovene).
27. Bergant, A., Simpson, A.R., 1999a. Pipeline column separation flow regimes. ASCE Journal of Hydraulic Engineering 125, 835 - 848.
28. De Haller, P., Bédoué, A., 1951. The break-away of water columns as a result of negative pressure shocks. Sulzer Technical Review 43(4), 18-25.
29. Jordan, V., 1975. Neue Ermittlungen über den Druckstoß in Pumpenleitungen ohne Druckstoßdämpfung. (New investigations on waterhammer in pump pipelines without waterhammer-damping.) GWF - Wasser/Abwasser, 116(12), 540-548 (in German).

30. Simpson, A.R., 1986. Large water hammer pressures due to column separation in sloping pipes. PhD Thesis, The University of Michigan, Dept. of Civil Engineering, Ann Arbor, USA.
31. Bergant, A., 1992. Kavitacijski tok med prehodnimi režimi v cevni sistemih. (Transient cavitating flow in pipelines.) PhD Thesis, University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia, (in Slovene).
32. Angus, R.W., 1935. Simple graphical solution for pressure rise in pipes and discharge lines. *Journal of the Engineering Institute of Canada* 18(2), 72-81, 264-273.
33. Heath, W.E., 1962. Vapor-cavity formation in a pipe after valve closure. MSc Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.
34. Moshnin, L.F., Timofeeva, E.T., 1965. Повышение давления при гидравлических ударах, сопровождающихся разрывами сплошности потока. (Pressure-rise in water-hammer accompanied with column-separation.) *Водоснабжение и Санитарная Техника (Water Supply and Sanitary Technology)* 7, 3-5 (in Russian).
35. Simpson, A.R., Wylie, E.B., 1985. Problems encountered in modeling vapor column separation. In: *Proceedings of Symposium on Fluid Transients in Fluid-Structure Interaction, ASME Winter Annual Meeting, Miami Beach, Florida, USA, 103-107.*
36. Li, W.H., Walsh, J.P., 1964. Pressure generated by cavitation in a pipe. *ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division* 90(6), 113 - 133.
37. Yamaguchi, K., Ichikawa, T., Suzuki, S., 1977. Transient characteristics of oil pipelines with column separation. *Bulletin of the JSME* 20(143), 630-637.
38. Gottlieb, L., Larnæs, G., Vasehus, J., 1981. Transient cavitation in pipelines - laboratory tests and numerical calculations. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Water Column Separation, IAHR, Obernach, Germany, 487-508.*
39. Martin, C.S., 1981. Gas release in transient pipe flow. In: *Proceedings of the 5th International Round Table on Hydraulic Transients with Water Column Separation, IAHR, Obernach, Germany.*
40. Graze, H.R., Horlacher, H.B., 1983. Pressure transients following the collapse of vapor cavities. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Hydraulic Transients in Power Stations, IAHR, Gloucester, UK.*
41. De Almeida, A.B., 1983. Cavitation and water-column separation by the method of characteristics. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Water Column Separation, IAHR, Gloucester, UK.*
42. Kojima, E., Shinada, M., Shindo, K., 1984. Fluid transient phenomena accompanied with column separation in fluid power pipeline. *Bulletin of JSME* 27(233), 2421- 2429.
43. Fox, J.A., 1989. *Transient Flow in Pipes, Open Channels and Sewers.* Chichester: Ellis Horwood.
44. Fanelli, M., 2000. *Hydraulic Transients with Water Column Separation, IAHR Working Group 1971-1991 Synthesis Report, Delft: IAHR and Milan: ENEL-CRIS.*
45. Wylie, E.B., Streeter, V.L., 1993. *Fluid Transients in Systems.* Englewood Cliffs: Prentice Hall.
46. Bergant, A., Simpson, A. R., 1992. Interface model for transient cavitating flow in pipelines. In: *Unsteady Flow and Fluid Transients (Eds. Bettess, R., Watts, J.), 333 - 342, Rotterdam: A.A. Balkema.*
47. Streeter, V.L., 1983. Transient cavitating pipe flow. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*

109(HY11), 1408-1423

48. Bergant, A., Simpson, A.R., 1997. Development of a generalised set of pipeline water hammer and column separation equations. Report No. R149, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Adelaide, Adelaide, Australia.

49. Simpson, A.R., 1986. Large water hammer pressures due to column separation in sloping pipes. PhD thesis. Department of Civil engineering, University of Michigan, USA.

۵۰. مجد، علی. ۱۳۸۸. بررسی پدیده جدایی ستون مایع در جریان های غیر ماندگار. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸ صفحه.

Abstract:

Pipe installation is of vital importance in water networks, irrigating networks, water power plants, nuclear power plants and industrial facilities. But rapid valve closure, sudden pump and turbin failure will cause massive changes in pressure of liquid inside pipes. If a pipe network faces an unsteady flow, flow characteristics such as velocity and pressure will change rapidly which will cause considerable pressure changes at some points. If these changes lead to pressure decline under the vapor pressure, the liquid inside the pipe will evaporate and cause the column separation phenomenon. In this condition, standard water hammer equations wouldn't be applicable. The purpose of current study was to investigate the liquid column separation phenomenon and describe different possible aspects for computational nodes. To achieve this goal, the definitions of water hammer and liquid column separation were discussed, and then the basic ruling equations of this phenomenon were expressed in different scenarios. After that, introducing method of characteristics and numerical integration of the basic equations, numerical GIVCM was provided. This method use analytical and numerical methods simultaneously for solving integral equations of the liquid column separation and is applicable for certain types of pipes and also considers various reactions between water hammer areas, extended cavitation areas, intermediate cavities and marginal cavities. The flowchart of the computer program in MATLAB has been drawn which displays different possible scenarios in computational sections simply. The pressure diagrams of software in three computational nodes for different initial velocities presented and compared with experimental results. GIVCM is a combinatorial model and because the assumed physical model is closer to real physics of the phenomenon, the results are more realistic and reliable. The results showed that this model can predict liquid column separation phenomenon very well, especially in two first peaks. With time, the timing of pressure calculations differs and cause errors in program. One of most important and affecting factors, is the assumption of steady friction in primary models. So it is suggested that the influences of nonsteady friction will be considered in future models.

Key Words: Liquid column separation, Water hammer, Unsteady flow, method of characteristics.