

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی

بررسی اندرکنش سیال - سازه به روش بدون شبکه بندی در لوله های الاستیک

نگارنده

نوید عین افشار

استاد راهنما:

احمد احمدی

علیرضا کرامت

بهمن ۱۳۹۵

تقدیم نامہ

این مجموعه را به مادر عزیزم تقدیم می کنم.

سپاسگزاری

نخستین سپاس و ستایش از آن خداوندی است که بنده کوچکش را در دریای بیکران اندیشه، قطره‌ای ساخت تا وسعت آن را از دریچه اندیشه‌های ناب آموزگارانی بزرگ به تماشا نشیند. لذا اکنون که در سایه‌سار بنده‌نوازی‌هایش پایان‌نامه حاضر به انجام رسیده است، بر خود لازم می‌دانم تا مراتب سپاس را از بزرگوارانی به جا آورم که اگر دست یاریگرشان نبود، هرگز این پایان‌نامه به انجام نمی‌رسید.

بسی شایسته است از اساتید فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر احمد احمدی و دکتر علیرضا کرامت که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند تقدیر و تشکر نمایم.

با تقدیر و درود فراوان از اساتید بزرگوار دکتر امیر عباس عابدینی و دکتر مهدی عجمی که زحمت داوری این پایان‌نامه را متقبل شدند.

در انتها از تمامی کسانی که مرا در انجام این پایان‌نامه یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

وقتی که یک سیال درون یک مسیر بسته در حال جریان باشد و کند شدن یا تسریع سرعت جریان به وجود آید پدیده ضربه قوچ مشاهده خواهد شد. چنانچه نیروهای ناشی از ضربه قوچ به سازه، باعث حرکت و تغییر شکل لوله شوند پدیده‌ای به نام تداخل سیال-سازه (FSI) روی می‌دهد. روش‌های عددی متنوعی نظیر روش‌های تفاضل محدود، حجم محدود، المان محدود و یا ترکیبی از این روش‌ها برای حل معادلات FSI به کار گرفته شده است. از جمله روش‌های موفق در این حوزه روش‌های خطوط مشخصه و گودونو است. در روش خطوط مشخصه گام‌های زمانی و مکانی باید نسبت به هم تناسب داشته باشند. به همین علت بازه‌های زمانی باید وابسته به ابعاد مسئله انتخاب شوند و نیاز به درونیابی دارد. در روش گودونو نیز مدت زمان حل مسایل به دلیل استفاده از مسئله ریمان طولانی است. در این پایان نامه روش بدون شبکه‌بندی که به عنوان روشی موثر در حل معادلات محسوب می‌شود به کار گرفته شده است و نمودارهای مربوط به توزیع فشار، توزیع سرعت، سرعت انتشار موج در دیواره لوله و همچنین تنش ایجاد شده در دیواره لوله در ابتدا و انتهای یک سیستم متشکل از مخزن، لوله و شیر مورد بررسی قرار گرفته شده است. در ادامه به بررسی مسئله و صحت سنجی نتایج آن با روش مشخصه (MOC) پرداخته شد. بر

اساس نتایج بدست آمده نتایج حاصل از این روش با نتایج روش خطوط مشخصه (MOC) تطابق مناسبی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: ضربه قوچ، تداخل سیال_سازه، روش بدون شبکه‌بندی

فهرست مطالب

فصل ۱	مقدمه	۱
۱-۱	مقدمه	۲
۲-۱	بیان مسئله	۴
۳-۱	ضرورت انجام پژوهش	۵
۴-۱	اهداف	۶
۵-۱	ساختار پایان نامه	۶
فصل ۲	بررسی پیشینه پژوهش	۹
۱-۲	خلاصه مطالعات پیش از سال ۱۹۹۰	۱۰
۲-۲	مطالعات پیشین پس از سال ۱۹۹۰	۱۱
فصل ۳	روش و مدل ریاضی	۲۵
۱-۳	مقدمه	۲۶
۲-۳	روش و معادلات	۲۷
۳-۳	روش بدون شبکه بندی در مدل دو معادله ای	۲۹
۱-۳-۳	معادلات هایپربولیک کلی	۳۰
۲-۳-۳	روش مشخصه (MOC)	۳۰
۳-۳-۳	شرایط مرزی	۳۳
۴-۳-۳	شرایط اولیه	۳۴
۵-۳-۳	مدل دو معادله ای چکش آبی	۳۵
۴-۳	روش بدون شبکه بندی در مدل ۴ معادله ای	۳۶

۳۷	۳-۴-۱ معادلات هایپربولیک کلی
۳۷	۳-۴-۲ روش مشخصه‌ها
۴۰	۳-۴-۳ شرایط مرزی
۴۱	۳-۴-۴ شرایط اولیه
۴۲	۳-۵ روش ۴ معادله ای FSI
۴۵	۳-۶ الگوریتم
۴۶	۳-۶-۱ ورودی
۴۷	۳-۶-۲ خروجی
۴۹	فصل ۴ نتایج و بحث
۵۰	۴-۱ مقدمه
۵۱	۴-۲ انواع مکانیزم‌های اثرات کوپله بر روی پدیده FSI
۵۳	۴-۲-۱ اعمال اثر تداخلی پواسن
۵۴	۴-۳ مساله حل شده
۵۵	۴-۴ نتایج مربوط به ضربه قوچ (مدل دو معادله ای)
۵۸	۴-۵ نتایج مربوط به حالت FSI (مدل ۴ معادله ای)
۶۳	۴-۶ صحت سنجی نتایج
۶۶	۴-۷ نتایج مربوط به سرعت سیال، سرعت محوری و تنش در لوله
۶۹	فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۷۰	۵-۱ مقدمه
۷۰	۵-۲ نتایج بدست آمده از مدل سازی در برنامه
۷۲	۵-۳ پیشنهادات جهت ادامه کار

مراجع ۷۴

پیوست شماره ۱ ۷۷

فهرست اشکال

- شکل ۱-۳: عوامل پدید آورنده پدیده اندرکنش سیال و سازه (Wiggert, 1986)..... ۲۶
- شکل ۲-۳: سیستم تک لوله ۲۸
- شکل ۳-۳: نقطه داخلی P و حرکت تدریجی بر روی خطوط مشخصه در صفحه زمان-مکان ۳۳
- شکل ۴-۳: نقطه مرزی P و حرکت تدریجی بر روی خطوط مشخصه در صفحه زمان-مکان ۳۴
- شکل ۵-۳: نقطه داخلی P و حرکت تدریجی بر روی خطوط مشخصه در صفحه مکان-زمان ۴۰
- شکل ۶-۳: نقطه مرزی P و حرکت تدریجی بر روی خطوط مشخصه در صفحه مکان-زمان ۴۱
- شکل ۱-۴: سیستم تک لوله‌ای ۵۵
- شکل ۲-۴: توزیع فشار در $z=11/15m$ و $Tc=0s$ ۵۷
- شکل ۳-۴: توزیع فشار در طول لوله در حالت بسته شدن ناگهانی شیر $Tc=0s$ ۵۷
- شکل ۴-۴: توزیع فشار در محل شیر در $t=0/2s$ ۵۸
- شکل ۵-۴: نتایج مربوط به توزیع فشار در محل شیر با در نظر گرفتن اثر تداخلی پواسون. (خطوط خط چین مربوط به نتایج ضربه قوچ و خطوط ممتد مربوط به نتایج FSI می‌باشند) ۶۱
- شکل ۶-۴: نتایج مربوط به توزیع فشار در محل $z=11/15$ با در نظر گرفتن اثر تداخلی پواسون (خطوط خط چین مربوط به نتایج ضربه قوچ و خطوط ممتد مربوط به نتایج FSI می‌باشند) ۶۲
- شکل ۷-۴: نتایج مربوط به توزیع فشار در محل شیر با در نظر گرفتن اثر تداخلی پواسون در بازه زمانی $0/185=0/195$ ثانیه. (خطوط خط چین مربوط به نتایج روش FSI کلاسیک و خطوط ممتد مربوط به نتایج روش بدون شبکه‌بندی می‌باشند) ۶۲

- شکل ۸-۴: نتایج مربوط به توزیع فشار در محل $z=11/15$ با در نظر گرفتن اثر تداخلی پواسون در بازه زمانی $0/195=0/185$ ثانیه. (خطوط خط چین مربوط به نتایج روش FSI کلاسیک و خطوط ممتد مربوط به نتایج روش مشلس می باشند) ۶۳
- شکل ۹-۴: نتایج هد در حالت اثر تداخلی پواسون در محل $z=11/15$ (نمودارهای خط چین مربوط به نتایج بدون در نظر گرفتن اثر تداخلی پواسون می باشند. شکل (الف) نتایج تحقیق حاضر و شکل (ب) نتایج برداشت شده از مرجع (Tisseling, Tisselin et al, 2003 ; 2007) است) ۶۴
- شکل ۱۰-۴: نتایج هد در حالت اثر تداخلی پواسون در محل شیر (نمودارهای خط چین مربوط به نتایج بدون در نظر گرفتن اثر تداخلی پواسون می باشند. شکل (الف) نتایج تحقیق حاضر و شکل (ب) نتایج برداشت شده از مرجع (Tisseling, Tisselin et al, 2003 ; 2007) است) ۶۴
- شکل ۱۱-۴: سرعت سیال (الف) ابتدای لوله (ب) انتهای لوله ۶۶
- شکل ۱۲-۴: سرعت انتشار موج در دیواره ی لوله (الف) ابتدای لوله (ب) انتهای لوله ۶۷
- شکل ۱۳-۴: تنش در دیواره ی لوله (الف) ابتدای لوله (ب) انتهای لوله ۶۷

فهرست جداول

جدول ۴-۱: روند انجام محاسبات اثر ضربه قوچ در مدل دو معادله‌ای.....	۵۶
جدول ۴-۲: روند انجام محاسبات مدل چهار معادله‌ای.....	۶۰
جدول ۴-۳: داده‌های مربوط به توزیع فشار در محل شیر توسط دو روش بدون شبکه‌بندی و روش MOC.....	۶۵

فهرست اعلام

ماتریس‌ها و بردارها	مقادیر اسکالر
A: ضریب	A: سطح مقطع
B: ضریب	C: سرعت موج کلاسیک
C: ضریب	det: دترمینال
D: ضریب شرایط مرزی	e: (m) ضخامت دیواره لوله
O: ماتریس صفر	E: (Pa) مدول یانگ مصالح دیواره لوله
q: بردار آشفتگی	FSI: تعامل سیال - سازه
R: ماتریس	K: (Pa) مدول بالک سیال
S: ماتریس تبدیل	L: (m) طول لوله
T: ماتریس تبدیل	MOC: روش مشخصه‌ها
η : ثابت ریمان	P: (Pa) فشار سیال
Λ : ماتریس قطری مقادیر ویژه	R: (m) شعاع داخلی لوله
ξ : بردار ویژه	t: (s) زمان
φ : متغیرهای وابسته	u_z : (m/s) سرعت محوری لوله
زیرنویس‌ها	V: (m/s) سرعت سیال
0: $z=0$ حالت اولیه، موقعیت	z: (m) مختصات محوری
f: سیال، جریان	γ : (m/s) ثابت
L: $z=L$ موقعیت	Δ : اندازه عددی گام، تغییرات مقدار
S: سازه	λ : (m/s) مقدار ویژه، سرعت موج
t: لوله	v: نسبت پواسون
Z: مسیر محوری	ρ : (Kg/m^3) چگالی جرم
	σ_z : (Pa) تنش محوری لوله

فصل ۱ مقدمه

۱-۱ مقدمه

در فصل حاضر به بیان کلیاتی در خصوص پژوهش انجام شده شامل تعریف مسأله، ضرورت انجام پژوهش، اهداف و همچنین ساختار کلی پایان نامه پرداخته شده است. جریان غیرماندگار جریانی است که خصوصیات آن در هر نقطه، با زمان تغییر کند. زمانی که جریان از یک حالت ماندگار به حالت ماندگار دیگری تغییر شرایط دهد، جریان غیر ماندگار مابین را جریان میرا (گذرا) می نامند. ضربه قوچ یا چکش آبی نوعی جریان میرا است که در خطوط لوله می تواند در اثر بسته شدن شیرها یا توقف ناگهانی پمپ ایجاد شود. تغییرات فشار در یک سیستم خط لوله باعث ایجاد جابجایی های دینامیکی در سازه لوله می شود که این جابجایی ها در جهت طولی و در جهت جانبی هستند. این لرزه های سازه ای می توانند باعث ایجاد نیروهای قابل ملاحظه ای در تکیه گاه ها شوند. همچنین با تاثیر گذاری در معادله پیوستگی و شرایط مرزی می توانند امواج فشاری درون مجرا را متاثر نمایند. بنابراین یک اندرکنش بین سیال و سازه خط لوله وجود دارد و هر دو بر هم تأثیر گذارند. بنابراین به منظور تحلیل سیستم باید معادلات حاکم بر حرکت سیال و حرکت دینامیکی سازه، بصورت همزمان (کوپله) نوشته شده، و با روشی مناسب حل شوند. همانطور که میدانیم تغییرناگهانی سرعت جریان بصورت موج در امتداد لوله حرکت نموده و تغییر مومنوم ناشی از آن باعث ایجاد فشار قابل ملاحظه ای می شود. چنانچه این فشار تعدیل نشود پمپی که

می بایست حداقل ۱۰ سال کار نماید در کمتر از ۱۰ ماه از بین می رود.

وقتی که یک سیال درون یک مسیر بسته در حال جریان باشد و کند شدن و یا تسریع سرعت جریان به وجود آید پدیده ضربه قوچ مشاهده خواهد شد. نظیر مواقعی که در مسیر لوله شیری قرار گرفته باشد و به وسیله آن تغییری در سطح خروجی جریان ایجاد شود. اگر این تغییرات تدریجی باشند می توان محاسبات را با توجه به اینکه مایع تراکم ناپذیر و جداره های مسیر عبور سخت هستند به روش مشابه با موج انجام داد. وقتی یک شیر را در مسیر خط لوله و جریان به سرعت می بندیم جریان درون شیر کاسته می شود. این عمل افزایش هد در سمت ورودی شیر را به دنبال خواهد داشت و ضربه ای ناشی از فشار زیاد را ایجاد می کند که در بالا دست جریان با سرعت موج صوتی تقویت می شود. نتیجه این ضربه فشاری کاهش سرعت جریان است. در سمت دیگر شیر فشار کاهش خواهد یافت و موج فشار کاسته شده با سرعت موج به طرف پایین دست جریان حرکت می کند که این نیز کاهش سرعت را به همراه دارد. اگر سرعت بسته شدن به اندازه کافی سریع و و فشار حالت پایدار به مقدار کافی کم باشد حباب هایی از بخار در سمت پایین دست شیر شکل می گیرد و به این ترتیب خلاء حاصله در نهایت از میان خواهد رفت و موج ناشی از فشار زیاد ایجاد می شود.

ترکیدن لوله و خطوط لوله در سیستم های انتقال و شبکه های توزیع، خرابی و شکسته شدن شیرها، دریچه های کنترل و پمپ ها از نمونه های بارز تاثیر این پدیده می باشد. از این گونه حوادث که در طرح های آبی موجب تخریب می گردد؛ فراوان مشاهده می شود و همه ساله خسارت زیادی را بر سیستم های جریان تحت فشار تحمیل می نماید.

۱-۲ بیان مسئله

با توجه به اهمیت پدیده ی ضربه ی قوچ و اندرکنش میان سیال و سازه و همچنین آسیب هایی که پدیده ی ضربه قوچ به سازه وارد می کند، لذا بررسی این موضوع از اهمیت بسزایی برخوردار است. به منظور بررسی اندرکنش میان سیال و سازه، نیاز به بررسی معادلات مومنتوم پیوستگی که شامل دو معادله می شوند و همچنین دو معادله دیگر که مربوط به لوله می شوند داریم. با حل این چهار معادله میزان فشار سیال که به لوله وارد می شود محاسبه شده و تداخل بوجود آمده میان سیال و سازه بررسی می شود. در پژوهش حاضر با استفاده از روش بدون شبکه بندی و به صورت دقیق در لوله های الاستیک به بررسی و محاسبه ی این پارامترها پرداخته شده است.

در بسیاری از مسائل مهندسی، مسئله اندرکنش سیال - سازه به چشم می خورد. در برخی از این مسائل مانند حمل سیالات در مخازن، سازه دارای حرکت جسم صلب و حرکت ارتعاشی است و در نهایت سیال

هم که قسمتی از حرکت خود را به دلیل مجاورت با سازه داراست دارای همین نوع حرکت پیچیده است. این امر به نوبه خود اهمیت و پیچیدگی اندرکنش سیال - سازه را مشخص می سازد. بررسی و تحلیل این گونه مسائل فوق العاده مهم و سرنوشت ساز است زیرا در بسیاری از موارد فوق، با حفظ جان انسان‌ها در ارتباط است.

۳-۱ ضرورت انجام پژوهش

در مطالعاتی که تاکنون انجام شده است چهار معادله‌ی ^۱FSI، که به تشریح نوسانات محوری لوله می-پردازند، با استفاده از روش مشخصه‌ها (MOC) حل شده اند. روش معمول بدین گونه است که با توجه به شرایط اولیه و با استفاده از مش‌بندی و در فواصل مکانی و زمانی مشخص، مقدار فشار و سرعت سیال محاسبه می‌شود. اما این روش با خطاهایی همراه است چرا که در این روش با استفاده از درون‌یابی به حل مسئله پرداخته می‌شود که خود شامل خطاهایی است. در این بررسی با استفاده از روشی دقیق و بدون نیاز به شبکه بندی در یک سیستم تک لوله متشکل از مخزن، لوله و شیر بدون در نظر گرفتن اثر اصطکاک به بررسی پدیده ضربه قوچ و تداخل سیال - سازه پرداخته می شود با توجه به آنکه در این روش

^۱ Fluid-structure interaction

از درون‌یابی استفاده نمی‌شود در نتیجه خطاهای حاصل به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند و همچنین مدت زمان انجام محاسبات بسیار کاهش می‌یابد.

۴-۱ اهداف

هدف این پایان نامه ارایه مدل ریاضی و حل عددی مساله ی تداخل سیال- سازه ناشی از ضربه قوچ در یک خط لوله متشکل از مخزن، لوله و شیر به روش بدون شبکه ی بندی (بدون شبکه بندی) است. در این رساله به صورت دقیق نشان داده خواهد شد که اثرات تداخلی سیال- سازه ضمن ایجاد یک تحریک مکانیکی در شبکه لوله ها به وجود می‌آیند. این امر پس از تهیه مدل ریاضی و حل عددی با روش شبکه بندی حاصل می شود.

۵-۱ ساختار پایان نامه

پژوهش حاضر به صورت زیر سازمان بندی شده است:

۱. فصل اول: مقدمه

در این فصل به بیان مقدمه و توضیح مختصری از پدیده ضربه قوچ و همچنین اندر کنش میان سیال و سازه پرداخته شده است.

۲. فصل دوم: بررسی پیشینه‌ی پژوهش

در این قسمت توضیح اجمالی در زمینه‌ی پدیده ضربه قوچ و روش‌های کلاسیک مورد استفاده جهت

بررسی این پدیده طی دو بازه‌ی زمانی قبل و بعد از سال ۱۹۹۰ میلادی بیان گردیده است.

۳. فصل سوم:

این مبحث شامل دو قسمت است: در قسمت نخست توضیح در مورد روش مورد نظر ارائه شده است و در

قسمت دوم به بیان مدل ریاضی مورد استفاده پرداخته شده است.

۴. فصل چهارم:

در این فصل از پژوهش، نتایج حاصل ارائه و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند.

۵. فصل پنجم:

در این بخش به جمع‌بندی کلی از نتایج حاصل در این پژوهش پرداخته شده است و پیشنهاداتی جهت

انجام مطالعات تکمیلی ارائه گردید.

فصل ۲ بررسی پیشینه پژوهش

۱-۲ خلاصه مطالعات پیش از سال ۱۹۹۰

نیوتن^۱ و لاگرانژ^۲ در قرن ۱۷، مطالعه روی هیدرولیک جریان های میرا را با تحقیق درباره نحوه ی انتشار امواج صوتی در هوا و انتشار امواج در آب های کم عمق، آغاز کردند. بعدها در سال ۱۸۶۶، وبر^۳ به مطالعه جریان سیال غیر قابل تراکم در لوله های کشسان پرداخت و آزمایش هایی را جهت تعیین سرعت امواج فشاری انجام داد. همچنین او معادلات پیوستگی و اندازه حرکت که اساس مطالعات جریان های غیرماندگار هستند را ارائه نمود (Chaudhry, 1987).

در نیمه دوم قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم، تحقیقات فراوانی در مورد پدیده ضربه قوچ صورت گرفت و نتایج آن به چاپ رسید. اکثر این تحقیقات در اروپا انجام شد و مفاهیم اولیه آن ها را در کارهای منابرا^۴ و سایرین می توان یافت (Ménabréa, 1858).

وود^۵ روشی ترسیمی تحلیلی جهت تحلیل جریان ضربه قوچ ارائه داد. برگرون^۱ به منظور تعیین شرایط در

^۱ Newoton

^۲ Lagrange

^۳ weber

^۴ Ménabréa

^۵ Wood

مقاطع میانی خط لوله، روش ترسیمی را بسط و گسترش داد. وی اولین کسی بود که در تحلیل ترسیمی خود تلفات اصطکاکی را در نظر گرفت. لووی^۲ نیز روش ترسیمی مشابه وود را در سال ۱۹۲۸ ارائه نمود و مساله تشدید حاصل از عملکرد تناوبی شیرها و همچنین کاهش فشار ناشی از باز شدن آهسته شیرها را مورد بررسی قرار داد. وی به منظور در نظر گرفتن تلفات اصطکاکی در تحلیل، جملات اصطکاک را در معادلات دیفرانسیل جزئی در نظر گرفت (Bergeron, 1936).

تداخل سیال - سازه در شبکه لوله ها اولین بار توسط اسکالاک^۳ در سال ۱۹۵۶ با ارائه معادلات تداخلی حاکم بر ضربه قوچ مطرح گردید (Skalak, 1956)

۲-۲ مطالعات پیشین پس از سال ۱۹۹۰

پس از اسکالاک این موضوع به طور پیوسته مورد بررسی قرار گرفت و روش های مختلفی اعم از کوپله، نیمه کوپله و الگوریتم های مختلفی جهت مدل سازی عددی آن ارائه گردید که از مهمترین آنها می توان

^۱ Bergon

^۲ lowy

^۳ Skalak

به حل معادلات تداخلی ارتعاش یک لوله با روش کاملاً خطوط مشخصه توسط ویگرت^۱ و بعدها توسعه آن توسط تایسلینگ^۲ حل معادلات سازه ای با روش اجزای محدود و معادلات هیدرولیک با روش خطوط مشخصه و حل تحلیلی مساله تداخل سیال- سازه برای یک لوله اشاره کرد. تایسلینگ و واردی^۳ آزمایشی بر روی یک سیستم لوله ای T شکل جهت بررسی اثرات FSI و جدایی ستون مایع انجام داده اند. با تنظیم فشار استاتیکی درون سیستم لوله در حالت سیال ساکن می توان آزمایش FSI با جدایی ستون یا بدون جدایی ستون مایع را انجام داد. آزمایش های انجام شده جهت تایید صحت آزمایش معمولاً چند بار تکرار شده است و نتایج مشابه حاصله صحت آزمایش ها را تایید کرده است. تمام شبکه لوله و میله ضربه زننده به وسیله مهارهایی به صورت آویزان نگه داشته شده اند و در نقاط مختلفی از سیستم لوله فشارسنج و کرنش سنج هایی جهت ثبت نتایج نصب شده است. یکی از مهمترین مقالات تایسلینگ می باشد که در آن^۴ معادله دیفرانسیل حاکم بر پدیده FSI در یک لوله مستقیم (دو معادله هیدرولیک جریان و یک معادله ارتعاش محوری از درجه دوم که به دو معادله دیفرانسیل مرتبه اول تبدیل می شود). به صورت تحلیلی حل شده اند.

^۱ Wigert

^۲ Tijsseling

^۳ vardy

حل دقیق ارائه شده نشان داد که استفاده از روش های عددی معمولا دارای خطای قابل توجهی می باشد و برای کاهش خطاها باید امان ها بسیار کوچک انتخاب شوند که این زمان محاسبه را بسیار بالا می برد. روش حل فوق به طور خلاصه عبارت است از روشی جهت مستقل ساختن چهار معادله دیفرانسیل از یکدیگر در یک سیستم مجازی و سپس حل آنها با روش خطوط مشخصه (Wiggert et al, 2001).

سلیمانی در سال ۱۳۸۷ نشان داد که موج های فشاری و ضربه قوچ در یک سیستم پمپاژ به علل مختلفی مانند قطع و وصل ناگهانی شیرها و یا از کار افتادن ناگهانی موتور پمپها بوجود می آیند و تعیین میزان حداکثر ضربه همواره به عنوان یکی از مهمترین آیتم ها برای مهندسان و طراحان ایستگاه های پمپاژ و خطوط انتقال از جنبه های فنی و اقتصادی مطرح بوده است (سلیمانی، ۱۳۸۷).

نرم افزار Hammer یکی از جدیدترین نرم افزارهای موجود جهت شبیه سازی ضربه قوچ می باشد و تعیین میزان اهمیت هر یک از پارامترهای ورودی در این نرم افزار در تعیین مقدار حداکثر ضربه منشا اصلی این تحقیق می باشد. در تحقیقات سلیمانی میزان تغییر در مقدار ضربه قوچ در اثر تغییر پارامتر های مختلفی مانند درجه حرارت آب، جنس، ضخامت و قطر لوله، دور و قدرت موتور و ممان اینرسی (پمپ و موتور) در نرم افزار مذکور تعیین شده است. در این رابطه ابتدا مدل ایستگاه پمپاژ کوه رنگ به

چشمه مروارید با مشخصات دبی کل ۲۰۰ لیتر در ثانیه و ارتفاع دینامیک ۱۹۴ متر و خط انتقال فولادی به طول ۵/۱ کیلومتر جهت تأمین آب اراضی کشاورزی در نرم افزار WaterCAD تهیه و پس از اجرای مدل در شرایط پایدار هیدرولیکی و انتقال به نرم افزار Hammer و اجرای متعدد در شرایط ناپایدار هیدرولیکی، حساسیت حداکثر ضربه نسبت به تک تک پارامترهای ورودی به دست آمد که نتایج نشان می دهد پارامترهای ممان اینرسی پمپ و موتور، قطر، جنس، ضخامت لوله و درجه حرارت آب به ترتیب بیشترین تأثیر را در کاهش حداکثر ضربه دارند.

اسدی نیازی و خسروجردی در سال ۱۳۸۶ در بررسی های خود نشان دادند که جریان ناماندگار یا گذرا (Transient) زمانی ایجاد می شود که شرایط جریان از یک حالت دائمی به یک حالت دائمی دیگر تغییر پیدا کند (اسدی نیازی و خسروجردی، ۱۳۸۶). از خصوصیات بارز جریان های ناماندگار، پیچیدگی معادلات حاکم و میرا بودن آن است.

یک نوع خاص از جریان های میرا، ضربه قوچ می باشد که در اثر تغییر ناگهانی سرعت در جریان سیال درون مجرا تغییرات ناگهانی فشار ایجاد و منتشر می گردد. در نتیجه آن فشارهای مثبت و منفی در خطوط لوله به وجود می آید که می تواند به خطوط انتقال خسارت های زیادی وارد سازد. لحاظ نکردن اثر ضربه قوچ در طراحی خطوط انتقال تاکنون باعث بروز خسارت های بیشماری در خطوط انتقال شده است.

از سوی دیگر طراحی خطوط انتقال، با لحاظ ضریب اطمینان در مقابل فشارهای مثبت و منفی مستلزم صرف هزینه بیشتر می‌باشد. همچنین در صورت تشکیل فشار منفی (Down surge) کمتر از فشار بخار مایع که باعث تشکیل بخار و جدایی ستون آب و کاویتاسیون می‌شود، علیرغم ضریب اطمینان بالای تاسیسات، بروز خسارت در طول بهره برداری انکار ناپذیر است. بنابراین محاسبه ضربه قوچ و لحاظ تجهیزات مناسب جهت مقابله با آن در خطوط انتقال ضروری است. از جمله تجهیزاتی که توان مهار هر دو فاز فشاری مثبت و منفی را دارد مخزن تحت فشار (Air chamber) است.

اسدی نیازی و همکاران در سال ۱۳۹۱، در بررسی‌های خود نشان دادند که ضربه قوچ در اثر تغییر ناگهانی سرعت در جریان سیال درون مجرا ایجاد و منتشر می‌گردد. در نتیجه این امر، فشارهای مثبت و منفی در خطوط لوله به وجود می‌آید که می‌تواند به خطوط انتقال خسارت‌های زیادی وارد سازد. از جمله تجهیزاتی که توان مهار هر دو فاز فشاری مثبت و منفی را دارد مخزن تحت فشار (Air chamber) است. در پژوهش آنها، مکانیزم عملکرد مخزن تحت فشار و ابعاد بهینه آن در فشارهای مثبت و منفی با توجه به معادلات حاکم تحلیل شده و سپس تاثیر مخزن تحت فشار برای یک مثال واقعی مورد بررسی قرار گرفت (اسدی و نیازی، ۱۳۹۱).

میرزاده و جعفری در سال ۱۳۸۹، در بررسی‌های خود بر اساس تحلیل عددی، معادلات حاکم بر ضربه قوچ برای خط لوله‌ای با شیر قطع کن در پایین دست مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل عددی به کمک برنامه نویسی رایانه ای صورت پذیرفته است. در پژوهش آنها ابتدا معادلات حاکم بر ضربه قوچ (پیوستگی و مومنتوم) تحلیل دیفرانسیلی می شود. از این گذر دستگاه معادله دیفرانسیلی با دو ضابطه پدید می‌آید. سپس این دو معادله دیفرانسیل شبه خطی با استفاده از آموزه‌های ریاضیات مهندسی به دو معادله دیفرانسیل جزئی تبدیل می‌گردد و در نهایت با اعمال شرایط مرزی و با استفاده از روش مشخصه دسته معادله برای تحلیل عددی توسط نرم افزار آماده می‌شود. پس از تحلیل و تفسیر خروجی برنامه‌ها، نتایج جالبی به دست آمد که از مهمترین آن‌ها می توان به دو مورد زیر اشاره نمود.

(۱) ارائه معادله ای که می‌تواند سهولت طراحی خطوط لوله را برای مهندسان فراهم آورد.

(۲) وابستگی متغیرهای زمانی معادله مذکور به جنس تابع عملکرد شیر.

هایسبروک^۱ و تایلینگ در مقاله‌ی سال ۱۹۹۴ خود، اثرات سختی تکیه گاه الاستیک بر فشارهای سیال و تنش‌های حاصله در سیستم لوله را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند به دلیل افزایش اثرات تداخلی

^۱ Heinsbroek

بین سیال و سازه در سیستم هایی با سختی کمتر تکیه گاهی، استفاده از معادلات کلاسیک ضربه قوچ و آنالیز غیر کوپله منجر به جواب های غیر قابل قبول خواهد شد. بررسی نتایج استفاده از انواع سختی های تکیه گاهی نشان داد که اگر سختی تکیه گاه کمتر از سختی یک متر لوله باشد بایستی از مدل آنالیز تداخلی استفاده شود و با انعطاف پذیرتر شدن سیستم، میزان تنش ها در سیستم لوله افزوده شده ولی نیروهای وارده بر تکیه گاه ها کاهش خواهد یافت. همچنین در این مقاله مباحث مهمی در زمینه رابطه سختی تکیه گاهی با فرکانس اصلی امواج فشاری، زمان آنالیز و واکنش های تکیه گاهی ارائه شده است (Heinsbroek & Tijsseling, 1994).

کریمی دونا و همکاران در سال ۱۳۹۲ پدیده ضربه قوچ را از نگاه رفتار دینامیکی لوله و مشخصه های ارتعاشی آن مطالعه کردند. برای این منظور خط لوله با استفاده از تئوری تیر اویلر- برنولی و شرایط مرزی معین مدل سازی می شود. سپس موج فشاری المانی از لوله را که در اثر یکی از عوامل ایجاد کننده ضربه قوچ بوجود آمده است، به کمک تابع شکل و روابطی که فشار داخلی سیال را به نیروی محوری تبدیل می نماید، به صورت بار معادل به دو سر المان منتقل می شود. در ادامه، این بار معادل بعنوان یک بار متحرک که با سرعت مشخصی حرکت می کند در نظر گرفته می شود. سپس با استفاده از روش المان محدود و الگوریتم نیومارک- بتا مشخصه های ارتعاشی خط لوله ای که در آن پدیده ضربه قوچ رخ داده

است به عنوان یک سیستم متغیر با زمان و دارای حرکت محوری، محاسبه و ارزیابی می‌شود (کریمی و همکاران، ۱۳۹۲).

نظری و بارانی در بررسی‌های خود در سال ۱۳۹۲ نشان دادند که جریان ناپایدار در اثر ایجاد آشفتگی در جریان پایدار (بسته شدن شیر، خاموش شدن پمپ و ...) اتفاق می‌افتد. تغییر ناگهانی سرعت سیال در داخل مجرا موجب تغییر ناگهانی فشار و ایجاد ضربه قوچ می‌شود. این پدیده بدلیل اثر متقابل سیال سازه درون لوله، روی سیستم لوله تاثیرگذار است. در حین ایجاد پدیده ضربه قوچ، نیروهای دینامیکی قابل توجهی به سیستم لوله وارد می‌شود. اگر این نیروها باعث حرکت شبکه لوله شود، پدیده تداخل سیال سازه رخ می‌دهد. در این پژوهش رفتار دینامیکی سیستم لوله در حوزه فرکانس مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل‌های زمانی ارایه شده جهت حل معادلات ضربه قوچ در سیستم لوله، بدلیل استفاده از میان‌یابی، جهت انتقال پارامترهای هیدرولیکی به معادلات سازه و بالعکس، زمان زیادی لازم خواهد بود. لذا با توجه به ساده تر شدن معادله دیفرانسیل ضربه قوچ در حوزه فرکانس، مساله در این حوزه حل می‌شود. نتایج بدست آمده با نتایج دیگر محققین مقایسه و کارایی و صحت آن مورد تایید واقع شد (نظری و بارانی، ۱۳۹۲).

معصومی نیا و احمدی در بررسی های خود در سال ۱۳۹۲ نشان دادند که از مهم ترین مباحث مطرح در تحلیل شبکه های توزیع سیال، شبیه سازی اثر تداخلی سیال سازه است که در شرایط بروز جریان غیرماندگار در سیال ایجاد می گردد. در این تحقیق روش عددی گودونو برای حل معادلات حاکم بر این پدیده بکار گرفته شده است. در این بررسی کارایی روش مذکور برای حل معادلات غیرخطی که شامل ترم منبعی به نام ترم اصطکاک هستند مورد توجه قرار می گیرد. در مدلسازی ترم اصطکاک از مدل شبه پایدار داری وایسباخ و مدل برونون استفاده شده است. در ادامه اثر تداخلی اتصال اصطکاک و پواسون اصطکاک و هر یک به تنهایی و با دقت مرتبه اول و دوم مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مقایسه نتایج با جواب های حاصل از روش خطوط مشخصه و نتایج آزمایشگاهی حاکی از این است که روش گودونو توانایی بالایی در حل مسائل خطی و غیرخطی دارد (احمدی و معصومی نیا، ۱۳۹۲).

مرتضوی نیا و همکاران در سال ۱۳۸۸ تداخل سازه- سیال در یک لوله حاوی جریان، به صورت متقارن محوری را مورد بررسی قرار دادند. جریان سیال، تراکم ناپذیر، گذرا، لزج، آرام و کاملاً توسعه یافته فرض شده است. سرعت سیال ورودی به صورت موجی سینوسی نوسانی در نظر گرفته شده است. با استفاده از حل عددی به روش های حجم و المان محدود، پارامترهای سرعت محوری جریان بر روی خط مرکزی، پروفیل سرعت و تنش برشی بر روی دیواره برای دو مدل دیواره صلب و انعطاف پذیر محاسبه و با یکدیگر

مقایسه شده‌اند. از آنجا که فشار وارده بر سطح خارجی لوله صفر است، دیواره لوله در مدل انعطاف پذیر تنها تحت تاثیر فشار جریان داخلی انبساط می‌یابد. بنابراین اندازه سرعت در مدل دیواره صلب، بیشتر از مدل انعطاف پذیر خواهد بود. همچنین مقادیر منفی تنش برشی بر روی دیواره در اثر وجود جریان برگشتی نزدیک دیواره، در مدل انعطاف پذیر نسبت به مدل دیواره صلب بیشتر قابل توجه است (مرتضوی نیا و همکاران، ۱۳۸۸).

هاشمی نژاد و عوض محمدی در بررسی خود در سال ۱۳۸۲ نشان دادند که حل دقیق برای تحلیل پاسخ دینامیکی حالت پایدار (هارمونیک) یک تونل ویسکوالاستیک مدفون در محیط الاستیک نامتناهی که در معرض تابش قائم یک موج فشاری تخت قرار دارد، ارائه شده است. ابتدا مدل مناسب رفتار دینامیکی پوسته ویسکوالاستیک بر مبنای تئوری هاوریلیاک^۱ - نگامی (۱۹۶۶) بررسی می‌گردد. سپس معادلات ناظم گسترش امواج الاستیک و روابط و بسط های پتانسیل میدانی ارائه می‌شود. در نهایت ضرایب مجهول پراکندگی صوتی با اعمال شرط پیوستگی کامل بین لوله و محیط الاستیک تعیین می‌گردد. مثال عددی ارائه شده در انتهای مقاله تغییرات اندازه تنش حلقه ای را در سطح داخلی لوله مدفون بر حسب فرکانس موج عارض بررسی می‌کند. نتایج بدست آمده از این تحلیل می‌تواند در طراحی خط

^۱ Haveriliak

لوله های مدفون جهت هدایت نفت، آب و گاز در زمین استفاده شود (هاشمی نژاد و عوض محمدی، ۱۳۸۲).

نظری و بارانی در سال ۱۳۹۲ نشان دادند که جریان ناپایدار در اثر ایجاد آشفتگی در جریان پایدار (بسته شدن شیر، خاموش شدن پمپ و ...) اتفاق می افتد. تغییر ناگهانی سرعت سیال در داخل مجرا موجب تغییر ناگهانی فشار و ایجاد ضربه قوچ می شود. این پدیده بدلیل اثر متقابل سیال سازه درون لوله، روی سیستم لوله تاثیرگذار است. در حین ایجاد پدیده ضربه قوچ، نیروهای دینامیکی قابل توجهی به سیستم لوله وارد می شود. اگر این نیروها باعث حرکت شبکه لوله شود، پدیده تداخل سیال سازه رخ می دهد. آنها رفتار دینامیکی سیستم لوله در حوزه فرکانس را مورد بررسی قرار دادند. در مدل های زمانی ارایه شده جهت حل معادلات ضربه قوچ در سیستم لوله، بدلیل استفاده از میان یابی، جهت انتقال پارامترهای هیدرولیکی به معادلات سازه و بالعکس، زمان زیادی لازم خواهد بود. لذا باتوجه به ساده تر شدن معادله دیفرانسیل ضربه قوچ در حوزه فرکانس، مساله در این حوزه حل می شود. نتایج بدست آمده با نتایج دیگر محققین مقایسه و کارایی و صحت آن مورد تایید واقع شد (نظری و بارانی، ۱۳۹۲).

آزادی و همکاران (۱۳۹۰) در بررسی های خود نشان دادند که در بررسی و تحلیل شبکه های لوله در حالت جریان غیر ماندگار، زمانی که فشار به مقدار فشار بخار برسد پدیده جدایی ستون رخ خواهد داد. در این

مقاله به بررسی رفتار دینامیکی سیستم های لوله توزیع سیال با در نظر گرفتن پدیده جدایی ستون مایع پرداخته شده است. مدل مورد استفاده در این تحقیق یک لوله مستقیم و معلق است که مورد برخورد یک میله فولادی توپر قرار می گیرد. نتایج تغییرات فشار در نقاط مختلف لوله، مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج معتبر واریسی گردیده است. مشخص گردید که فشار سیال درون لوله تحت اثر تداخل سیال-سازه تشدید می شود که نشان دهنده اثر بحرانی FSI بر روی فشار سیال است. نتایج به دست آمده برای حالت ضربه بدون در نظر گرفتن جدایی ستون مایع انطباق بسیار مناسبی بر نتایج آزمایشگاهی دارد.

برای حالت ضربه با در نظر گرفتن شرایط جدایی ستون مایع دارای انطباق کمتری است که می تواند به علت سادگی مدل استفاده شده در شبیه سازی جدایی ستون سیال باشد (آزادی و همکاران، ۱۳۹۰).

احمدی و مجد در سال ۱۳۸۸ نشان دادند که در بررسی و تحلیل شبکه های لوله در حالت جریان غیر ماندگار، زمانی که فشار به مقدار فشار بخار برسد پدیده جدایی ستون رخ خواهد داد. در تحقیق آنها مدل-های ریاضی توصیف کننده این پدیده و روش خطوط مشخصه که برای حل آن به کار گرفته شد. همچنین روابط اصطکاک غیر ماندگار را بررسی، سپس این روابط در مدل های جدایی ستون اعمال خواهند شد. مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی موجود نشان دهنده دقت

بالای مدل عددی توسعه یافته در این مطالعه جهت تحلیل جریان غیر ماندگار در شبکه لوله ها است (احمدی و مجد، ۱۳۸۸).

احمدی و کرامت در سال ۱۳۸۶ در بررسی های خود بیان نمودند که مگنتو هیدرودینامیک عنوانی است برای جریان های سیالی که حامل بار الکتریکی هستند و تحت تاثیر یک میدان مغناطیسی قرار گرفته اند. حل عمومی این جریان ها در حالت کلی به معنی حل همزمان معادلات ماکسول و معادلات ناویراستوکس و پیوستگی سیال می باشد. در مقاله آنها یک شبیه سازی عددی برای بررسی جریان یک فلز مذاب که ناشی از یک میدان مغناطیسی القایی تولید شده، انجام شده است. در این کار، فضایی که حاوی ماده مذاب است تحت تاثیر یک میدان نیرویی الکترومغناطیسی قرار گرفته است لذا برای شبیه سازی عددی از یک مدل سازی سه بعدی برای به دست آوردن میدان نیروی ناشی از القاگرها و آنالیز جریان سیال در داکت حاوی فلز مذاب استفاده شده است. برای حل تمامی معادلات از روش اجزای محدود استفاده شده است. همچنین یک برنامه کامپیوتری برای تحقیق روش عددی به کار برده شده و ارایه نتایج تهیه شده است (احمدی و کرامت، ۱۳۸۶).

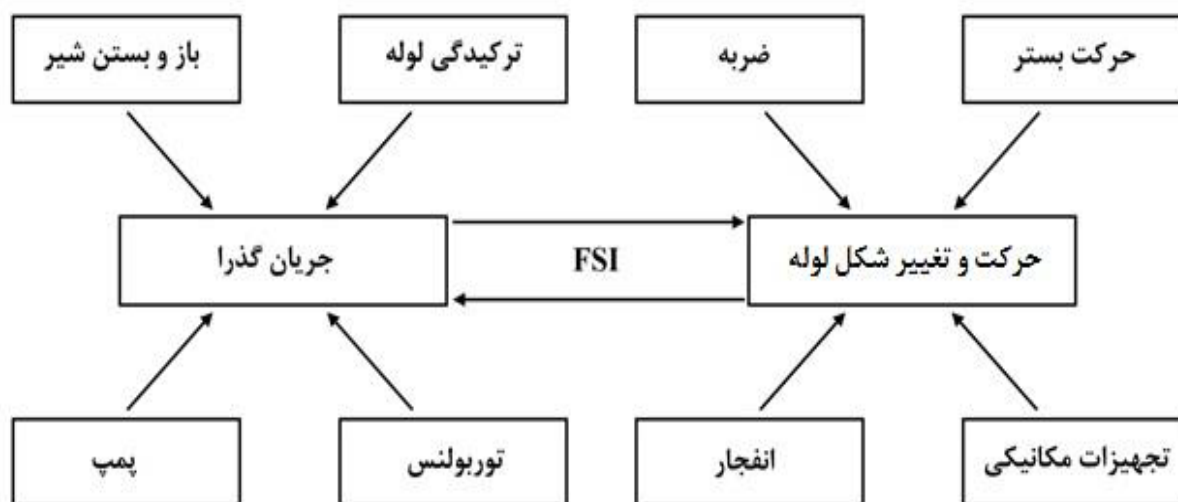
خسروی راد و همکاران در سال ۱۳۹۲ نشان دادند که نصب لوله ها در شبکه های آبرسانی، آبیاری، نیروگاه های آبی، نیروگاه های هسته ای و تاسیسات صنعتی از اهمیت بسیاری برخوردار است. این در حالی است

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. در بحث پیرامون تحلیل و طراحی شبکه های لوله که در سیستم‌های آبرسانی نیروگاه‌های آبی، تاسیسات صنعتی و غیره به کار می‌روند مبحثی مهم و گاه کنترل کننده تحت عنوان جریان غیرماندگار وجود دارد (خسروی راد و همکاران ۱۳۹۲).

فصل ۳ روش و مدل ریاضی

۱-۳ مقدمه

همانطور که در فصل اول اشاره شد در حین ایجاد پدیده ضربه قوچ، نیروهای دینامیکی قابل توجهی به سازه لوله وارد می‌شود. چنانچه این نیروها باعث حرکت شبکه لوله‌ها یا تغییر شکل آنها شود، اندرکنشی بین سازه و سیال به وجود خواهد آمد که به صورت متقابل و دائمی بر روی یکدیگر اثر خواهند گذاشت. این پدیده را اندرکنش سیال-سازه می‌نامند (FSI). برخی عوامل که سبب ایجاد پدیده اندرکنش سیال-سازه می‌شوند در شکل (۱-۳) به صورت کلی نشان داده شده است.



شکل ۱-۳: عوامل پدید آورنده پدیده اندرکنش سیال و سازه (Wiggert, 1986)

۳-۲ روش و معادلات

مدل چهار معادله‌ای FSI به تشریح نوسانات محوری لوله می‌پردازد که دو معادله‌ی آن مربوط به سیال و دو معادله‌ی دیگر مربوط به لوله است. این مدل پیشتر بوسیله‌ی روش مشخصه‌ها (MOC) حل شده است. روش معمول بدین گونه است که با مش‌بندی و در فواصل مکانی و زمانی، با توجه به شرایط اولیه و با استفاده از فرمول‌های (۱-۳) تا (۴-۳)، مقادیر فشار مایع، سرعت سیال، تنش محوری لوله و سرعت محوری لوله بدست می‌آید.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (۱-۳)$$

$$\frac{\partial V}{\partial z} + \left(\frac{1}{K} + \frac{2R}{Ee} \right) \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{2\nu}{E} \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} = 0 \quad (۲-۳)$$

$$\frac{\partial \dot{u}_z}{\partial t} - \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \quad (۳-۳)$$

$$\frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} - \frac{1}{E} \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} + \frac{\nu R}{Ee} \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \quad (۴-۳)$$

که در فرمول‌های بالا V سرعت سیال، P فشار سیال، R شعاع داخلی لوله، K مدول بالک، E مدول یانگ، e ضخامت دیواره لوله ρ_f جرم مخصوص سیال و $\dot{u}_z$ سرعت انتشار موج در دیواره لوله می‌باشد.

با توجه به آنکه استفاده از درون‌یابی باعث بروز خطاهایی در این روش می‌شود، در پژوهش حاضر با استفاده از روشی نوین، بدون نیاز به درون‌یابی و با صرف نظر کردن از اثر اصطکاک به محاسبه فشار مایع

و سرعت سیال می‌پردازیم.

در این فصل، در دو بخش به بررسی روند روش دقیق بدون شبکه بندی پرداخته می‌شود.

در بخش نخست، به چگونگی پیاده سازی روش بدون شبکه پرداخته می‌شود. سپس مقادیر فشار و سرعت

در یک خط لوله متشکل از مخزن لوله و شیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطابق شکل (۳-۲)، زمانیکه شیر

به صورت ناگهانی و به سرعت بسته می‌شود، با حرکت برروی خطوط مشخصه و استفاده از شرایط مرزی

و شرایط اولیه، به یافتن مقادیر پرداخته می‌شود. سپس به طور خاص به مسئله ضربه قوچ پرداخته می‌-

شود و با حل معادلات مومنتوم و پیوستگی با استفاده از روش مورد نظر، مقادیر فشار و سرعت محاسبه

می‌گردند.

در بخش دوم، علاوه بر دو معادله‌ی مربوط به سیال، معادلات مربوط به لوله (اثر FSI) نیز در نظر گرفته

می‌شوند. سپس با استفاده از این روش، مقادیر فشار و سرعت سیال، تنش محوری لوله و سرعت محوری



شکل ۳-۲: سیستم تک لوله

آن بدست می‌آیند.

۳-۳ روش بدون شبکه بندی در مدل دو معادله ای

در این قسمت معادله کلی این روش بیان می‌شود و روند بررسی معادله و اعمال روش بیان می‌گردد و سپس به طور خاص به بررسی معادلات ضربه قوچ و به یافتن مقادیر فشار و سرعت سیال پرداخته می‌شود.

در روش استفاده شده در این تحقیق از هیچ درون‌یابی و تقریبی استفاده نشده. این متد از طریق بازگشتی موقعیت موج را در گذشته رد یابی کرده است. روش مذکور را می‌توان بعنوان مرجعی در مسائلی که از نقطه گذاری استفاده کرده اند بکار برد. همچنین از این روش می‌توان در بررسی نتایج عددی استفاده کرد. این متد فاقد شبکه بندی است بدین معنا که در نیازی به شبکه‌های محاسباتی مرسوم نیست. در این مطالعه، تئوری در حالت کلی بیان شده بنابراین از آن می‌توان در سیستم‌های مشابه دو معادلاتی برای نمونه جریان کانال باز و الکترونیک استفاده کرد. این روش را می‌توان به سیستم‌های چهار معادلاتی از جمله تئوری امواج خطی در جریان دو فازی، جریان‌های چگال دو لایه‌ای و چکش آبی با اندر کنش

سیال-سازه تعمیم داد (Tijsseling, 2003). از این روش می‌توان در سیستم‌هایی با درجات بالاتر مانند

سیستم استفاده شده برای چکش آبی توسط Bürmann (1975) نیز استفاده نمود.

۳-۳-۱ معادلات هایپربولیک کلی

معادلات خطی کلی گسترش موج را در یک بعد فضایی توصیف می‌کنند.

$$A \frac{\partial}{\partial t} \phi(z, t) + B \frac{\partial}{\partial z} \phi(z, t) + C \phi(z, t) = 0 \quad (3-5)$$

ماتریس‌های ثابت A و B وارون‌پذیر هستند و $A^{-1}B$ قابل قطری شدن است. ماتریس ثابت C ، که وارون-

پذیر نمی‌باشد، منجر به پراکندگی فرکانس می‌شود (اگر $C \neq 0$). N و زوج مولفه‌های ϕ_i ، که بردار حالت ϕ

را می‌سازند، تابعی از متغیرهای مستقل z ($0 \leq z \leq L$) و t ($t \geq 0$) هستند. در این بررسی $N=2$ و $C=0$.

۳-۳-۲ روش مشخصه^۱ (MOC)

روش MOC مجموعه‌ی جدیدی از متغیرهای وابسته را ارائه می‌دهد:

$$\eta(z, t) = S^{-1} \phi(z, t) \quad \text{یا} \quad \phi(z, t) = S \eta(z, t) \quad (3-6)$$

^۱ Method of characteristics

بطوریکه هر η_i ترکیب خطی ای از متغیر اصلی ϕ_i است. با جایگذاری معادله (۳-۶) در معادله (۳-۵) در

شرایط $C = O$ خواهیم داشت:

$$A S \frac{\partial}{\partial t} \eta(z, t) + B S \frac{\partial}{\partial z} \eta(z, t) = 0 \quad (۳-۷)$$

با ضرب در $S^{-1}A^{-1}$ داریم:

$$\frac{\partial}{\partial t} \eta(z, t) + \Lambda \frac{\partial}{\partial z} \eta(z, t) = 0 \quad (۳-۸)$$

که در آن:

$$\Lambda = S^{-1}A^{-1} B S \quad (۳-۹)$$

زمانیکه ماتریس Λ قطری باشد مجموعه ای از معادلات مجزا حاصل می شود:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \quad (۳-۱۰)$$

جایگذاری معادله (۳-۱۰) در معادله (۳-۹) و محاسبه S مشخص می سازد که معادله زمانی دارای جواب

غیر بدیهی است که عناصر قطری ماتریس Λ ، مقادیر ویژه ای باشند که در معادله ی مشخصه صدق کنند.

$$\det(B - \lambda A) = 0 \quad (۳-۱۱)$$

که در این صورت ماتریس S شامل بردار ویژه ξ_i می شود که وابسته به λ_i است:

$$S = (\xi_1 \xi_2) \quad (12-3)$$

زمانیکه معادلات مجزای (۸-۳) در امتداد خطوط مشخصه در صفحه $z-t$ در نظر گرفته شوند (مطابق

رابطه ۱۳-۳) از حالت (۱۴-۳) به حالت (۱۵-۳) تغییر شکل می‌یابند:

$$\frac{dz}{dt} = \lambda_i, \quad i = 1, 2. \quad (13-3)$$

$$\frac{\partial \eta_i(z, t)}{\partial t} + \lambda_i \frac{\partial \eta_i(z, t)}{\partial z} = 0, \quad i = 1, 2, \quad (14-3)$$

$$\frac{\partial \eta_i(z, t)}{\partial t} = 0, \quad i = 1, 2, \quad (15-3)$$

حل معادلات دیفرانسیل معمولی (۱۳-۳) و (۱۵-۳) مطابق رابطه (۱۶-۳) است:

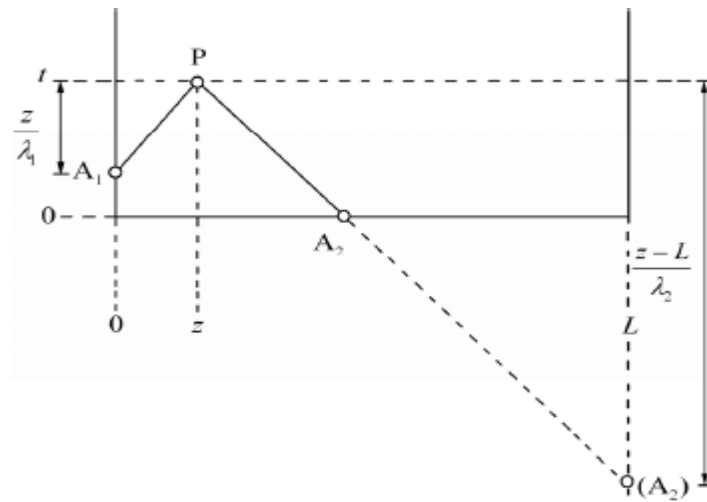
$$\eta_i(z, t) = \eta_i(z - \lambda_i \Delta t, t - \Delta t), \quad i = 1, 2 \quad (16-3)$$

با توجه به شکل ۳-۳، وقتی از زمانبندی عددی Δt استفاده می‌شود یا بطور کلی:

$$\eta_i(P) = \eta_i(A_i), \quad i = 1, 2,$$

یا

$$\eta(P) = \begin{pmatrix} \eta_1(A_1) \\ \eta_2(A_2) \end{pmatrix} \quad (17-3)$$



شکل ۳-۳: نقطه داخلی P و حرکت تدریجی بر روی خطوط مشخصه در صفحه زمان-مکان

مقدار متغیر مجهول η_i در امتداد خط $A_i P$ تغییر نمی‌کند. مجهولات اصلی در $\emptyset$ با استفاده از معادله

(۳-۶) از η_i بدست می‌آیند. در نتیجه داریم:

$$\emptyset(P) = \sum_{i=1}^2 S R_i S^{-1} \emptyset(A_i) \quad (۳-۱۸)$$

در ماتریس R_i ، i امین عنصر قطری برابر با ۱ و سایر عناصر ۰ هستند.

۳-۳-۳ شرایط مرزی

با توجه به شکل ۳-۴، در مرز $z = 0$ و $z = L$ ، روابط (۳-۱۶) و (۳-۱۷) تنها یک معادله را فراهم می‌کنند.

برای مشخص شدن دو مجهول $\eta_i(P)$ ، $i = 1, 2$ در $z = z_b$ ($z_b = 0$ یا $z_b = L$)، نیاز به یک معادله دیگر

در مرز داریم. این معادلات توسط شرایط مرزی خطی داده شده‌اند.

$$d_{z_b}^T(t) \phi(z_b, t) = q_{z_b}(t)$$

یا

$$d_{z_b}^T(t) S \eta(z_b, t) = q_{z_b}(t) \quad (3-19)$$

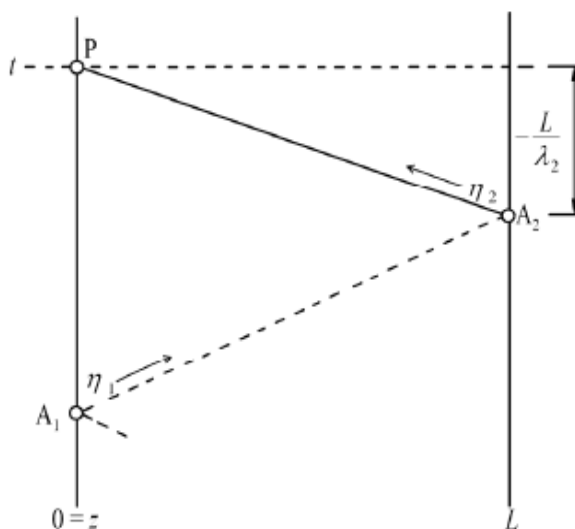
$d_{z_b}^T$ بردار سطری با دو ضریب است و پارامتر اسکالر q_{z_b} برانگیختگی مرزی است. برای سهولت، دو بردار

سطری d_L^T و d_0^T در ماتریس $D_{2 \times 2}$ قرار می‌گیرند و بردار q شامل دو اسکالر $q_1=q_0$ و $q_2=q_L$ می‌شود.

۳-۳-۴ شرایط اولیه

شرایط اولیه در $t = 0$ می‌تواند یک راه حل دائمی باشد $\phi(z, 0) = \phi_0$ ، که در آن، حالت ثابت ϕ_0 با

شرایط مرزی سازگار است یا این پارامتر می‌تواند هرگونه حالت نامتعادلی باشد، $\phi(z, 0) = \phi_0(z)$ ، که



شکل ۳-۴: نقطه مرزی P و حرکت تدریجی بر روی خطوط مشخصه در صفحه زمان-مکان

سیستم را آشفته می‌کند (مانند آزاد شدن ناگهانی فشار).

۳-۳-۵ مدل دو معادله‌ای چکش آبی

بر اساس معادله‌ی کلی (۳-۵)، چکش آبی بدون اصطکاک بصورت بردار حالت رابطه (۳-۲۰) و ماتریس

ضرایب (۳-۲۱) و (۳-۲۲) ارائه می‌شود:

$$\emptyset = \begin{pmatrix} V \\ p \end{pmatrix} \quad (۳-۲۰)$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & K^* - 1 \end{pmatrix} \quad (۳-۲۱)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & \rho^{-1} \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (۳-۲۲)$$

با جایگذاری ماتریس‌های (۳-۲۱) و (۳-۲۲) در معادله‌ی مشخصه (۳-۱۱) داریم:

$$\lambda_{1,2}^2 = \frac{K^*}{\rho} = c^2 \quad (۳-۲۳)$$

در معادله (۳-۲۳)، λ_1 مثبت و λ_2 منفی است.

ماتریس تبدیل مورد استفاده $S = (TA)^{-1}$ است که در آن T مطابق رابطه (۳-۲۴) تعریف می‌شود:

$$S^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & (\rho c)^{-1} \\ 1 & -(\rho c)^{-1} \end{pmatrix} \quad T = \begin{pmatrix} 1 & \lambda_1 \\ 1 & \lambda_2 \end{pmatrix} \quad \text{در نتیجه داریم:} \quad (۳-۲۴)$$

قابل توجه است که ماتریس تبدیل منحصر به فرد نیست. بعنوان مثال $S = (TB)^{-1}$ نیز اعتبار یک

ماتریس تبدیل را دارد. شرایط مرزی بوسیله ماتریس ضرایب D و بردار آشفتگی q تعریف می شود (مطابق

معادله (۳-۱۹)). برای مثال مخزنی در $z = 0$ و شیری در $z = L$ بصورت معادله ۳-۲۵ تعریف می شوند:

$$d_0^T = (0 \ 1) \quad \text{و} \quad q_0 = P_{\text{res}} \quad (۳-۲۵)$$

$$d_L^T = (1 \ 0) \quad \text{و} \quad q_L = 0 \quad (۳-۲۶)$$

P_{res} فشار مخزن است. با ترکیب معادلات (۳-۲۵) و (۳-۲۶) داریم:

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{و} \quad q = \begin{pmatrix} P_{\text{res}} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (۳-۲۷)$$

۳-۴ روش بدون شبکه بندی در مدل ۴ معادله ای

در این قسمت معادله کلی این روش بیان می شود و روند بررسی معادله و اعمال روش بیان می گردد و

سپس به طور خاص به بررسی معادلات تداخل سیال وسازه (FSI) و به یافتن مقادیر فشار و سرعت سیال

پرداخته می شود.

۳-۴-۱ معادلات هایپربولیک کلی

معادلات خطی کلی گسترش موج را در یک بعد فضایی توصیف می کنند.

$$A \frac{\partial}{\partial t} \Phi(z, t) + B \frac{\partial}{\partial z} \Phi(z, t) + C \Phi(z, t) = 0 \quad (3-28)$$

ماتریس های ثابت A و B وارون پذیر هستند و $A^{-1}B$ قابل قطری شدن است. ماتریس ثابت C ، که وارون-

پذیر نمی باشد، منجر به پراکندگی فرکانس می شود (اگر $C \neq 0$). N و زوج مولفه های Φ_i ، که بردار حالت Φ

را می سازند، تابعی از متغیرهای مستقل (فضا) z و (زمان) t هستند. در این بررسی $N=4$ و $C=0$.

۳-۴-۲ روش مشخصه ها

روش MOC مجموعه ای جدیدی از متغیرهای وابسته را ارائه می دهد:

$$\eta(z, t) = S^{-1} \Phi(z, t) \quad \text{یا} \quad \Phi(z, t) = S \eta(z, t) \quad (3-29)$$

بطوریکه هر η_i ترکیب خطی ای از متغیر اصلی Φ_i است. با جایگذاری معادله ی (۳-۲۹) در معادله (۳-۲۸)

در شرایط $C = 0$ خواهیم داشت:

$$A S \frac{\partial}{\partial t} \eta(z, t) + B S \frac{\partial}{\partial z} \eta(z, t) = 0 \quad (3-30)$$

با ضرب در $S^{-1}A^{-1}$ داریم:

$$\frac{\partial}{\partial t} \eta(z, t) + \Lambda \frac{\partial}{\partial z} \eta(z, t) = 0 \quad (31-3)$$

که در آن:

$$\Lambda = S^{-1}A^{-1} B S \quad (32-3)$$

زمانیکه ماتریس Λ قطری باشد مجموعه‌ای از معادلات مجزا حاصل می‌شود:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_4 \end{pmatrix} \quad (33-3)$$

جایگذاری معادله (33-3) در معادله (32-3) و محاسبه S مشخص می‌سازد که معادله زمانی دارای جواب

غیر بدیهی است که عناصر قطری ماتریس Λ ، مقادیر ویژه‌ای باشند که در معادله‌ی مشخصه صدق کنند.

$$\det(B - \lambda A) = 0 \quad (34-3)$$

که در این صورت ماتریس S شامل بردار ویژه ξ_i می‌شود که وابسته به λ_i است:

$$S = (\xi_1 \xi_2 \xi_3 \xi_4) \quad (35-3)$$

زمانیکه معادلات مجزای (31-3)

$$\frac{\partial \eta_i(z,t)}{\partial t} + \lambda_i \frac{\partial \eta_i(z,t)}{\partial z} = 0, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (36-3)$$

در امتداد خطوط مشخصه در صفحه z-t (معادله ۳۸-۳) در نظر گرفته شوند از حالت (۳۶-۳) به حالت

(۳۷-۳) تغییر شکل می‌یابند:

$$\frac{\partial \eta_i(z,t)}{\partial t} = 0, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (37-3)$$

$$\frac{dz}{dt} = \lambda_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (38-3)$$

حل معادلات دیفرانسیل معمولی (۳۷-۳) و (۳۸-۳) مطابق رابطه (۳۹-۳) است:

$$\eta_i(z, t) = \eta_i(z - \lambda_i \Delta t, t - \Delta t), \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (39-3)$$

وقتی از زمانبندی عددی Δt استفاده می‌شود یا بطور کلی و با توجه به شکل ۳-۵:

$$\eta_i(P) = \eta_i(A_i), \quad i = 1, 2, 3, 4$$

یا

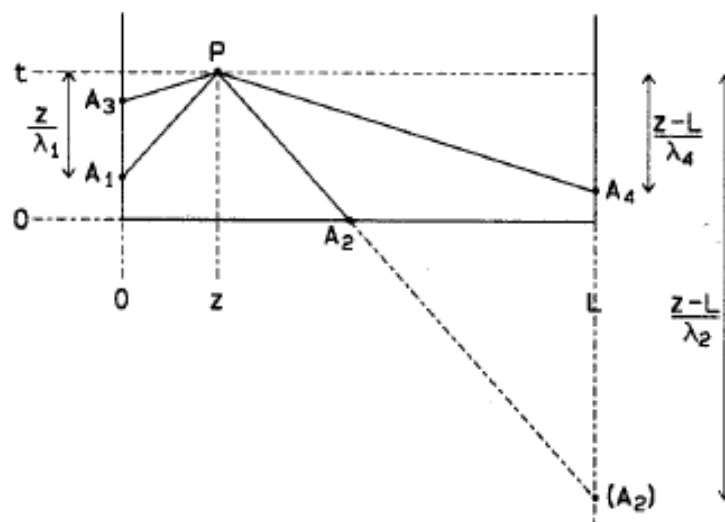
$$\eta(P) = \begin{pmatrix} \eta_1(A_1) \\ \eta_2(A_2) \\ \eta_3(A_3) \\ \eta_4(A_4) \end{pmatrix} \quad (40-3)$$

مقدار متغیر مجهول η_i در امتداد خط $A_i P$ تغییر نمی‌کند. مجهولات اصلی در $\emptyset$ با استفاده از معادله

(۳-۲۹) از η_i بدست می‌آیند. در نتیجه داریم:

$$\emptyset(P) = \sum_{i=1}^4 S R_i S^{-1} \emptyset(A_i) \quad (۳-۴۱)$$

در ماتریس R_i ، i امین عنصر قطری برابر با ۱ و سایر عناصر ۰ هستند.

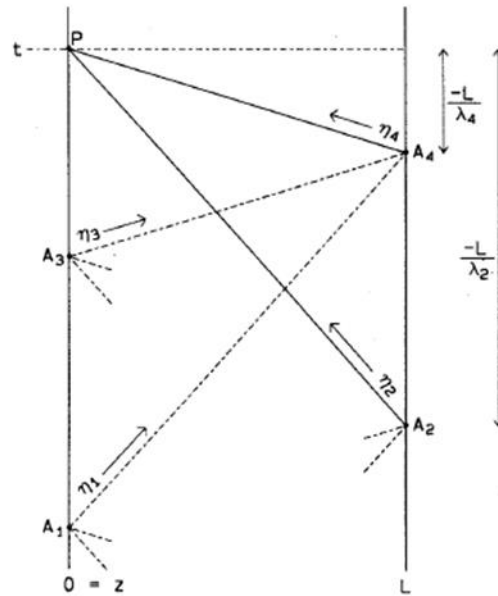


شکل ۳-۵: نقطه داخلی P و حرکت تدریجی بر روی خطوط مشخصه در صفحه مکان-زمان

۳-۴-۳ شرایط مرزی

در مرزها، روابط (۳-۳۹) و (۳-۴۰) دو معادله را فراهم می‌کنند (شکل ۳-۶). برای مشخص شدن چهار

مجهول $\eta_i(P)$ در $z = z_b$ (یا $z_b = 0$ یا $z_b = L$)، نیاز به دو معادله دیگر در مرز داریم. این معادلات توسط



شکل ۳-۶: نقطه مرزی P و حرکت تدریجی بر روی خطوط مشخصه در صفحه مکان-زمان
شرایط مرزی خطی داده شده‌اند.

$$D_{z_0}(t) \Phi(z_0, t) = q_{z_0}(t)$$

یا

$$D_{z_0}(t) S \eta(z_0, t) = q_{z_0}(t) \quad (۴۲-۳)$$

D_{z_0} ماتریس ضرایب ۲×۴ است و پارامتر q_{z_0} آشفتگی مرزی است. برای سهولت، ماتریس ۴×۴ ، D ، با

جایگذاری یک در میان ردیف‌های D_0 و D_L با این دو ماتریس ترکیب می‌شود. چهار بردار q با دو بردار q_L

و q_0 ترکیب می‌شود بطوریکه سطرهای q_L و q_0 بصورت یک در میان در بردار q جایگذاری می‌شود.

۴-۴-۳ شرایط اولیه

شرایط اولیه در $t = 0$ می‌تواند یک راه حل دائمی باشد $\Phi(z, 0) = \Phi_0$ ، که در آن، حالت ثابت Φ_0 با

شرایط مرزی سازگار است یا این پارامتر می‌تواند هرگونه حالت نامتعادلی باشد، $\emptyset(z, 0) = \emptyset_0(z)$ ، که سیستم را آشفته می‌کند (مانند آزاد شدن ناگهانی فشار). تنها ماتریس وارونه‌ساز در $\eta(z, 0) = S^{-1}\emptyset_0(z)$ بصورت عددی در این قسمت حل شده. البته می‌تواند بصورت جبری نیز حل شود. در شرایط اولیه صفر نیازی به ماتریس وارونه‌ساز نیست.

۳-۵ روش ۴ معادله ای FSI

در این قسمت به بررسی مدل چهار معادله ای FSI پرداخته می‌شود. بدین مفهوم که علاوه بر دو معادله مربوط به ضربه قوچ که در قسمت قبل مورد بررسی قرار گرفت دو معادله مربوط به لوله نیز در نظر گرفته می‌شود. این چهار معادله شامل دو معادله‌ی هیدرولیکی (معادله پیوستگی و مومنتم) و یک معادله ارتعاش محوری سازه می‌شود. از آنجاییکه معادله ارتعاش محوری سازه یک معادله مرتبه دوم است، بنابراین این معادله خود به دو معادله دیفرانسیل مرتبه اول تبدیل می‌شود. متغیرهایی که در این چهار معادله دیفرانسیل مرتبه اول وجود دارند شامل فشار، سرعت، تنش محوری و سرعت محوری دیواره لوله است. مدل چهار معادله ای FSI عموماً در لوله‌های مستقیم با حرکت محوری کاربرد دارد.

بر اساس معادله‌ی کلی (۳-۵)، ارتعاش محوری لوله‌ی حاوی سیال (معادلات ۳-۱ تا ۳-۴) می‌توانند

بوسیله‌ی بردار حالت ارائه شوند:

$$\Phi = \begin{pmatrix} V \\ P \\ \dot{u}_z \\ \sigma_z \end{pmatrix} \quad (43-3)$$

ماتریس ضرایب مطابق روابط (44-3) و (45-3) می‌باشند:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (\rho_f c_f^2)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & vR(Ee)^{-1} & 0 & -(\rho_s c_s^2)^{-1} \end{pmatrix} \quad (44-3)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & \rho_f^{-1} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -2v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\rho_s^{-1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (45-3)$$

ثابت‌های موجود در رابطه (46-3) به ترتیب مربع فشار کلاسیک و مربع تنش محوری سرعت موج است:

$$c_f^2 = \left\{ \frac{\rho_f}{K} + (1 - v^2) \left(\frac{2\rho_f R}{Ee} \right) \right\}^{-1} \quad (46-3)$$

$$c_s^2 = \frac{E}{\rho_s}$$

با جایگذاری ماتریس‌های روابط (44-3) و (45-3) در معادله‌ی مشخصه‌ی (34-3) خواهیم داشت:

$$\lambda^4 - \gamma^2 \lambda^2 + c_f^2 c_s^2 = 0 \quad (47-3)$$

که در آن:

$$\gamma^2 = \left(1 + 2v^2 \frac{\rho_f R}{\rho_s e} \right) c_f^2 + c_s^2 \quad (48-3)$$

این کار موجب اصلاح اندکی (در اثر FSI) در مربع سرعت موج می‌شود:

$$\lambda_{1,2}^2 = \frac{1}{2} \{ \gamma^2 - (\gamma^4 - 4c_f^2 c_s^2)^{1/2} \} \quad (3-49 \text{ الف})$$

$$\lambda_{3,4}^2 = \frac{1}{2} \{ \gamma^2 + (\gamma^4 - 4c_f^2 c_s^2)^{1/2} \} \quad (3-49 \text{ ب})$$

در این روابط λ_1 و λ_3 مثبت، λ_2 و λ_4 منفی می‌باشند. ماتریس تبدیل مورد استفاده (رابطه (3-45))

بصورت $S = (TA)^{-1}$ تعریف می‌شود که در آن T معادل است با :

$$\text{row}_i \{T\} = \left(1 \quad \lambda_i \quad 2v \frac{\lambda_i^2}{c_s^2 - \lambda_i^2} \quad 2v \frac{c_s^2 \lambda_i}{c_s^2 - \lambda_i^2} \right), \quad i = 1, 2 \quad (3-50)$$

$$\text{row}_i \{T\} = \left(\rho_f \frac{v}{E} \frac{R}{e} \frac{c_f^2 \lambda_i^2}{c_f^2 - \lambda_i^2} \quad \rho_f \frac{v}{E} \frac{R}{e} \frac{c_f^2 \lambda_i^3}{c_f^2 - \lambda_i^2} \frac{\lambda_i^2}{c_s^2} \quad \lambda_i \right), \quad i = 3, 4$$

شرایط مرزی بوسیله‌ی ماتریس ضرایب D و بردار برانگیختگی q ارائه داده می‌شوند (معادله (3-42)) را

ببینید). بعنوان مثال، مخزنی در $z = 0$ و شیر بدون وزن مهار نشده‌ای در $z = L$ ، ماتریس‌های موجود در

روابط (3-51) و (3-52) را ارائه می‌دهند:

$$D_0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{و} \quad q_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3-51)$$

$$D_L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & A_f & 0 & -A_s \end{pmatrix} \quad \text{و} \quad q_L = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3-52)$$

در رابطه (۳-۵۲)، A سطح مقطع عرضی است. در بررسی که ژانگ^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۹ انجام دادند، ماتریس‌های بالا در هم ادغام شدند تا تنها یک ماتریس، D ، حاصل شود. همچنین با ادغام بردار-های بالا، بردار q حاصل شد (Zhang et al, 1999). در این بررسی ماتریس مرزی D در $z=0$ و $z=L$ دارای سطرهایی با شرایط مرزی متناوب است. با ادغام روابط (۳-۵۱) و (۳-۵۲) داریم:

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & A_f & 0 & -A_s \end{pmatrix} \quad (۳-۵۳)$$

۳-۶ الگوریتم

این قسمت الگوریتمی را به منظور پیدا کردن مقدار دقیق بردار حالت $\emptyset$ در هر نقطه‌ی (z, t) در صفحه مکان-زمان توصیف می‌کند. این الگوریتم بر حسب ثابت ریمن η_i فرموله شده است. همانطور که در شکل ۳-۶ مشاهده می‌شود، بردار η در نقطه‌ی P واقع در مرز چپ و در موقعیت $z = 0$ و زمان t شامل چهار مولفه‌ی η_1, η_2, η_3 و η_4 است. فرض می‌شود که مقدار مولفه‌های η_2 و η_4 معلوم است زیرا

^۱ Zhang

مقادیر آنها به ترتیب برابر با مقادیر η_2 و η_4 در نقاط A_2 و A_4 ، واقع در مرز راست در موقعیت $z=L$ ، است (مطابق رابطه ۳-۴۰). مولفه‌های η_1 و η_3 از شرایط مرزی (رابطه ۳-۴۲) پیروی می‌کنند.

این مولفه‌ها وابسته به D_0 ، S ، q ، η_2 و η_4 می‌باشند. طبیعتاً همین روند برای هر نقطه‌ی P واقع در مرز راست نیز صادق است. برای محاسبه‌ی η در نقطه‌ی P واقع در مرز چپ، نیاز به اطلاعاتی از نقاط قبلی، A_2 و A_4 ، در مرز راست داریم و برای محاسبه‌ی η در نقاط A_2 و A_4 در مرز راست نیز، نیاز به اطلاعاتی در مورد نقاط قبلی (A_1 و A_3) در مرز چپ داریم. کل این فرایند می‌تواند بخوبی در یک بازگشت ساده انجام شود که این روند بازگشت، زمانی متوقف می‌شود که خطوط مشخصه، خط $t = 0$ را قطع کنند. که در آن η دارای یک مقدار اولیه‌ی داده شده است.

۳-۶-۱ ورودی

ماتریس ضرایب A ، B ، C ، $D(t)$ ، بردار برانگیختگی $q(t)$ و شرایط اولیه $\emptyset_0(z)$ کل سیستم را بصورت کلی توصیف می‌کنند. دوباره تاکید می‌شود که $C = 0$ ، در نتیجه از این الگوریتم در میله‌ی تیموشنکو^۱، سیستم‌های دارای اصطکاک، ویسکوز دمپینگ^۲ و غیره استفاده نمی‌شود.

^۱ Timoshenko beams

^۲ viscous damping

۳-۶-۲ خروجی

خروجی بردار حالت $\eta = S \varnothing$ بصورت تابعی از مکان و زمان است.

فصل ۴ نتایج و بحث

۴-۱ مقدمه

در این فصل در ابتدا به تشریح سه مکانیزم عمده در بررسی‌های انجام شده بر روی پدیده FSI لوله‌ها پرداخته می‌شود، سپس به بیان یک مساله پرداخته می‌شود که این مساله به دفعات در مقالات و همچنین در آزمایشگاه دانشگاه دلف^۱ مورد تحلیل قرار گرفته است. در تحقیق حاضر نیز به بررسی همین مساله پرداخته شده و نتایج حاصل، با استفاده از نتایج بدست آمده توسط آزمایشگاه دانشگاه دلف و مقالات مورد صحت سنجی قرار گرفت. قابل ذکر است که در تحقیق حاضر نتایج حاصل با در نظر گرفتن اثر کوپله پواسن می‌باشند.

به منظور حل این مساله، با تهیه‌ی فلوچارت به تشریح مراحل کدنویسی، اعمال معادلات، شرایط مرزی و اولیه در مدل دو معادله‌ای و همچنین مدل چهار معادله‌ای پرداخته می‌شود. سپس نتایج استخراج شده از نرم افزار متلب بررسی گردید. در گام بعدی نتایج مربوط به ضربه قوچ در محل شیر و در فاصله‌ای مشخص از مخزن در یک خط لوله متشکل از مخزن، لوله و شیر به روش بدون شبکه ارایه می‌شود و نتایج مربوط به حالت تداخلی (FSI) با روش بدون شبکه در این خط لوله ارایه می‌گردد. این نتایج با در نظر

^۱ Delf

گرفتن اثر تداخلی پواسون می‌باشند (شیر انتهایی ثابت در نظر گرفته می‌شود و تنها معادله ارتعاش محوری با معادلات هیدرولیکی کوپله می‌شود). در انتها نتایج استخراج شده با استفاده از نتایج تایسلینگ (Tijssling, 2007) و نتایج حاصل از انجام آزمایش های مکرر در آزمایشگاه دانشگاه دلف و همچنین روش کلاسیک حل معادلات ضربه قوچ و FSI مورد صحت سنجی قرار می‌گیرد.

۲-۴ انواع مکانیزم‌های اثرات کوپله بر روی پدیده FSI

سه مکانیزم عمده در بررسی‌های انجام شده بر روی پدیده FSI لوله‌ها تاکنون شناخته شده است (Wiggert et al, 2001):

۱. مکانیزم کوپله پواسن^۱
۲. مکانیزم کوپله اصطکاک^۲
۳. مکانیزم کوپله تقاطع^۳ (اتصال)

مکانیزم کوپله پواسن ناشی از وجود نسبت پواسن برای مصالح لوله می‌باشد، که باعث تبدیل تنش‌های

¹ Poisson coupling

² Friction coupling

³ Junction coupling

شعاعی به تنش‌های محوری می‌گردد. بررسی آن با استفاده از جمله‌ای که وابسته به نسبت پواسن مصالح است و در معادلات هیدرولیکی و سازه‌ای وجود دارد، انجام می‌شود. این اثر می‌تواند باعث تغییرات عمده‌ای در نمودار فشار سیال گردد.

مکانیزم کوپله اصطکاک ناشی از اصطکاک سیال با جدار داخلی لوله است و عملکرد آن به گونه‌ای است که باعث کاهش فشارها و تنش‌ها در لوله می‌گردد (میرایی). به منظور سهولت در طراحی این اثر در نظر گرفته نمی‌شود به همین دلیل اکثر محققین از این اثر چشم‌پوشی می‌کنند. به منظور بررسی دقیق این اثر می‌بایست از یک مدل اصطکاک غیر ماندگار استفاده شود که در تحقیق حاضر این امر مد نظر نمی‌باشد.

مکانیزم کوپله اتصال، زمانی به وجود می‌آید که بعضی از اتصالات در سازه‌ی شبکه لوله کاملاً به زمین مهار نشده باشند. مشاهده می‌شود که در بعضی حالات اثر کوپله اتصال بسیار جدی‌تر از اثر کوپله پواسن بوده و می‌تواند باعث تشدید تنش‌ها و تخریب سازه گردد.

در تحقیق حاضر نتایج استخراج شده با در نظر گرفتن اثر کوپله پواسن می‌باشند. در ادامه به تشریح این اثر پرداخته می‌شود.

۴-۲-۱ اعمال اثر تداخلی پواسن

بالا رفتن فشار در یک نقطه از شبکه لوله‌ها باعث ایجاد تنش‌های شعاعی در مقطع لوله می‌شود. این تنش‌ها به نسبت پواسن در امتداد محور لوله انتشار می‌یابند و باعث می‌شوند که در سیستم لوله‌ها تمایلاتی برای ایجاد تغییر مکان محوری ایجاد شود. بدیهی است مقدار این اثر کوپله بستگی زیادی به نسبت پواسن مصالحی دارد که لوله از آن ساخته شده است و اگر در روابط این نسبت صفر گذاشته شود مقدار این اثر کوپله نیز صفر منظور خواهد شد.

در اثر کوپله پواسن، تنها معادله ارتعاش محوری با معادلات هیدرولیکی کوپله می‌شود. بنابراین اگر برای یک شبکه لوله فقط اثر کوپله پواسن در نظر گرفته شود (تمام تقاطع‌ها و شیرها و اتصالات کاملاً گیردار باشند) کافی است با انجام یک آنالیز کوپله، مقادیر همگرا شده و سرعت، فشار و جابجایی‌های محوری محاسبه شوند. همان طور که گفته شد بدیهی است که این تحلیل فقط زمانی معتبر است که تمام تقاطع‌ها، زانویی‌ها، شیرها و اتصالات و سایر نقاطی که در آنها تغییر مومنت اتفاق می‌افتد کاملاً امکان جابجایی از آنها گرفته شده باشد. در واقع در این حالت می‌توان برای حل معادلات سازه‌ای، هر لوله از شبکه را (منظور از هر لوله در شبکه، لوله‌ای است که بین نقاط تثبیت شده واقع شده است) به صورت کاملاً مستقل از بقیه لوله‌ها تحلیل کرد.

جهت ارایه یک مدل ریاضی دقیق، علاوه بر معادلات حاکم باید دانست پیش از شروع جریان وضعیت سیستم به چه شکلی بوده است. مقدار مجهولات (سرعت و فشار در معادلات هیدرولیک، جابجایی، سرعت و تنش‌ها در معادلات ارتعاش سازه) در شرایطی که سیستم در حال تعادل است به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته می‌شوند.

در پژوهش حاضر، تنها مدلسازی اثر تداخلی پواسن مورد نظر می‌باشد. به منظور جلوگیری از اثر تداخلی اتصال، گره‌های مرز به صورت کاملاً تثبیت شده در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین در این حالت انتظار می‌رود که جابجایی گره شیر معادل صفر باشد.

قابل ذکر است که با توجه به بی حرکت بودن گره شیر در حالت اثر تداخلی پواسن، تمام نیروی هیدرولیکی اثر کننده به گره شیر به تکیه گاه منتقل می‌شود. در صورتیکه در حالت اثر تداخلی اتصال، این نیروی هیدرولیکی، خود باعث ایجاد یک موج تنشی در سازه می‌گردد که با امواج سازه‌ای تولید شده به علت اثر تداخلی پواسن جمع می‌گردد.

۳-۴ مساله حل شده

سیستم تک لوله نشان داده شده در شکل ۴-۱، سیستم پر شده از آب مخزن-لوله- شیر است که دارای

مشخصات $f=0$ ، $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$ ، $K=2,1 \text{ GPa}$ ، $E=210 \text{ GPa}$ ، $e=8 \text{ mm}$ ، $R=398/5 \text{ mm}$ ، $L=20 \text{ m}$ و

$Q_0 = 0/5 \text{ m}^3/\text{s}$ است. بطوریکه سرعت اولیه‌ی جریان در این سیستم $V_0 = 1/00 \text{ m/s}$ و سرعت موج m/s

$c = \lambda_1 = -\lambda_2 = 1025/7$ است (معادله ۳-۲۳). جهت محاسبه فشار در سیستم تک لوله‌ای این سیستم

در دو حالت، در محل شیر و سپس در فاصله $z = 11/15 \text{ m}$ از مخزن، مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱-۴: سیستم تک لوله‌ای

۴-۴ نتایج مربوط به ضربه قوچ (مدل دو معادله‌ای)

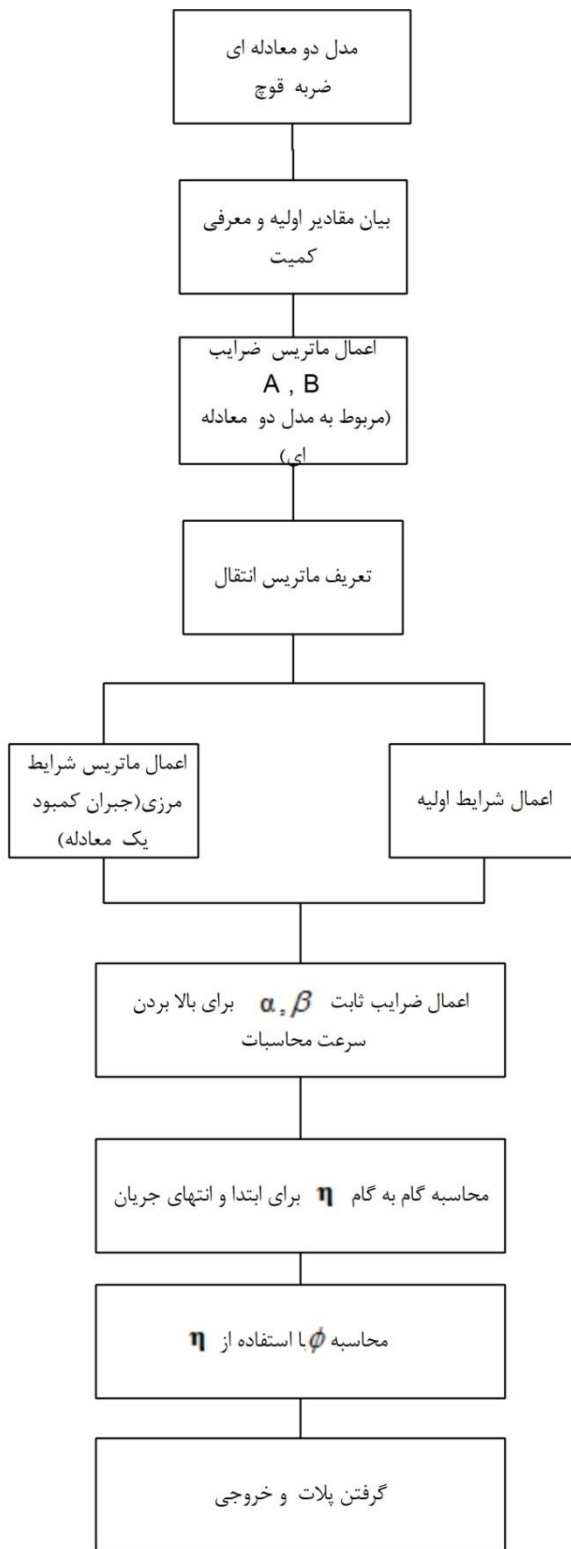
در این مدل تنها دو معادله دیفرانسیل هیدرولیک، شامل معادلات پیوستگی و مومنتم حل می‌شوند. روند

انجام محاسبات اثر ضربه قوچ، مطابق جدول ۴-۱ است. در تشریح اثر ضربه قوچ می‌توان گفت که اساساً

تغییر در سرعت سیال باعث ایجاد ضربه قوچ می‌شود. بسته شدن شیر منجر به تغییر در سرعت سیال

شده که این امر باعث ایجاد ضربه قوچ می‌گردد.

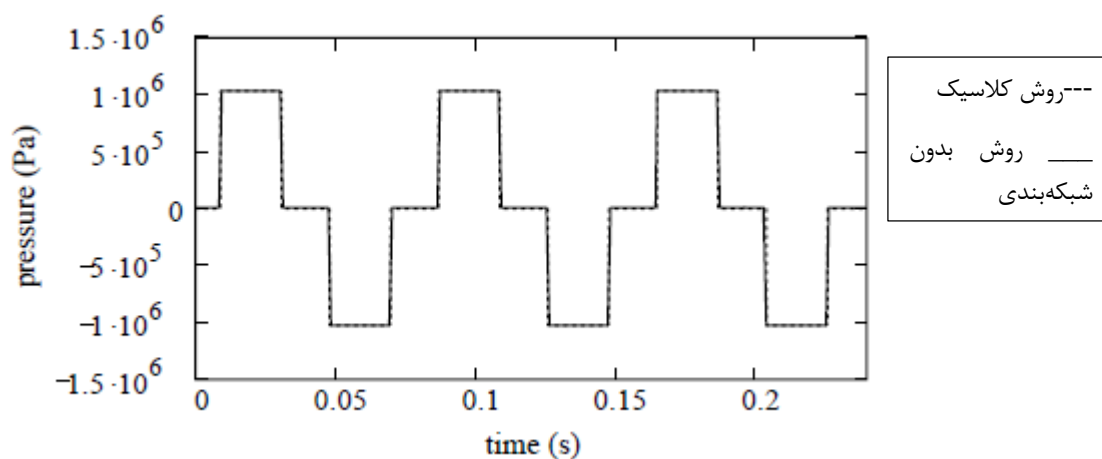
جدول ۴-۱: روند انجام محاسبات اثر ضربه قوچ در مدل دو معادله‌ای



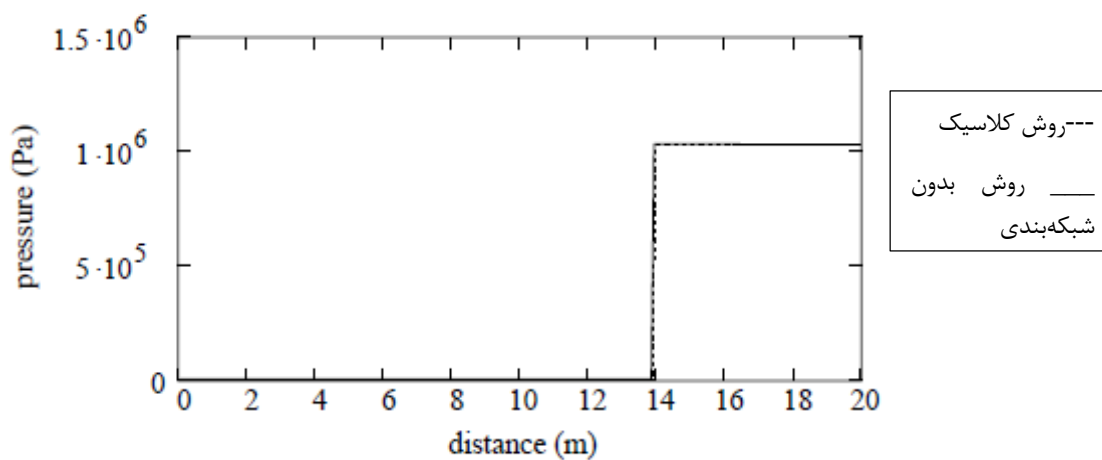
شکل ۲-۴ نشان‌دهنده‌ی نتایج مربوط به ضربه قوچ در یک سیستم تک لوله‌ی متشکل از مخزن، لوله و

شیر در محل $z=11/15$ و هنگامی است که شیر به سرعت بسته شود ($T_c=0s$). توزیع فشار در طول لوله

در حالتی که شیر به سرعت بسته شود در شکل ۳-۴ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۴: توزیع فشار در $z=11/15m$ و $T_c=0s$

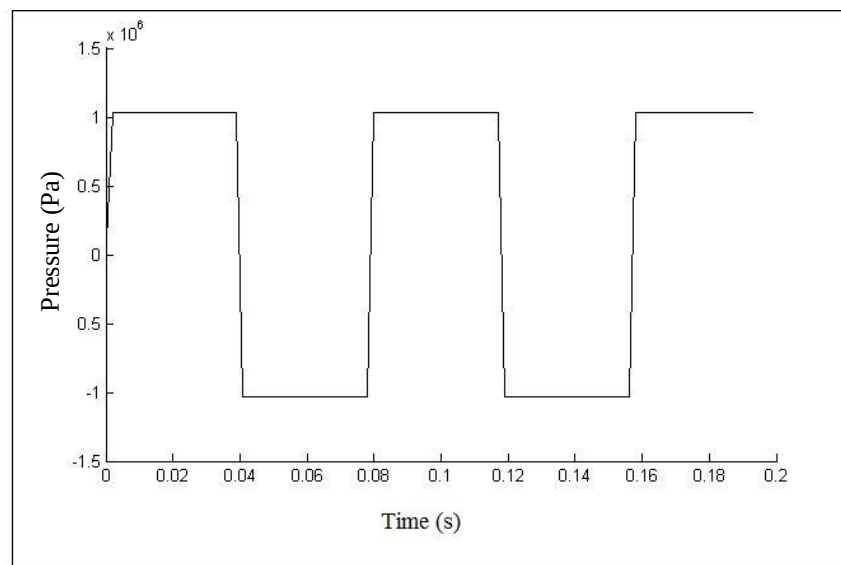


شکل ۳-۴: توزیع فشار در طول لوله در حالت بسته شدن ناگهانی شیر $T_c=0s$

همچنین نتایج مربوط به ضربه قوچ در چنین سیستمی در محل شیر و در $t=0/2s$ مطابق شکل ۴-۴

است. همانطور که ملاحظه می‌شود این نتایج به خوبی با نتایج تایسلینگ (Tijsseling, 2003 ;

Tijsseling, 2007) مطابقت دارد.



شکل ۴-۴: توزیع فشار در محل شیر در $t=0/2s$

۴-۵ نتایج مربوط به حالت FSI (مدل ۴ معادله ای)

در این مبحث به بررسی نتایج مساله بیان شده مربوط به مدل چهار معادله ای FSI به روش بدون شبکه

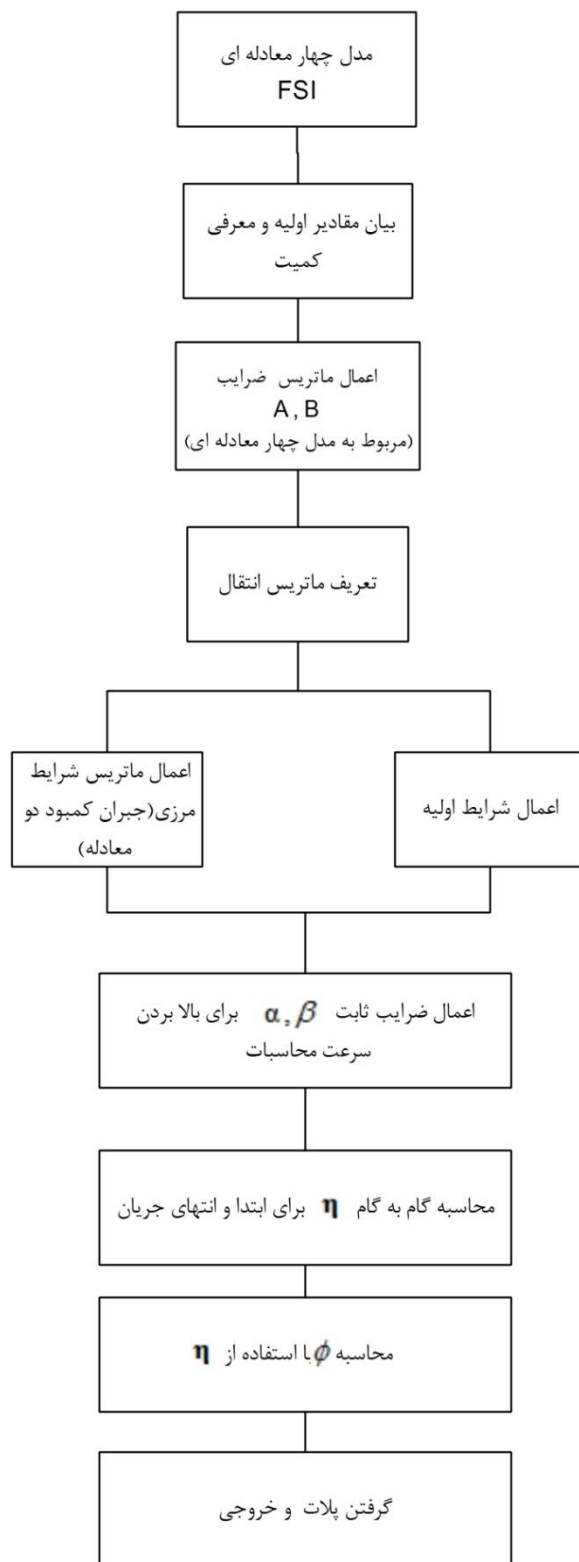
بندی پرداخته می‌شود. این چهار معادله عبارتند از دو معادله هیدرولیکی و یک معادله ارتعاش محوری

سازه. دو معادله هیدرولیکی شامل معادلات پیوستگی و مومنتم می‌باشند. از آنجاییکه معادله ارتعاش محوری سازه یک معادله مرتبه دوم است، بنابراین این معادله خود به دو معادله دیفرانسیل مرتبه اول تبدیل می‌شود. مدل چهار معادله‌ای عموماً برای لوله‌های مستقیم با حرکت محوری استفاده می‌شود. علاوه بر متغیرهای فشار و سرعت، تنش محوری و سرعت محوری دیواره لوله متغیرهای دیگری هستند که در این چهار معادله دیفرانسیل مرتبه اول وجود دارند. روند انجام محاسبات مدل چهار معادله‌ای، مطابق جدول ۴-۲ است.

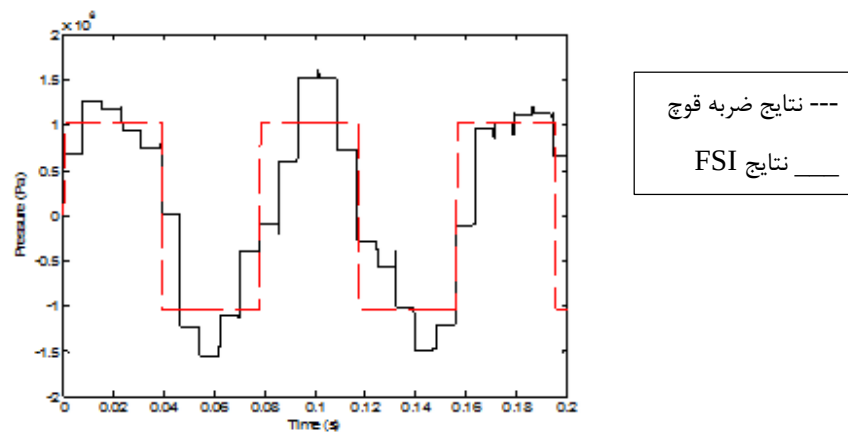
در تشریح اثر تداخلی می‌توان گفت که اساساً تغییر در سرعت سیال باعث ایجاد ضربه قوچ می‌گردد. این امر به نوبه خود باعث افزایش فشار و تغییر شکل سازه لوله می‌شود (در پژوهش حاضر بیشتر حرکت محوری مرز مد نظر است). میزان افزایش فشار و تغییر شکل مذکور به سختی سازه مربوط می‌شود. بعنوان مثال در سیستم‌های نرم، ضربه قوچ می‌تواند تغییر شکل بیشتری در سازه لوله و طبیعتاً افزایش فشار کمتری در پی داشته باشد.

با توجه به آنکه در آنالیز حاضر هدف بررسی اثر تداخلی پواسون به تنهایی می‌باشد لذا، شرایط مرزی مربوط به شیر و مخزن باید به گونه‌ای اعمال گردد که در این نقاط هیچگونه ارتعاشی وجود نداشته باشد.

جدول ۴-۲: روند انجام محاسبات مدل چهار معادله‌ای

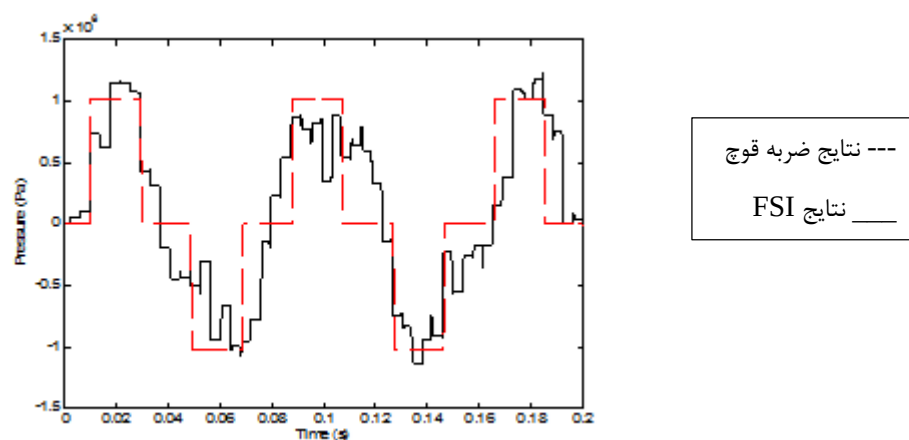


در این حالت تنها عامل ایجاد اثر FSI به نسبت پواسون مواد دیواره لوله که می‌توانند آزادانه در جهت محوری ارتعاش کنند مربوط می‌گردد. بدیهی است که در این حالت چنانچه نسبت پواسن صفر وارد گردد جواب‌های حاصله همان نتایج ضربه قوچ خواهند بود. برای درک بیشتر، نتایج مربوط به ضربه قوچ در محل شیر و در محل $Z=11/15$ به ترتیب در شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶ نشان داده شده است. جهت مقایسه‌ی دقیق تر، نتایج مربوط به FSI به روش MOC و بدون شبکه بندی در بازه‌ی زمانی کوچتری (۰/۱۹۵-۰/۱۸۵ ثانیه) مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل در شکل‌های ۴-۷ و ۴-۸ نشان داده شده است.

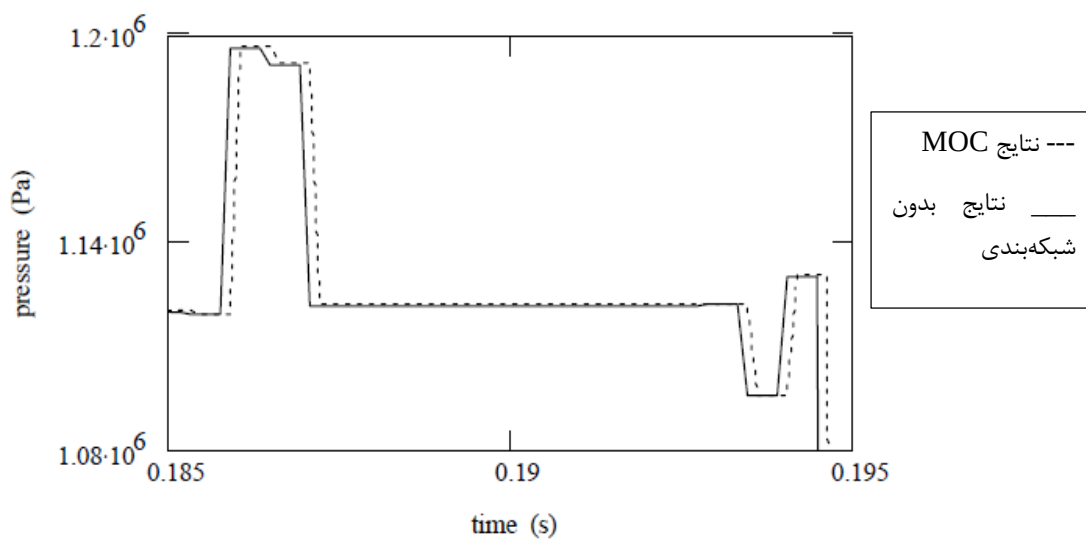


شکل ۴-۵: نتایج مربوط به توزیع فشار در محل شیر با در نظر گرفتن اثر تداخلی پواسون. (خطوط خط چین مربوط به

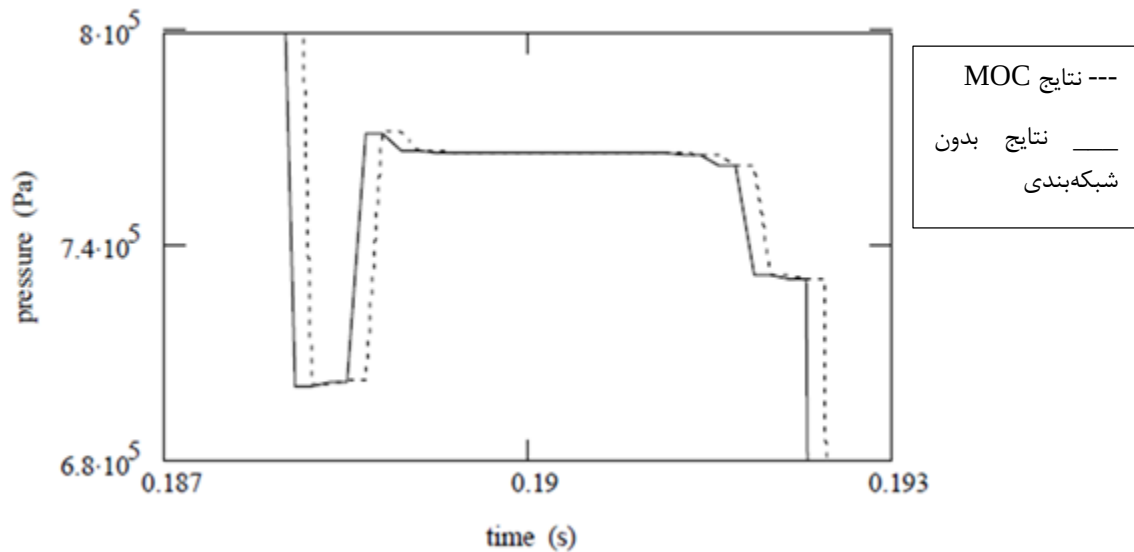
نتایج ضربه قوچ و خطوط ممتد مربوط به نتایج FSI به روش بدون شبکه‌بندی می‌باشند)



شکل ۴-۶: نتایج مربوط به توزیع فشار در محل $z=11/15$ با در نظر گرفتن اثر تداخلی پواسون (خطوط خط چین مربوط به نتایج ضربه قوچ و خطوط ممتد مربوط به نتایج FSI به روش بدون شبکه‌بندی می‌باشند)



شکل ۴-۷: نتایج مربوط به توزیع فشار در محل شیر با در نظر گرفتن اثر تداخلی پواسون در بازه زمانی $0.185 \leq t \leq 0.195$ ثانیه. (خطوط خط چین مربوط به نتایج روش MOC و خطوط ممتد مربوط به نتایج روش بدون شبکه‌بندی می‌باشند)



شکل ۴-۸: نتایج مربوط به توزیع فشار در محل $z=11/15$ با در نظر گرفتن اثر تداخلی پواسون در بازه زمانی

$0.185/0.195$ ثانیه. (خطوط خط چین مربوط به نتایج روش MOC و خطوط ممتد مربوط به نتایج روش بدون شبکه-

بندی می‌باشند)

۴-۶ صحت سنجی نتایج

در این بخش به مقایسه نتایج استخراج شده به روش بدون شبکه‌بندی با نتایج روش کلاسیک تداخل

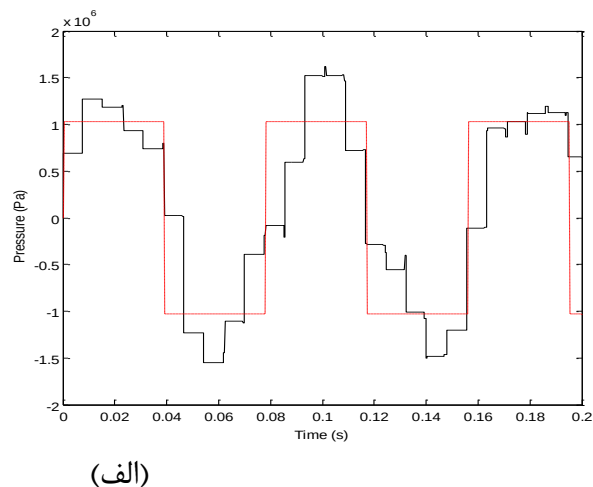
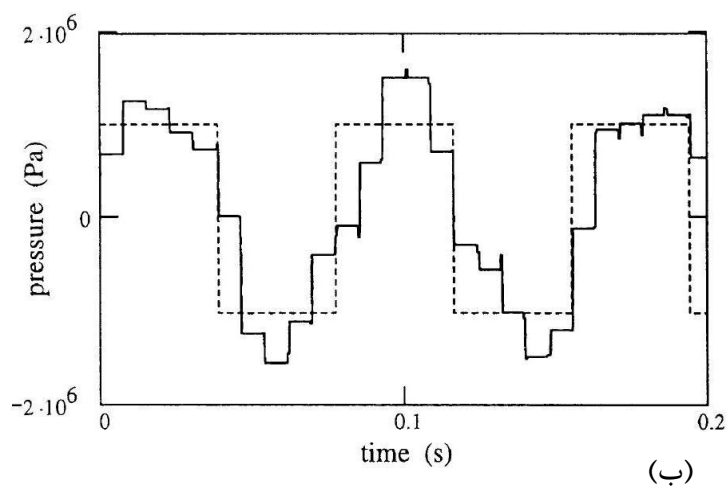
سیال-سازه (FSI) پرداخته می‌شود. اشکال ۴-۹ (الف) و ۴-۱۰ (الف) مربوط به نتایج استخراج شده به

روش بدون شبکه‌بندی و شکل‌های ۴-۹ (ب) و ۴-۱۰ (ب) مربوط به روش MOC می‌باشند. همانطور که

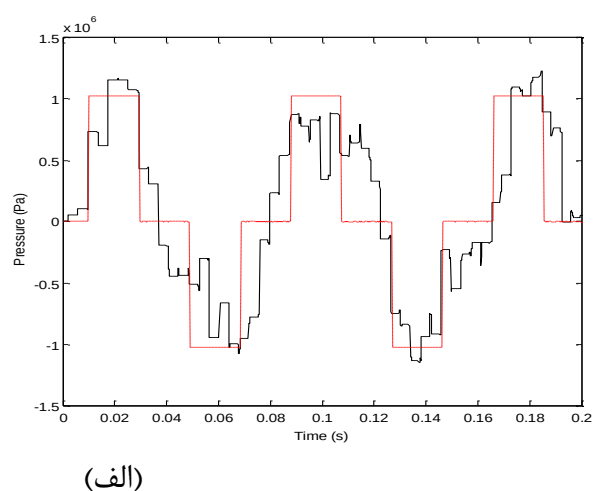
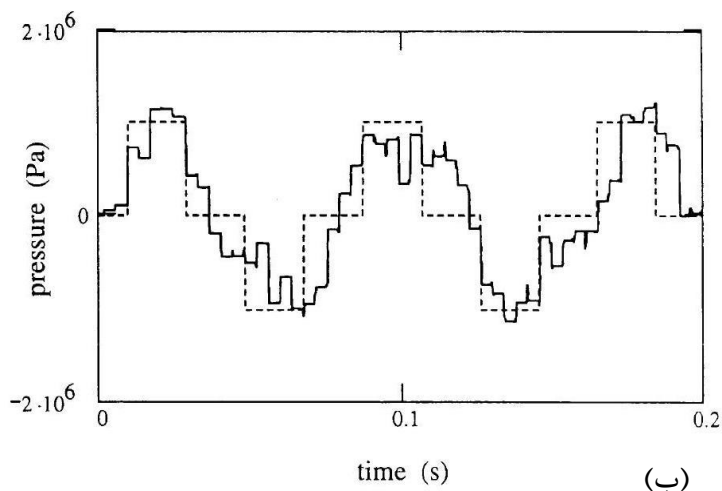
در شکل‌های ۴-۹ و ۴-۱۰ مشاهده می‌شود در هر دو حالت در محل شیر و همچنین در موقعیت مشخص

در لوله، نتایج استخراج شده از روش بدون شبکه‌بندی در مدل ضربه قوچ و در مدل FSI تطابق خوبی با

نتایج مرجع (Tisseling, 2003 ; Tisselin et al, 2007) دارند.



شکل ۴-۹: نتایج هد در حالت اثر تداخلی پواسون در محل شیر (نمودارهای خط چین مربوط به نتایج بدون در نظر گرفتن اثر تداخلی پواسون می‌باشند. شکل (الف) نتایج تحقیق حاضر و شکل (ب) نتایج برداشت شده از مرجع (Tisseling, 2003 ; Tisselin et al, 2007) است).



شکل ۴-۱۰: نتایج هد در حالت اثر تداخلی پواسون در محل $Z=11/15$ (نمودارهای خط چین مربوط به نتایج بدون در نظر گرفتن اثر تداخلی پواسون می‌باشند. شکل (الف) نتایج تحقیق حاضر و شکل (ب) نتایج برداشت شده از مرجع (Tisseling, 2003 ; Tisselin et al, 2007) است).

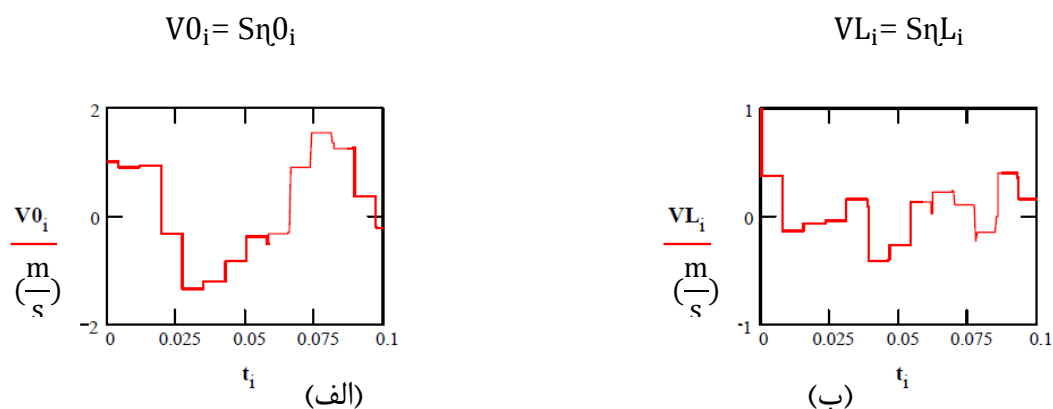
جدول ۳-۴: داده‌های مربوط به توزیع فشار در محل شیر توسط دو روش بدون شبکه‌بندی و روش MOC

زمان	روش بدون شبکه‌بندی $\times 10^{+6}$	روش MOC $\times 10^{+6}$	درصد خطای روش بدون شبکه‌بندی نسبت به روش MOC
۰/۰۲	۱/۱۱۲	۱/۲۳۱	$۱,۰۷۰ \times 10^{-5}$
۰/۰۴	۰/۶۴۱	۰/۶۶۹	$۴,۳۶۸ \times 10^{-6}$
۰/۰۶	-۱/۶۲۹	-۱/۶۴۷	$۱,۱۰۴ \times 10^{-6}$
۰/۰۸	-۰/۳۸۵	-۰/۴۰۳	$۴,۶۷۵ \times 10^{-6}$
۰/۱	۱/۵۰۲	۱/۵۲۱	$۱,۲۶۴ \times 10^{-6}$
۰/۱۲	-۰/۳۱۱	-۰/۳۳۲	$۶,۷۵۲ \times 10^{-6}$
۰/۱۴	-۱/۴۷۷	-۱/۴۹۸	$۱,۴۲۱ \times 10^{-6}$
۰/۱۶	-۰/۲۳۱	-۰/۲۵۱	$۸,۶۵۸ \times 10^{-6}$
۰/۱۸	۱/۱۰۸	۱/۲۱۱	$۹,۲۹۶ \times 10^{-6}$
۰/۲	۰/۵۶۱	۰/۵۹۹	$۶,۷۷۳ \times 10^{-6}$

۷-۴ نتایج مربوط به سرعت سیال، سرعت محوری و تنش در لوله

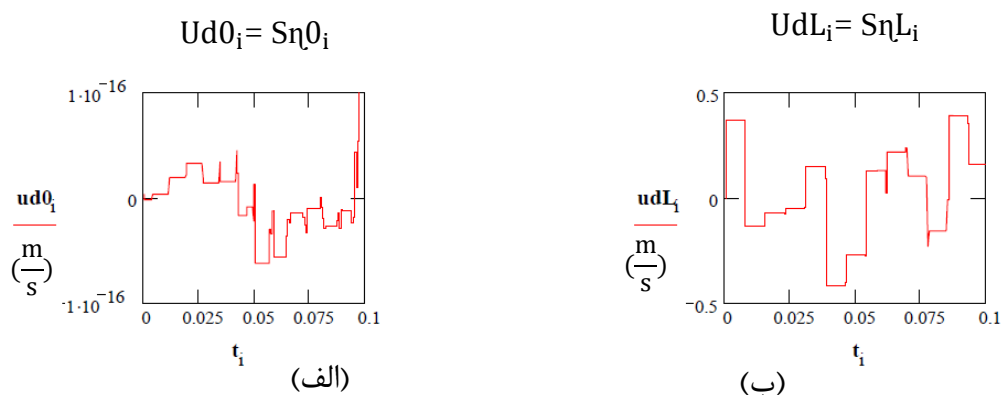
در این بخش نتایج مربوط به سرعت سیال، سرعت محوری (سرعت انتشار موج در دیواره لوله) و تنش در ابتدا و انتهای لوله مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شکل ۱۱-۴ نشان دهنده‌ی نتایج سرعت سیال در ابتدا و انتهای لوله است. همانطور که از نمودارها قابل مشاهده است در ابتدای لوله با بسته شدن شیر، سرعت سیال به صفر می‌رسد و سپس به دلیل موج برگشتی، سرعت کاهش پیدا می‌کند. پس از آن مقدار سرعت متاثر از امواج رفتی و برگشتی تغییر می‌کند. شکل ۱۲-۴ مربوط به نتایج سرعت انتشار موج در دیواره‌ی لوله، در ابتدا و انتهای آن است.



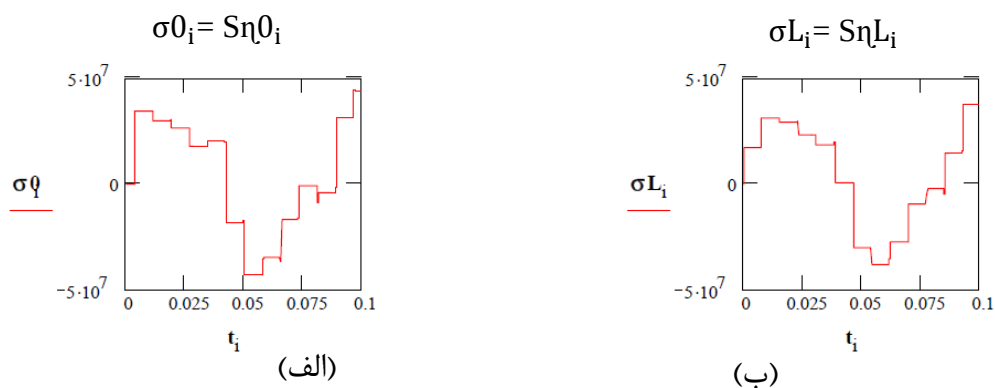
شکل ۱۱-۴: سرعت سیال (الف) ابتدای لوله (ب) انتهای لوله

همانطور که از نمودارها پیداست در ابتدای لوله سرعت انتشار موج در دیواره لوله بسیار کمتر از انتهای لوله، که در محل شیر است، می‌باشد. به دلیل موج برگشتی سرعت انتشار موج در دیواره لوله منفی می‌شود. نتایج مربوط به تنش در ابتدا و انتهای لوله در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲: سرعت انتشار موج در دیواره‌ی لوله (الف) ابتدای لوله (ب) انتهای لوله

با بسته شدن شیر تنش در ابتدا و انتهای لوله، ابتدا افزایش می‌یابد. سپس به دلیل موج برگشتی مقدار تنش کاهش پیدا کرده و با برگشت موج دوباره این تنش افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۴-۱۳: تنش در دیواره‌ی لوله (الف) ابتدای لوله (ب) انتهای لوله

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ مقدمه

در این فصل جهت بهبود و پیشرفت مسایل مربوط به ضربه قوچ و تداخل سیال و سازه در لوله‌ها، به بیان نتایج بدست آمده از این پژوهش پرداخته می‌شود. با توجه به آنکه هدف از این پژوهش بررسی عددی پدیده ضربه قوچ و تداخل سیال و سازه به روش دقیق بدون شبکه بندی است، ابتدا به بیان و بررسی نتایج حاصل از کد نویسی پرداخته می‌شود. در ادامه پیشنهاداتی جهت ادامه این موضوع مطرح می‌گردد.

۵-۲ نتایج بدست آمده از مدل سازی در برنامه

همانطور که در فصل‌های قبل به تفصیل بیان شد جهت انجام بررسی اندر کنش سیال و سازه از روش بدون شبکه استفاده شده است. جهت انجام این روش، ابتدا برنامه‌ای با توانایی مدل کردن این روش تهیه شد. در این برنامه با توجه به جزئیات ارائه شده در فصل سوم، به نوشتن کد برای اعمال روش بدون شبکه-بندی و حل معادلات پرداخته شد. بر این اساس در ادامه به بررسی نتایج حاصل از روش و حل معادلات دیفرانسیل مربوط به این پژوهش پرداخته می‌شود.

در این روش با استفاده از خطوط مشخصه که از پیش ترسیم شده است و با بکارگیری شرایط مرزی و شرایط اولیه و حرکت بر روی خطوط مشخصه در محل تقاطع امتداد نقاط مشخص بر روی خطوط مشخصه به یافتن مقادیر فشار پرداخته شد.

در استخراج نتایج، تنها اثر کوپله پواسون در نظر گرفته شده است. بدین معنا که شیر انتهایی لوله ثابت فرض می‌شود.

❖ با بررسی نتایج بدست آمده از برنامه بدون شبکه‌بندی در مدل دو معادله‌ای و همچنین مدل چهار معادله‌ای مشاهده می‌شود که این نتایج تطابق بسیاری با نتایج بدست آمده توسط سایر روش‌های کلاسیک دارد. این امر نشان‌دهنده‌ی توانایی بالای این برنامه جهت مدل سازی و حل عددی مساله ضربه قوچ و اندرکنش سیال -سازه در یک محیط فاقد مش‌بندی، با استفاده از روش ترسیمی است.

❖ در این روش هیچ‌گونه درون‌یابی در فواصل زمانی و مکانی مطابق با آنچه در روش‌های همراه با شبکه بندی وجود داشت مشاهده نمی‌شود و این نشان از دقت بالای این روش است.

❖ این متد از طریق بازگشتی موقعیت موج را در گذشته ردیابی می‌کند. روش مذکور را می‌توان بعنوان مرجع در مسائلی که از نقطه‌گذاری استفاده کرده‌اند بکار برد. همچنین از این روش می‌-

توان در بررسی نتایج عددی استفاده کرد و با هر بار حرکت بر روی خطوط مشخصه با استفاده از

شرایط اولیه و شرایط مرزی به یک مقدار در محل تقاطع خطوط ترسیمی رسیده می‌شود.

❖ با توجه به نتایج بدست آمده، این روش جایگزین مناسبی برای روش MOC کلاسیک است. چرا

که هم محدودیت‌های آن را ندارد و هم روشی دقیق و مناسب، بدون نیاز به درون یابی است که

خطای بسیار اندکی دارد.

۳-۵ پیشنهادات جهت ادامه کار

بدیهی است که مباحث پیرامون FSI درلوله‌های الاستیک همچنان از زمینه‌های بسیاری جهت تکمیل و

بهبود روش‌ها برخوردار است. پژوهش حاضر تنها گام کوچکی در این زمینه به شمار می‌رود. در زیر به

بیان برخی از این زمینه‌های تحقیق و بررسی می‌پردازیم:

➤ بررسی اندرکنش سیال و سازه در لوله‌های ویسکوالاستیک در شبکه‌ای از لوله‌ها به روش بدون

بدون مش

➤ در روش ارایه شده در این پژوهش، با هر بار حرکت بر روی خطوط مشخصه، از تقاطع خطوط

ترسیمی فقط مقدار در یک نقطه یافت می‌شود. حال برای ادامه این روش می‌توان به دنبال

روشی بود که با هر بار حرکت بر روی خطوط مشخصه مقادیر بیشتری یافت شود. به عبارتی با

هر بار حرکت بر روی خطوط مشخصه به یافتن مقادیر دو یا چند نقطه پرداخت.

➤ راه‌حل‌های استفاده شده در روش بدون شبکه‌بندی برای نقطه‌ی محاسباتی انتخاب شده در

صفحه‌ی زمان و مکان دقیق است اما هیچگونه اطلاعاتی در مورد مقادیر موجود بین نقاط انتخابی

ارائه نمی‌دهد. ارائه‌ی روشی که قادر به مرتفع ساختن این ضعف باشد بسیار کاربردی خواهد بود.

مراجع

- آزادی ح. احمدی ا. مجد ع. کرامت ع. ر، (۱۳۹۰)، "تحلیل دینامیکی شبکه‌های لوله توزیع سیال با در نظر گرفتن پدیده جدایی ستون مایع"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان
- احمدی ا. کرامت ع. ر، (۱۳۸۶)، "حل مساله مگنتوهیدرودینامیک در حالت پایدار با روش اجزای محدود"، سومین کنگره ملی مهندسی عمران، شاهرود
- احمدی ا. مجد ع، (۱۳۸۸)، "اعمال اثرات اصطکاک غیر ماندگار در مدل‌های جدایی ستون مایع"، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، شیراز
- اسدی نیازی م. خسروجردی ا، (۱۳۸۶)، "اثر ابعاد مخازن هوای تحت فشار در مهار فشارهای ماکزیمم و مینیمم ضربه قوچ"، نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر، کرمان
- اسدی نیازی م. کریم زادگان ر. شیری ج. جلیلی ل، (۱۳۹۱)، "اثر ابعاد مخازن هوای تحت فشار در مهار فشارهای ماکزیمم و مینیمم ضربه قوچ"، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ارومیه
- جعفری ع. گودرزی س، (۱۳۸۷)، "ارایه رابطه ای نوین برای محاسبه ضربه قوچ در خط لوله ای با شیر قطع کن در پایین دست"، ششمین کنفرانس سالانه دانشجویی مهندسی مکانیک، تهران
- خسروی راد س. احمدی ا. مجد ع، (۱۳۹۲)، "مدلسازی پدیده جدایی ستون مایع با استفاده از مدل وجه مشترک کاویتاسیون بخاری تعمیم یافته (GIVCM)"، همایش ملی مهندسی عمران کاربردی و دستاوردهای نوین، کرج
- خلیقی ف، (۱۳۹۴)، پایان نامه ارشد: "بررسی عددی پدیده ضربه قوچ در شبکه لوله ها با استفاده از الگوریتم شمیاین"، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود،
- زنگانه ر، (۱۳۹۲)، پایان نامه ارشد: "تاثیر تکیه گاه ویسکوالاستیک بر اندرکنش سیال- سازه در پدیده ضربه قوچ"، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود،
- سلیمانی ع، (۱۳۸۷)، "آنالیز حساسیت حداکثر ضربه قوچ در طرح پمپاژ رودخانه کوه‌رنگ به چشمه مروارید با استفاده از نرم افزار Hammer"، هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران

کریمی دونا م. ح. صادقی م. امیری م. م. (۱۳۹۲)، "ارائه یک مدل جدید در حل مساله ضربه قوچی با استفاده از روش بار متحرک و اجزای محدود"، سومین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات، انجمن آکوستیک و ارتعاشات ایران

مرتضوی نیا ز. امداد ه. گشتاسبی راد ا. (۱۳۸۸)، "بررسی تداخل سازه- سیال در لوله های حاوی جریان با شرط مرزی نوسانی، دومین کنفرانس لوله و صنایع وابسته"، موسسه اطلاع رسانی نفت، گاز و پتروشیمی، تهران

معصومی نیا م. احمدی ا. (۱۳۹۲)، "بررسی اندرکنش سیال- سازه در شبکه لوله ها با استفاده از روش گودونو غیر خطی"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان

میرزاده ا. عادل جعفری ع. (۱۳۸۹)، "ارائه رابطه ای نوین برای محاسبه ضربه قوچ در خط لوله ای با شیر قطع کن در پایین دست"، سومین همایش مقاوم سازی و مدیریت شهری، خمین

نظری ر. بارانی غ. ع. (۱۳۹۲)، "اندرکنش سیال- سازه در سیستم لوله در حوزه فرکانس"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان

هاشمی نژاد س. م. عوض محمدی ر. (۱۳۸۲)، "پاسخ دینامیکی لوله های ویسکوالاستیک مدفون در محیط الاستیک به یک موج زلزله ای تخت"، ششمین کنفرانس تونل ایران، تهران

Bergeron L. (1936) "Etude des coups de beler dans les conduits, nouvel exose' de la method graphique" **La Technique Moderne.**, 28, pp 33–75.

Brinson H. F. Brinson L. C. (2008), "**Polymer engineering science and viscoelasticity, an introduction**", 2, Springer, US.

Bürmann W. (1975) "Water Hammer in Coaxial Pipe Systems" **ASCE J. Hydraul. Div.**, 101, pp 699-715.

Chaudhry M. H. (1987), "**Applied Hydraulic Transients**", 2, Van Nostrand Reinhold Co, New York.

Heinsbroek A. G. T. J. Tijsseling A. S., (1994) "The influence of support rigidity on waterhammer pressures and pipe stresses", Proc. of the Second Int. Conf. on Water Pipeline Systems, P 17-30, Edinburgh, UK

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, 47, pp 221-224 (in French). (English translation by A. Anderson (1976).)

Skalak R. (1956), "**An extension of the theory of water hammer**", Trans. ASME, 78, pp 105–116.

- Tijsseling A. S. (2002), “**Exact solution of the FSI four-equation model**”, Eindhoven University of Technology, Netherlands.
- Tijsseling A. S. (2003) “Exact Solution of Linear Hyperbolic Four-Equation Systems in Axial Liquid-Pipe Vibration” **J. FLUID STRUCT.**, **18**, pp **179-196**.
- Tijsseling A.S. (2003) “Exact solution of linear hyperbolic four-equation system in axial liquid-pipe vibration” *Journal of Fluids and Structures.*, **18**, **2**, pp **179-196**.
- Tisslenig A. S. Bergant A. (2007), “**Meshless computation of water hammer**” Department of mathematics and computer science, University of technology, Netherlands.
- Wiggert D. C. Tijsseling A. S. (2001) “Fluid transients and fluid-structure interaction in flexible liquid-filled piping” **Appl. Mech. Rev.**, **54**, pp **455-481**.
- Wiggert D. C., (1986) “Coupled transient flow and structural motion in liquid-filled piping systems: a survey”, In *Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, Chicago, U.S.A
- Wiggert D.C. Tijsseling A. S. (2001) “Fluid transients and fluid-structure interaction in flexible liquid-filled piping” **Appl. Mech. Rev.**, **54**, pp **455-481**.
- Wineman A. S. Rajagopal K. R. (2000), “**Mechanical response of polymers: an introduction**”, Cambridge University Press, UK.

پیوست شماره ۱

function All

% % % meshless water hammer

% % % single pipe, no friction, non-instantaneous valve closure

% % % Input Data:

global dt t_epsilon etaIC1 etaIC2 alfa_12 beta_11 q_t L dtref alfa_21 beta_22

n

t_epsilon=1e-15;

f=0;

g=9.81;

L=20;

R=0.3985;

ee=0.008;

E=210*10^9;

K=2.1*10^9;

K_star=(1/K+(2*R)/(E*ee))^-1;

ro=1000;

Tc=0.0;

A=pi*R^2;

Q0=0.5;

V0=Q0/A;

c=sqrt(K_star/ro);

dtref=L/c;

TT=6*dtref;

dt=0.1*dtref;

% dt=0.002;

% % % Matrices of coefficients

% a=[1 0;0 vpa(K_star^-1)];

a=[1 0;0 K_star^-1];

b=[0 ro^-1;1 0];

landa1=c;

```

landa2=-c;
T=[1 landa1;1 landa2];
% Transformation Matrix S
% format long
S=inv(T*a);
S_mins=inv(S);

% % % Constant initial conditions
kesai_0=0.2;
P0=1/2*(kesai_0*ro*V0*(abs(V0)));
Pa=1;
Fi_ic=[V0;P0/Pa];
% Eta_ic= inv (S)*Fi_ic;
Eta_ic= S\Fi_ic;

nt=ceil(TT/dt)*100/60;
nz=2;
eta=zeros(2,nz,nt);
fi=zeros(2,nz,nt);
V=zeros(nz,nt);
P=zeros(nz,nt);
% B.Cs
V(nz,:)=0;
P(1,:)=P0/Pa;
% ICs
V(:,1)=V0;
P(:,1)=P0/Pa;

fi(1,.,:)=V;
fi(2,.,:)=P;

% eta(1:2,.,:)=inv (S)*fi(1:2,.,:);

invS=inv(S);
for n=1:nt % change nt to 1
    for i=1:nz
        eta(:,i,n)=S\fi(:,i,n);
    end
end

```

```

end
% eta=inv(S)*fi;
% eta=S\fi;
etaIC1=eta(1,1,1);
etaIC2=eta(2,1,1);

% % % Boundary conditions matrices
D_t=[0 1;1 0];
% Excitation vector
q_t=[P0/Pa;0];
DS=D_t*S; %#ok<MINV>

%%% Coefficients alfa and beta
% Z=11.12
alfa_12=-DS(1,2)/DS(1,1);
beta_11=1/DS(1,1);
% Z=11.12
alfa_21=-DS(2,1)/DS(2,2);
beta_22=1/DS(2,2);

%%% Constant coefficients alfa and beta to speed up the calculation
% Z=11.12
alfa_12c=alfa_12;
beta_11c=beta_11;
% Z=11.12
alfa_21c=alfa_21;
beta_22c=beta_22;

%%% Recursion " coast to coast "
E_psi=10^-15;
EE_psi=10^-15;

for n=1:nt
    t=(n)*dt;
    eta12=Boundary(0,t);
    eta(1,1,n+1)=eta12(1);

```

```

    eta(2,1,n+1)=eta12(2);

    eta12=Boundary(L,t);
    eta(1,2,n+1)=eta12(1);
    eta(2,2,n+1)=eta12(2);

end

for n=1:nt
    for i=1:nz
        fi(:,i,n)=S*eta(:,i,n);
    end
end

%
% V=fi(1,:,:);
% P=fi(2,:,:);

V=reshape(fi(1,:,:),size(fi,2),size(fi,3));
P=reshape(fi(2,:,:),size(fi,2),size(fi,3));
hold on
%plot(dt*(0:nt-1),V(1,:),'DisplayName','V at Res.')
% plot(V(end,:))
% plot(P(1,:))
plot(dt*(0:nt-1),P(end,:), 'DisplayName','P at Val.')

function [eta12]=Boundary(z,t)
global dt t_epsilon etaIC1 etaIC2 alfa_12 beta_11 q_t L dtref alfa_21 beta_22
n

% if t<t_epsilon
if t<=t_epsilon

%   eta12=[etaIC1 etaIC2];
    eta12(1)=etaIC1;
    eta12(2)=etaIC2;
else %t=>t_epsilon

```



```

if z==0
eta12=Boundary(L,t-dtref);
eta12(2)=eta12(2);
eta12(1)=alfa_12*eta12(2)+beta_11*q_t(1);

elseif z==L
eta12=Boundary(0,t-dtref); % recursion
eta12(1)=eta12(1);
% eta(2,2,n+1)=alfa_21*Eta_ic(1)+beta_22*q_t(2); % BC relation
eta12(2)=alfa_21*eta12(1)+beta_22*q_t(2); % BC relation
else
    'interior points must be called'
end

end

```

Abstract

The decreasing and increasing velocity of flowing fluid in the closed path, causes the waterhammer phenomena. Pipe deformation caused by forces deriving from water hammer leads to fluid-structure interaction (FSI) phenomenon.

Various numerical methods has been applied to solve the FSI equations including finite difference methods, finite volume, finite elements or combination of these methods. Characteristics method and Goduno method are count as successful methods in this field. In characteristics method, time and space steps should be proportional to each other. Therefore, time steps should be determined according to the dimensions of the case. Hence, to determine the time steps in characteristics method interpolation should be carried out. Due to using the Reyman problem, Goduno method, is a time consuming of solving method. In this study, meshless method, which is count as an effective method for solving equations, has been applied. Pressure distribution plot, velocity distribution, wave diffusion velocity plot at pipe and consequent stress at pipe in the beginning and end of the system including reservoir, pipe and valve have been investigated. Its results verified by results of the characteristics method. Results has shown that the meshless results are in good fit with the results of characteristics method.

Keywords: waterhammer, fluide- structure interaction, meshless method.



Shahrood University of technology
Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Water Engineering and Hydraulic Structures

Title

Analysis of fluid- structure interaction by meshless method in elastic pipes

By:

Navid Eyn Afshar

Supervisors:

Dr. A. Ahmadi

Dr. A. R Keramat

February 2017