

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه مهندسی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی

بررسی اثرات تکیه گاه های مختلف ویسکوالاستیک بر
اندرکنش سیال - سازه در پدیده ضربه قوچ با به کار
گیری روش کاملا مشخصه (full MOC)

نگارنده: راحیل سادات حسینی

استاد راهنما:

دکتر احمد احمدی

استاد مشاور:

روح اله زنگانه

شهریور ۹۷

شماره ثبت: ۹۴۰۵۹۳۴
تاریخ: ۲۱/۰۶/۹۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم راحیل سادات حسینی با شماره دانشجویی ۹۴۰۵۹۳۴ رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی تحت عنوان بررسی اثرات تکیه گاه های مختلف ویسکو الاستیک بر اندرکنش سیال - سازه در پدیده ضربه قوچ با به کار گیری روش کاملا مشخصه (full MOC) که در تاریخ ۱۳۹۷/۶/۱۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: ...): مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر احمد احمدی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	-	-	-
۳- استاد مشاور	روح اله زنگانه	-	-
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گلی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر امیر عباس عابدینی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر مهدی عجمی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر رضا نادری



تعمیر: در صورتی که کس از اعضای هیأت داوران، به جهت مشکلات مجامع تحصیلی می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود)

تشکر و قدردانی

هر نفسی که فرو میرود ممد حیات است و چون برون میآید مفرح ذات، پس در هر نفس دو نعمت موجود است و بر هر نعمت شکری واجب.

اول خدای را سپاس که لطف و بخشایش او نصیب این بنده حقیر گشت تا بتوانم این مجموعه را به تحریر در آورم.

سپس قبل از هر چیز، بر خود لازم می دانم تا از استاد راهنمای ارجمندم، جناب آقای دکتر احمد احمدی، به خاطر حمایت‌های پیوسته، آموزش‌ها و رهنمودهای ارزشمند، تشویق‌ها و دلگرمی‌هایشان در تمام مدت انجام این پژوهش و همچنین استاد مشاور ارجمندم جناب آقای مهندس روح اله زنگانه به خاطر آموزش‌ها و راهنمایی‌های ارزشمندشان تقدیر و تشکر ویژه‌ای نمایم. همچنین، از پدر، مادر، خواهرم، که همواره حامی و مشوق بنده بودند، تشکر مینمایم.

تعهد نامه

اینجانب، راحیل سادات حسینی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-کرایش آب و سازه های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی اثرات تکیه گاه های مختلف ویسکوالاستیک بر اندرکنش سیال - سازه در پدیده ضربه قوچ با به کار گیری روش کاملاً مشخصه (full MOC) 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 افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

مباحث تداخلی سیال-سازه و اثرات ضربه‌قوچ در سیستم‌های لوله همواره مورد توجه بوده است. چراکه این اثرات به صورت ایجاد ارتعاش و افزایش در هدهای فشار و جابه‌جایی‌های دیواره لوله مشاهده می‌شود. با توجه به خواص مواد ویسکوالاستیک در میرایی و اثرات اصطکاک در استهلاک انرژی، هدف از انجام این تحقیق، مدلسازی تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک با مکانیزم تغییرشکل محوری و برشی ناشی از نیروهای (افقی) وارد بر تکیه‌گاه‌ها و همچنین تاثیر اصطکاک در تکیه‌گاه‌ها با رویکرد تکیه‌گاه‌های لغزشی ویسکوالاستیک، جهت بررسی اثرات آن‌ها بر FSI در هنگام وقوع پدیده ضربه‌قوچ در سیستم‌های مستقیم خط لوله (از جنس الاستیک و ویسکوالاستیک) می‌باشد.

در این پایان‌نامه جهت مدلسازی اثرات اندرکنش سیال-سازه، دو مکانیزم کوپله پواسن و اتصال، در نظر گرفته می‌شود. رفتار ویسکوالاستیسیته دیواره لوله و تکیه‌گاه‌ها با مدل مکانیکی کلونین-ویت تعمیم یافته توصیف می‌شود. تکیه‌گاه‌های اصطکاکی، از طریق انتقال بین حالت چسبندگی و لغزش مدلسازی می‌شود. با ارائه شرایط مرزی جهت مدلسازی انواع مختلف تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک در محل شیر و در طول لوله، معادلات حاکم با روش full MOC در حوزه زمان حل می‌گردند.

بررسی‌ها نشان داد، بکارگیری تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک ساده (مکانیزم تغییرشکل محوری و برشی) با مشخصات و تعداد مناسب در میرایی ارتعاشات هد فشار و جابه‌جایی دیواره لوله ناشی از FSI موثر می‌باشد، و اثرات اصطکاک ناشی از لغزش تکیه‌گاه‌ها (در تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک لغزشی)، وابسته به مقدار نیروی اصطکاک می‌باشد، بطوریکه در سیکل‌های ابتدایی با کاهش نیروی اصطکاک، نتایج (هد فشار و جابه‌جایی) به حالت خط لوله آزاد و با افزایش آن به حالت خط لوله با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک ساده (مکانیزم برشی) نزدیک می‌شود. با ایجاد مقدار نیروی اصطکاک مناسب در تکیه‌گاه ویسکوالاستیک، با گذشت زمان، کاهش و میرایی در ارتعاشات هد فشار و جابه‌جایی دیواره لوله و میرایی در مقادیر هد فشار نسبت به حالت استفاده از تکیه‌گاه ویسکوالاستیک ساده بخصوص در لوله‌های الاستیک مشاهده گردید.

کلمات کلیدی: اندرکنش سیال- سازه، تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک، ضربه‌قوچ، تکیه‌گاه‌های

اصطکاکی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- حسینی، راحیل سادات، احمدی، احمد و زنگانه، روح اله، (۱۳۹۷)، مدلسازی رفتار تکیه‌گاه-های ویسکوالاستیک در پدیده ضربه قوچ با استفاده از روش کاملاً مشخصه (full MOC)، یازدهمین کنگره بین المللی عمران، دانشگاه تهران

فهرست عناوین

عنوان	صفحه
۱- فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- پدیده ضربه قوچ (چکش آبی).....	۲
۲-۱- هدف انجام تحقیق.....	۵
۳-۱- فرضیات پایان نامه.....	۶
۴-۱- فصل بندی پایان نامه.....	۸
۲- فصل دوم: مطالعات پیشین.....	۱۱
۱-۲- مطالعات پیرامون تئوری‌ها اندرکنش سیال و سازه [زنگانه، ۱۳۹۲ و کرامت، ۱۳۸۹].....	۱۲
۲-۲- آنالیزها و روش‌های عددی اندرکنش سیال و سازه [جزایری، ۱۳۸۳ و کرامت، ۱۳۸۴].....	۱۵
۳-۲- مطالعات انجام شده پیرامون تکیه گاه ویسکو الاستیک.....	۲۰
۴-۲- مطالعات انجام شده پیرامون تکیه گاه اصطکاکی.....	۲۲
۳- فصل سوم: مدل ریاضی.....	۲۵
۱-۳- اندرکنش سیال و سازه در لوله‌ها.....	۲۶
۳-۱-۱- طبقه بندی انواع مدلسازی های کوپله.....	۲۶
۳-۱-۲- انواع مکانیزم اثرات کوپله.....	۲۸
۳-۱-۲-۱- اثر تداخلی پواسن.....	۲۸
۳-۱-۲-۲- اثر تداخلی اتصال.....	۲۸
۳-۱-۲-۳- اثر تداخلی اصطکاک سیال با جداره لوله.....	۲۹
۳-۲- رفتار مواد ویسکو الاستیک.....	۲۹
۳-۳- اصطکاک خشک.....	۳۲
۳-۴- معادلات حاکم.....	۳۴
۳-۴-۱- مدل های مکانیکی مواد ویسکو الاستیک.....	۳۴
۳-۴-۲- معادلات ساختاری برای پاسخ یک بعدی مواد ویسکو الاستیک.....	۳۷
۳-۴-۲-۱- پارامترهای توابع خزش تطابقی و رهاسازی تنش و رابطه ی بین آن دو تابع [زنگانه، ۱۳۹۲].....	۴۵
۳-۴-۲-۲- روابط تنش - کرنش ویسکو الاستیک در حالت سه بعدی.....	۴۷

- ۴۸.....[Wineman and Rajagopal, 2000] پاسخ برشی مصالح ویسکوالاستیک ۳-۲-۴-۳
- ۴۹..... اثر مواد ویسکوالاستیک لوله و تکیه گاه بر تداخل سیال-سازه [زنگانه، ۱۳۹۲] ۴-۲-۴-۳
- ۴۹..... رابطه نیروی اصطکاک ۳-۴-۳
- ۵۰..... اثر اصطکاک تکیه‌گاه بر تداخل سیال-سازه ۱-۳-۴-۳
- ۵۱..... معادلات جریان گذرا در لوله الاستیک و ویسکوالاستیک ۴-۴-۳
- ۵۲..... معادله پیوستگی ۱-۴-۴-۳
- ۵۳..... معادله مومنتوم ۲-۴-۴-۳
- ۵۴..... معادله ارتعاش محوری ۵-۴-۳
- ۵۸..... ۵-شرایط اولیه ۵-۳-۴-۳
- ۶۰..... ۶-شرایط مرزی ۶-۳-۴-۳
- ۶۰..... شرط مرزی مخزن ۱-۶-۳
- ۶۰..... شرایط مرزی شیر ۲-۶-۳
- ۶۱..... شرایط مرزی تکیه‌گاه ویسکوالاستیک ۳-۶-۳
- ۶۲..... شرایط مرزی تکیه‌گاه میانی ویسکوالاستیک ساده (مکانیزم تغییر شکل محوری و برشی) ۱-۳-۶-۳
- ۶۴..... شرایط مرزی تکیه‌گاه میانی ویسکوالاستیک لغزشی اصطکاکی ۲-۳-۶-۳
- ۶۷..... شرایط مرزی تکیه‌گاه مرزی ویسکوالاستیک ۳-۳-۶-۳
- ۶۹..... فصل چهارم: حل عددی ۴-۳-۴-۳
- ۷۰..... ۱-مقدمه ۱-۴-۳
- ۷۱..... ۲-تقریب عددی ترم‌های انتگرال کانولوشن ۲-۴-۳
- ۷۴..... ۳-حل عددی با روش کاملاً مشخصه ۳-۴-۳
- ۸۰..... ۴-شبکه مشبندی ۴-۴-۳
- ۸۰..... شبکه موج فشاری ۱-۴-۴
- ۸۱..... شبکه موج تنشی ۲-۴-۴
- ۸۳..... ۵-پایه سازی شرایط مرزی ۵-۴-۳
- ۸۴..... شرط مرزی تکیه‌گاه ۱-۵-۴
- ۸۶..... رابطه بین سرعت و جابه‌جایی ۱-۱-۵-۴
- ۸۷..... ۶-الگوریتم در حل عددی ۶-۳-۴-۳

۵- فصل پنجم: صحت سنجی و ارائه نتایج.....	۸۹
۵-۱- مقدمه.....	۹۰
۵-۲- صحت سنجی.....	۹۱
۵-۲-۱- ارائه نتایج مرجع [Zanganeh et.al, 2015] (تاثیر تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن تغییر شکل محوری آن) با به کارگیری روش (full MOC).....	۹۱
۵-۲-۱-۱- لوله الاستیک با تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل محوری).....	۹۴
۵-۲-۱-۲- لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل محوری).....	۹۷
۵-۲-۲- نتایج تاثیر تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی آن و بکارگیری روش (full MOC).....	۹۹
۵-۲-۲-۱- لوله الاستیک با تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی.....	۱۰۰
۵-۲-۲-۲- لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی.....	۱۰۳
۵-۲-۳- نتایج تاثیر تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک اصطکاکی (لغزشی) با به کارگیری روش (full MOC).....	۱۰۶
۵-۲-۳-۱- لوله الاستیک با تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی.....	۱۰۸
۵-۲-۳-۲- لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی.....	۱۱۳
۶- فصل ششم: خلاصه، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات.....	۱۱۹
۶-۱- خلاصه.....	۱۲۰
۶-۲- نتیجه‌گیری.....	۱۲۱
۶-۲-۱- اثرات محوری تکیه‌گاه ویسکوالاستیک در پدیده ضربه قوچ با به کارگیری روش (full MOC).....	۱۲۱
۶-۲-۲- اثرات برشی تکیه‌گاه ویسکوالاستیک در پدیده ضربه قوچ با به کارگیری روش (full MOC).....	۱۲۲
۶-۲-۳- اثرات تکیه‌گاه ویسکوالاستیک لغزشی (اصطکاکی) در پدیده ضربه قوچ با به کارگیری روش (full MOC).....	۱۲۳
۶-۲-۴- پیشنهادات برای ادامه کار.....	۱۲۴
۷- مراجع.....	۱۲۷

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ اثرات ناشی از پدیده ضربه قوچ در لوله، در یک سیکل بعد از بسته شدن ناگهانی شیر [زنگانه، ۱۳۹۲].....	۴
شکل ۱-۲، تغییرات فشار با زمان در پشت شیر، الف) بدون اصطکاک، ب) با در نظر گرفتن اصطکاک (بین سیال و لوله).....	۴
شکل ۱-۳، پاسخ مکانیکی ماده ویسکوالاستیک در، الف) تست خزش و ب) تست رهاسازی [زنگانه، ۱۳۹۲].....	۳۱
شکل ۲-۳ شکل شماتیک تکیه‌گاه لغزشی.....	۳۳
شکل ۳-۳ مدل مکانیکی، الف: (ماکسول)، ب: (کلوین-ویت).....	۳۵
شکل ۳-۴ الف: مدل مکانیکی تعمیم یافته ماکسول، ب: مدل مکانیکی تعمیم یافته کلوین ویت.....	۳۷
شکل ۳-۵ طرح نشان دهنده متغیرهای تعریف شده در توصیف تنش بر دیواره لوله، نمای جانبی [Tijsseling 1993] $(z - r)$	۵۶
شکل ۳-۶ سیستم مخزن-لوله-شیر، به همراه تکیه‌گاه ویسکوالاستیک در محل شیر و در طول لوله.....	۶۲
شکل ۳-۷ طرحی شماتیک تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری).....	۶۳
شکل ۳-۸ شکل شماتیک تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی).....	۶۴
شکل ۳-۹ شکل شماتیک تکیه‌گاه اصطکاکی ویسکوالاستیک.....	۶۵
شکل ۴-۱ جزئیات شبکه بر اساس سرعت موج فشاری.....	۸۰
شکل ۴-۲ جزئیات شبکه بر اساس سرعت موج تنشی.....	۸۲
شکل ۴-۳ جزئیات شبکه و خطوط مشخصه در مرزها.....	۸۴
شکل ۵-۱ تاریخچه هد فشار در گره شیر در لوله الاستیک با تکیه‌گاه های ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل محوری) و هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC: شبکه مش بر اساس موج فشار (خط چین آبی تیره)، شبکه مش بر اساس موج تنش (آبی روشن)، با روش MOC-FEM (خط مشکی) و بدون تکیه‌گاه و با هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشار (خط قرمز)، با روش MOC-FEM (نقطه چین سبز).....	۹۴
شکل ۵-۲ تاریخچه هد فشار در گره میانی در لوله الاستیک با تکیه‌گاه های ویسکوالاستیک (مکانیزم محوری) و هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC: شبکه مش بر اساس موج فشار (خط چین آبی تیره)، شبکه مش بر اساس موج تنش (آبی روشن)، با روش MOC-FEM (خط مشکی) و بدون تکیه‌گاه و با هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشار (خط قرمز)، با روش MOC-FEM (نقطه چین سبز).....	۹۵

شکل ۳-۵ تاریخچه جابه‌جایی در الف: گره شیر و ب: در گره میانی در لوله الاستیک با تکیه‌گاه های ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل محوری) و هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC: شبکه مش بر اساس موج فشار (خط چین آبی تیره)، شبکه مش بر اساس موج تنش (آبی روشن)، با روش MOC-FEM (خط مشکی) و بدون تکیه‌گاه و با هر دو کوپله اتصال و پواسن ، با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشار (خط قرمز)، با روش MOC-FEM (نقطه‌چین سبز)..... ۹۶

شکل ۴-۵ تاریخچه هد فشاری در الف: گره شیر و ب: در گره میانی در لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه های ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل محوری) و هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC: شبکه مش بر اساس موج فشار (خط چین آبی تیره)، شبکه مش بر اساس موج تنش (آبی روشن)، با روش MOC-FEM (خط مشکی) و بدون تکیه‌گاه و با هر دو کوپله اتصال و پواسن ، با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشار (خط قرمز)، با روش MOC-FEM (نقطه‌چین سبز)..... ۹۷

شکل ۵-۵ تاریخچه جابه‌جایی در الف: در گره شیر و ب: در گره میانی در لوله الاستیک با تکیه‌گاه های ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل محوری) و هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC: شبکه مش بر اساس موج فشار (خط چین آبی تیره)، شبکه مش بر اساس موج تنش (آبی روشن)، با روش MOC-FEM (خط مشکی) و بدون تکیه‌گاه و با هر دو کوپله اتصال و پواسن ، با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشار (خط قرمز)، با روش MOC-FEM (نقطه‌چین سبز)..... ۹۸

شکل ۶-۵ تاریخچه هد فشار در گره شیر در لوله الاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش)..... ۱۰۰

شکل ۷-۵ تاریخچه هد فشار در گره میانی در لوله الاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش)..... ۱۰۱

شکل ۸-۵ الف: تاریخچه جابه‌جایی دیواره لوله الف) در گره شیر، ب) در گره میانی در لوله الاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش)..... ۱۰۱

شکل ۹-۵ تاریخچه تنش در دیواره لوله الف) در گره شیر، ب) در گره میانی در لوله الاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش)..... ۱۰۲

شکل ۱۰-۵ نتایج تاریخچه تنش در محل تکیه‌گاه‌ها، الف) در محل شیر، ب) $z_2 = 110.8$ (ج) $z_3 = 166.2$ (د) $z_4 = 221.6$ در لوله الاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس

شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش) ۱۰۲

شکل ۵-۱۱: تاریخچه هد فشار الف: در گره شیر و ب: در گره میانی در لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش) ۱۰۴

شکل ۵-۱۲: تاریخچه جابه‌جایی دیواره لوله الف: در گره شیر و ب: در گره میانی در لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش) ۱۰۴

شکل ۵-۱۳: تاریخچه تنش الف) در دیواره لوله در گره شیر، ب) در گره میانی در لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش) ۱۰۵

شکل ۵-۱۴: نتایج تاریخچه تنش در محل تکیه‌گاه‌ها، الف) در محل شیر، ب) $z_2 = 110.8$ (ج) $z_3 = 166.2$ (د) $z_4 = 221.6$ در لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش) ۱۰۵

شکل ۵-۱۵: تاریخچه هد فشار در گره میانی لوله الاستیک با دو کوپله اتصال و پواسن و با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشاری: برای حالت تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی (V-F) با مقادیر مختلف نیروی اصطکاک، حالت ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل برشی)، حالت آزاد ۱۰۹

شکل ۵-۱۶: تاریخچه هد فشار در گره شیر در لوله الاستیک با دو کوپله اتصال و پواسن و با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشاری: برای حالت تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی (V-F) با مقادیر مختلف نیروی اصطکاک، حالت ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل برشی)، حالت آزاد ۱۱۰

شکل ۵-۱۷: تاریخچه جابه‌جایی دیواره لوله الاستیک الف) در گره شیر و ب) در گره میانی با دو کوپله اتصال و پواسن و با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشاری: برای حالت تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی (V-F) با مقادیر مختلف نیروی اصطکاک، حالت ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل برشی)، حالت آزاد ۱۱۰

شکل ۵-۱۸: تاریخچه هد فشار الف) در گره شیر و ب) در گره میانی لوله الاستیک با دو کوپله اتصال و پواسن و با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشاری: برای حالت تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی (V-F) با مقادیر مختلف نیروی اصطکاک، حالت ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل برشی)، حالت آزاد ۱۱۳

شکل ۱۹-۵ تاریخچه جابه‌جایی دیواره لوله ویسکوالاستیک الف) در گره شیر و ب) در گره میانی با دو کوپله اتصال و پواسن و با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشاری: برای حالت تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی (V-F) با مقادیر مختلف نیروی اصطکاک، حالت ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل برشی)، حالت آزاد..... ۱۱۴

شکل ۲۰-۵ الف) تاریخچه جابه‌جایی کل (uz) گره شیر (تکیه‌گاه مرزی)، ب) جابه‌جایی ناشی از لغزش تکیه‌گاه (uzf)، ج) جابه‌جایی ناشی از تغییر شکل تکیه‌گاه (uzs) در لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه لغزشی و نیروی اصطکاک (5%Wtotal)..... ۱۱۷

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۹۲.....	جدول ۵-۱ داده های ورودی مورد نیاز در آزمایش ایمپریال کالج جهت بررسی ضربه قوچ [Covas et.al,2004a]
۹۳.....	جدول ۵-۲ مشخصات لوله ویسکوالاستیک [Zanganeh et.al, 2015]
۹۳.....	جدول ۵-۳ مشخصات تکیه گاه ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن مکانیزم تغییرشکل محوری [Zanganeh et.al, 2015]
۹۹.....	جدول ۵-۴ مشخصات تکیه گاه ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن مکانیزم برشی (شکل ۳-۸)
۱۰۸.....	جدول ۵-۵ محاسبه نیروی اصطکاک ناشی از وزن لوله با درصدهای مختلف (مقادیر مختلف نیروی اصطکاک)

۱- فصل اول: مقدمه

جریان غیرماندگار^۱ یا جریان ناپایدار جریانی است که خصوصیات آن در هر نقطه نسبت زمان تغییر کند. جریان غیر ماندگاری که به دلیل تغییر شرایط مابین دو جریان ماندگار^۲ ایجاد می‌شود، جریان میرا (گذرا)^۳ می‌نماند. ضربه قوچ یا چکش آبی^۴ نوعی جریان گذرا است که در اثر تغییر شرایط ایجاد شده به دلیل عوامل مختلفی مانند بسته شدن شیر یا توقف ناگهانی پمپ یا توربین و ... ایجاد می‌شود.

زمانی که دبی جریان به صورت ناگهانی صفر شود این پدیده اتفاق می‌افتد و باعث ایجاد تغییراتی در خصوصیات جریان می‌شود، به طوری که فشار نسبت به حالت پایدار قبل ابتدا افزایش و سپس به طور نوسانی به مقدار زیادی کاهش و افزایش می‌یابد. این تغییرات فشار گاهی موجب ایجاد تنش شعاعی و محوری در سازه لوله، تکیه گاه‌ها، اتصالات و ... می‌شود و تغییر شکل‌هایی را در سازه لوله ایجاد می‌کند که خود باعث تغییر دادن شرایط جریان به وجود آمده می‌شود. در این وضعیت دائماً سیال و سازه بر یکدیگر اثر می‌گذارند و بین آن‌ها اندرکنش وجود خواهد داشت. این موضوع می‌تواند باعث بروز خرابی‌های مختلفی در سیستم لوله مانند پارگی در لوله، جدا شدن لوله از اتصالات جانبی و ... شود.

۱-۱- پدیده ضربه قوچ (چکش آبی)

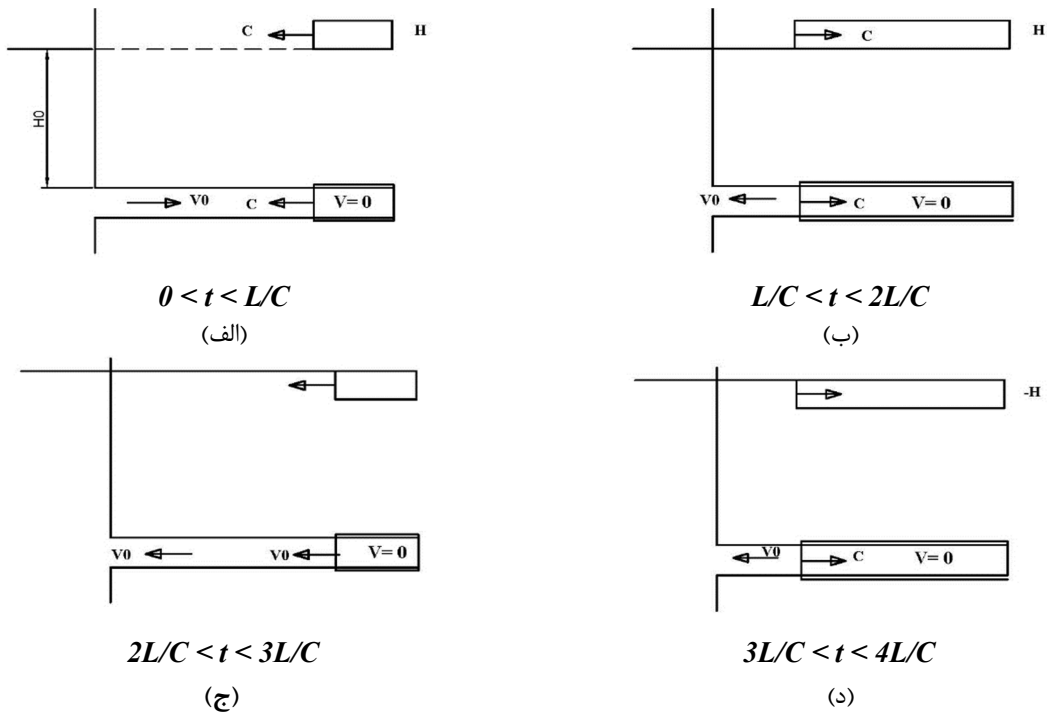
برای توضیح و درک بهتر پدیده ضربه قوچ، سیستم مخزن-لوله-شیر بررسی می‌شود. شکل (۱-۱) را در نظر بگیرید. اگر سیال در لوله ای به طول L با سرعت V_0 در حالت ماندگار در جریان و شیر پایین دست خط لوله کاملاً باز باشد، ناگهان در لحظه $t_0=0$ شیر بطور ناگهانی بسته می‌شود در نتیجه سرعت در پشت شیر در این لحظه برابر صفر خواهد شد. بر اساس رابطه برنولی در این لحظه فشار در پشت

1 unsteady
2 steady
3 transit
4 water hammer

شیر به اندازه H افزایش می‌یابد و موجب انبساط لوله خواهد شد و از آنجایی که هنوز از بالادست، سیال با سرعت V_0 به سمت شیر در جریان است، لایه های سیال یکی پس از دیگری متراکم شده و این موج فشار با سرعت c به سمت بالادست منتقل و در لحظه $t=L/c$ به مخزن خواهد رسید به طوری که تمام سیال در لوله تحت هد اضافی H قرار می‌گیرد. (شکل ۱-۱-الف) در این لحظه به دلیل عدم توانایی موج فشار در تغییر هد مخزن، شرایط نامتوازنی رخ خواهد داد و باعث می‌شود جریان معکوسی در لوله با سرعت V_0 شکل گیرد تا وضعیت جریان را به حالت قبل بازگرداند. موج کاهش فشار در لحظه $t=2L/c$ به شیر خواهد رسید (شکل ۱-۱-ب) پس از رسیدن موج کاهش فشار به شیر، از آنجایی که شیر بسته است و جریانی در آن شکل نمی‌گیرد، فشار در این لحظه در این محل به $(-H)$ خواهد رسید و موجب انقباض لوله خواهد شد. این موج فشاری منفی با سرعت c به سمت بالادست حرکت خواهد کرد و در لحظه $t=3L/c$ به مخزن خواهد رسید (شکل ۱-۱-ج) در این حالت چنانچه فشار درون لوله از فشار بخار کمتر باشد، سیال تبخیر، پدیده کاویتاسیون^۱ و جدایی ستون مایع^۲ رخ خواهد داد. پس از رسیدن موج فشاری منفی به مخزن دوباره شرایط نامتوازنی ایجاد خواهد شد و سیال در درون لوله با سرعت V_0 به سمت جلو جاری می‌شود. در نتیجه همزمان با انتشار موج به طرف پایین دست با سرعت c ، لوله و جریان سیال به شرایط عادی برمی‌گردند.

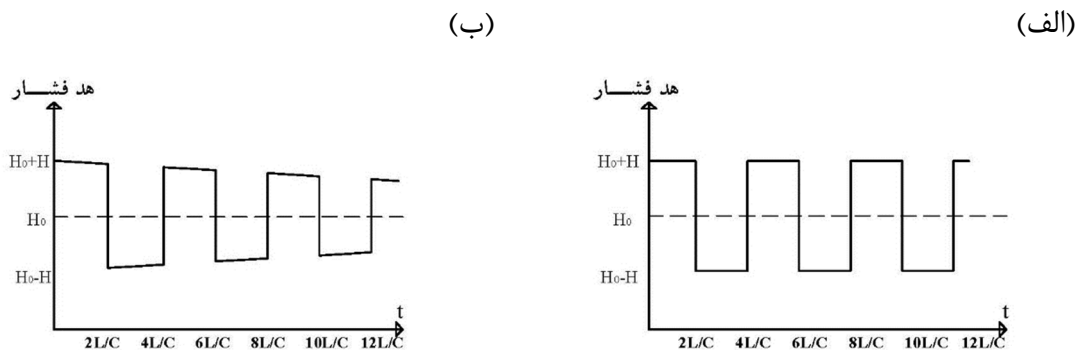
¹ Cavitation

² Column separation



شکل ۱-۱ اثرات ناشی از پدیده ضربه قوچ در لوله، در یک سیکل بعد از بسته شدن ناگهانی شیر [زنگانه، ۱۳۹۲]

در زمانیکه $(t=4L/c)$ موج به شیر می‌رسد، شرایط دقیقا همزمان با بسته شدن شیر است. این فرآیند در هر $4L/c$ ثانیه تکرار می‌شود [Wilie and Streeter, 1978]. در صورت وجود اصطکاک و سایر عوامل کاهنده مانند استفاده از مواد ویسکوالاستیک با هر تکرار مقداری از فشار کاسته می‌شود تا به حالت ماندگار و ساکن برسد (شکل ۲-۱ را ببینید).



شکل ۲-۱، تغییرات فشار با زمان در پشت شیر، (الف) بدون اصطکاک، (ب) با در نظر گرفتن اصطکاک (بین سیال و لوله)

۱-۲- هدف انجام تحقیق

تغییرات سیکلیک فشار ناشی از پدیده ضربه قوچ با توجه به آنچه که در بخش قبل (۱-۱) توضیح داده شده است در یک سیستم خط لوله باعث ایجاد ارتعاشات و تنش‌های دینامیکی می‌شود. این تنش‌ها، منجر به جابجایی‌های دینامیکی در سازه لوله می‌شود. این موضوع می‌تواند باعث بروز خرابی‌های مختلفی در سیستم لوله مانند پارگی در لوله، جداشدن لوله از اتصالات جانبی و... شود.

از آنجاییکه نمی‌توان از ایجاد پدیده ضربه قوچ در یک خط لوله بصورت کامل جلوگیری بعمل آید، در ذهن محققین روش‌های مختلفی جهت کنترل و تعدیل فشارها و کاهش جابه‌جایی و ارتعاشات به وجود آمده جهت حفاظت و افزایش طول عمر سیستم یک خط لوله ارائه شده است، از جمله می‌توان به استفاده از چرخ طیار، لوله کنار گذر، شیر یکطرفه، نصب شیر هوا، مخازن موج گیر و ... اشاره کرد.

میرایی یک ویژگی مهم در سازه است که باعث جذب انرژی و کنترل ارتعاشات می‌شود. ویسکوالاستیک (پلیمرها)، موادی هستند که دارای خاصیت میرایی می‌باشند. همچنین نظر به به خواص این مواد، استفاده از مصالح پلی اتیلن در صنعت لوله رو به افزایش است. در نتیجه یکی از روش‌های کارآمد استفاده مصالح پلی اتیلن (پلیمری) در ساخت لوله‌ها می‌باشد.

حال این پرسش‌ها ایجاد می‌شود.

آیا می‌توان از این مصالح انعطاف پذیر با خاصیت جذب انرژی و میرایی در قسمت‌های دیگر سیستم لوله استفاده کرد؟

آیا می‌توان با تمهیدات دیگر و روش‌های اجرایی ساده‌تری در کنار استفاده از این مصالح به بهبود اثرات ضربه قوچ در یک خط لوله کمک شود؟

آیا می‌توان با به کارگیری این نوع مصالح در اتصالات و تکیه‌گاه از خاصیت میرایی آن در یک خط لوله بهره‌مند شد؟ زیرا ممکن است به دلایلی همیشه نتوان از لوله‌هایی با به‌کارگیری این جنس مصالح (ویسکوالاستیک) در سازه اصلی استفاده کرد.

استفاده از مصالح ویسکوالاستیک در تکیه‌گاه‌های یک خط لوله با مصالح مختلف چه تاثیری بر رفتار سازه لوله و چریان در پدیده ضربه قوچ می‌گذارد؟ آیا به بهبودی رفتار دینامیکی به وجود آمد کمک خواهد کرد؟

علاوه بر مصالح ویسکوالاستیک که دارای خاصیت جذب انرژی می‌باشند، پدیده اصطکاک باعث اتلاف انرژی در یک سیستم و استهلاک آن می‌شود، حال این سوال ایجاد می‌شود که می‌توان با بکارگیری این پدیده (اصطکاک خشک¹) در قسمت‌های دیگر در سیستم یک خط لوله و درگیری آن در اندرکنش بین سیال-سازه، رفتار یک خط لوله را در هنگام ایجاد ضربه قوچ بهبود بخشید؟ آیا می‌توان از خاصیت اصطکاک در تکیه‌گاه‌های یک خط لوله استفاده کرد؟ آیا می‌توان از اثرات توام ویسکوالاستیسته و اصطکاک استفاده کرد؟

برای رسیدن به جواب این سوالات در این تحقیق یک خط لوله (مخزن-لوله-شیر) از جنس مصالح الاستیک و ویسکوالاستیک با تکیه‌گاهی از جنس مصالح ویسکوالاستیک و همچنین اثرات اصطکاک در این نوع تکیه‌گاه‌ها (تکیه‌گاه‌های اصطکاکی یا لغزشی از جنس ویسکوالاستیک) در پدیده ضربه قوچ با در نظر گرفتن اندرکنش سیال سازه مورد بررسی قرار گرفته‌است و تاثیرات آن‌ها در نتایج به دست آمده ارائه شده است.

۱-۳- فرضیات پایان نامه

در این پایان‌نامه تاثیر بکارگیری تکیه‌گاه‌های ساخته شده از مواد ویسکوالاستیک با شرایط مختلف در سیستم مخزن-لوله-شیر که در آن پدیده ضربه قوچ به دلیل بستن شیر رخ می‌دهد مورد بررسی قرار می‌گیرد. از این تکیه‌گاه‌ها هم در محل شیر (تکیه‌گاه مرزی) و هم در طول تکیه‌گاه (تکیه‌گاه‌های میانی) استفاده می‌شود.

¹ Dry friction

معادلات حاکم بر حرکت سیال (پیوستگی و مومنتم و معادله مرتبه دوم ارتعاش محوری که به دو معادله مرتبه اول تبدیل شده است)، به نحوی که بتوان شرایط مرزی را برحسب تنش اعمال کرد، برای لوله الاستیک و ویسکوالاستیک استخراج و سپس با استفاده از روش full MOC، در حوره زمان حل می‌گردند.

در واقع در این مطالعه نحوه پیاده‌سازی تکیه‌گاه‌های مختلف ویسکوالاستیک (ساده و لغزشی اصطکاکی) بعنوان شرط مرزی، در حل عددی معادلات به روش کاملاً مشخصه و نتایج و اثرات آن بر اندرکنش سیال-سازه ناشی از پدیده ضربه قوچ در لوله ارائه شده است.

جهت بررسی اثرات تداخلی سیال-سازه هر دو کوپله پواسن و اتصال در نظر گرفته می‌شود. زیرا کوپله پواسن با توجه به نسبت پواسن مصالح لوله، تنش‌ها و تغییر شکل‌های محوری در لوله ایجاد خواهد نمود که بر روی تکیه‌گاه‌ها اثر می‌گذارد. کوپله اتصال نیز باید به دلیل وجود تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک ساده به دلیل قابلیت ارتجاعی و تغییر شکل‌ها که در آن‌ها بوجود می‌آید و همچنین تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک اصطکاکی لغزشی که امکان جابه‌جایی در آن‌ها وجود دارد، در نظر گرفته شوند.

در این پایان‌نامه تنها تنش‌ها، تغییر شکل‌ها و جابه‌جایی‌های محوری، ناشی از تغییرات فشار مدنظر می‌باشد و فرض شده است که تکیه‌گاه‌ها طوری طراحی شده‌اند که فقط از طرف لوله نیروهای محوری به آن‌ها و بالعکس اعمال می‌شود. از اثرات سختی خمشی، اینرسی دورانی صرف نظر می‌گردد. این فرضیات بعنوان فرضیات امواج با طول موج‌های بلند خوانده می‌شوند. همچنین فرض شده است دمای محیط ثابت می‌باشد.

در این پایان‌نامه برای محاسبه نیروی ناشی از اصطکاک در تکیه‌گاه‌های لغزشی اصطکاکی، نیاز به محاسبه مقادیر نیروی عمود بر سطح می‌باشد، لذا فرض شده است که نیروی عمودی وارد بر تکیه‌گاه‌ها شامل درصدی از وزن لوله و سیال درون آن باشد و اینکه این مقدار وزن به نسبت تعداد و موقعیت تکیه‌گاه‌ها به آن‌ها اعمال می‌شود.

۱-۴- فصل بندی پایان نامه

در این پایان نامه تاثیر بکارگیری تکیه‌گاه‌های مختلف ساخته شده از مواد ویسکوالاستیک در سیستم مخزن-لوله-شیر، که در آن پدیده ضربه قوچ به دلیل بستن شیر رخ می‌دهد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل دوم تاریخچه و مطالعات انجام شده پیرامون پدیده ضربه قوچ و اثرات تداخلی سیال-سازه در این پدیده بررسی می‌شود. همچنین مطالعاتی که در زمینه بکارگیری مواد ویسکوالاستیک و اثرات آن، چه زمانی که در خود سازه اصلی و چه زمانی که در تکیه‌گاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند بررسی می‌شود و همچنین مطالعات انجام شده در زمین تکیه‌گاه‌های لغزشی و کاربرد آن در سیستم لوله‌ها و تاثیر آن در برابر بارهای دینامیکی بحث شده است تا در نهایت جایگاه تحقیق حاضر در این بین مشخص شود.

در فصل سوم مدل‌های مکانیکی مواد ویسکوالاستیک معرفی و روابط ساختاری آن‌ها بر حسب تابع خزش^۱ و تابع رهاسازی^۲ ارائه می‌شود و مطالبی پیرامون پارامترهای توابع خزش و رهاسازی و همچنین روابط مربوط به رفتار برشی مصالح ویسکوالاستیک و نحوه بدست آوردن آن‌ها بیان خواهد شد. سپس معادلات حاکم هیدرولیکی و سازه‌ای با در نظر گرفتن اثر تداخلی سیال-سازه و متناسب با اهداف این تحقیق استخراج می‌گردد. سپس شرایط اولیه و شرایط مرزی مورد نیاز این پایان‌نامه به عنوان بخش تکمیلی مدل ریاضی توضیح داده می‌شود.

در فصل چهارم روش حل عددی روابط انتگرالی ایجاد شده در معادلات به دلیل رفتار مواد ویسکوالاستیک بیان می‌شود. سپس نحوه حل عددی معادلات حاکم به روش (full MOC) و نحوه پیاده سازی شرایط مرزی حاکم بر مسئله توضیح داده خواهد شد. در واقع در این پایان‌نامه معادلات

¹ Creep function

² Relaxation function

هیدرولیکی و معادلات سازه ای به روش (full MOC) حل می‌شوند. در پایان این فصل نیز الگوریتم کلی حل عددی تشریح می‌شود.

در فصل پنجم ابتدا جهت پیاده‌سازی شرط مرزی تکیه‌گاه ویسکوالاستیک با رفتار محوری (تغییر شکل محوری) با به کارگیری روش (full MOC) مورد صحت سنجی قرار می‌گیرد و اثرات آن بر ارتعاشات هد فشاری و جابه‌جایی محوری لوله بررسی می‌شود. سپس نتایج مربوط به اثرات تکیه‌گاه ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن رفتار برشی (تغییر شکل برشی تکیه‌گاه) بکار رفته در سیستم لوله، بر اندرکنش سیال - سازه در پدیده ضربه قوچ ارائه می‌شود و در نهایت نتایج مربوط به اثرات تکیه‌گاه ویسکوالاستیک لغزشی بکار رفته در سیستم لوله، بر اندرکنش سیال - سازه در پدیده ضربه قوچ ارائه می‌شود و با حالات قبل مقایسه شده و تحلیل می‌شود.

در فصل ششم پس از ارائه خلاصه‌ای از تحقیق حاضر و برخی نتایج حاصله از کار، به طرح نکات و پیشنهاداتی برای ادامه این مطالعه پرداخته شده است.

۲- فصل دوم: مطالعات پیشین

۲-۱- مطالعات پیرامون تئوری‌ها اندرکنش سیال و سازه [زنگانه، ۱۳۹۲

و کرامت، ۱۳۸۹]

برای اولین بار نیوتن^۱ و لاگرانژ^۲ در قرن ۱۷، با بررسی در مورد چگونگی انتشار امواج صوتی در هوا و تشکیل موج و انتشار آن در آب های کم عمق، بر روی هیدرولیک جریان میرا به مطالعه پرداختند. بعدها در سال ۱۸۶۶، وبر^۳ آزمایشاتی جهت تخمین سرعت امواج فشاری انجام داد و به مطالعه جریان سیال غیر قابل تراکم در لوله ها کشسان پرداخت، و در نهایت او معادلات پیوستگی و اندازه حرکت که اساس مطالعه جریان‌های غیر ماندگار هستند را ارائه نمود. ماری^۴ نیز آزمایشات متعددی جهت تعیین سرعت موج فشاری انجام داد و دریافت که اولاً سرعت موج مستقل از دامنه امواج فشاری است و ثانیاً سرعت موج با ضریب الاستیسیته لوله متناسب است. سه سال بعد در سال ۱۸۷۸، کورت برگ^۵، سرعت موج را با توجه به کشسان بودن جداره لوله و سیال ارائه داد. در سال ۱۸۹۷ ژوکوفسکی^۶ بر اساس مطالعات نظری و آزمایشگاهی که انجام داد، گزارشی در مورد تئوری اساسی ضربه قوچ منتشر نمود. او رابطه‌ای جهت سرعت انتشار موج فشاری بدست آورد که در آن کشسان بودن سیال و جدار لوله در نظر گرفته شده بود. همچنین او رابطه‌ای مابین کاهش سرعت و افزایش فشار ناشی از آن، با استفاده از معادلات پیوستگی و اندازه حرکت بدست آورد.

در سال ۱۹۶۰ مقالات و کتاب‌های متعددی حاصل از مطالعات بر روی پدیده ضربه قوچ و جریان میرا ارائه گردید تا اینکه در سال ۱۹۶۶، رویس [Ruus, 1996] برای اولین بار روش بسته شدن بهینه شیر^۷ را با مطالعه بر روی مراحل بسته شدن شیرهای توربین هیدرولیکی ارائه نمود. گری [Gray, 1953] در

¹ Newton

² Lagrange

³ Weber

⁴ Marey

⁵ Korteweg

⁶ Joukowski

⁷ Optimum Valve Closure

بررسی افت انرژی در پدیده ضربه قوچ، روش مشخصه را در تحلیل کامپیوتری بکار برد. استریتر و لای [Streeter and Lai, 1993] در مقاله ای مشترک، برای نخستین بار روش مشخصه را در تحلیل جریان میرا، با استفاده از کامپیوتر تعمیم دادند.

بعدها استریتر مقالات متعددی درباره روش مشخصه ارائه نمود. همچنین کتابی [Wylie & Streeter 1978] را با عنوان جریان‌های میرای هیدرولیکی با همکاری وایلی منتشر کرد.

چهار فاکتور مهم وجود دارد که می‌تواند نتایج ضربه قوچ کلاسیک را تغییر دهد. این چهار عامل عبارتند از: ۱- اصطکاک غیر ماندگار (UF)، ۲- جدایی ستون مایع (CS)، ۳- اندرکنش سیال-سازه (FSI) و ۴- ویسکوالاستیسیته (VE)

دو مورد اول در این تحقیق مورد نظر نمی‌باشد اما اندرکنش سیال-سازه به دلیل بررسی دقیق رفتار انواع تکیه‌گاه‌های مختلف در سیستم لوله به هنگام پدیده ضربه قوچ و اثر مواد ویسکوالاستیک به دلیل استفاده از آن در دیواره لوله و تکیه‌گاه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تداخل سیال-سازه در سیستم‌های خط لوله در سال‌های اخیر بخصوص از نیمه دوم قرن بیستم توسط بسیاری از محققین مورد مطالعه قرار گرفته‌است. بررسی این مطالعات یک سیر تحول و پیشرفت از امواج محوری و حرکت یک بعدی لوله به معادلات چند بعدی موج و روش‌های پیشرفته عددی را نشان می‌دهد.

تأثیر جابجایی‌های طولی و محیطی لوله در کاهش سرعت موج فشاری در بسیاری از منابع از جمله در یادداشت‌هایی از استریتر و وایلی^۱، توضیح داده شده‌است. این تعدیل به صورت سنتی در تحلیل مسأله ضربه قوچ و جریان‌های نوسانگر در خطوط لوله مورد استفاده قرار گرفته‌است. در این تحلیل‌ها حرکت لوله در نظر گرفته نشده‌است.

¹ Streeter & Wylie

اسکالاک^۱ و تورلی^۲ و ویلیامز^۳ جهت تعیین بارهای ناشی از غیرماندگاری جریان در لوله‌های مستقیم، معادلات امواج طولی را برای سیال و لوله بصورت کوپله در نظر گرفتند، تا بتوانند امواج کششی ایجاد شده در بدنه‌ی لوله را تخمین بزنند. اسکالاک مطالعه‌ای با استفاده از این نوع تحلیل ارائه کرد که در آن حرکت لوله تنها در جهت محوری و کاملاً در حد الاستیک بررسی شده است [کرامت، ۱۳۸۹].

تایسلینگ و واردی [Tijsseling and Vardy, 2008] مطالعه جامعی را در زمینه ارائه مقیاس‌های زمانی موثر در جریان‌های غیرماندگار در شبکه‌های لوله تحت فشار انجام داده‌اند. در این تحقیقات سعی شده تا معیارهای زمانی مشخصی را جهت تعیین نوع جریان اعم از پایدار، شبه پایدار^۴، ستون صلب^۵، ضربه قوچ با اثرات تداخلی در حالت‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی ارائه شود. این تحقیق حاوی اطلاعات مفیدی در زمینه فرکانس اصلی ضربه قوچ، فرکانس اصلی امواج تنش و اهمیت نوع تکیه‌گاه‌ها در رفتار دینامیکی سیستم‌های لوله می‌باشد.

اثرات سختی تکیه‌گاه در فشارهای سیال و تنش‌های حاصله در سیستم لوله توسط هیسبروک و تایسلینگ [Heinsbroek and Tijsseling, 1994] بررسی شده است. در اینجا نشان داده شده است که برای سیستم‌های با سختی تکیه‌گاهی کمتر با استفاده از معادلات کلاسیک ضربه قوچ و آنالیز غیرکوپله منجر به جواب‌های غیرقابل قبول خواهد شد که این امر به علت زیاده‌تر شدن اثرات تداخلی بین سیال و سازه می‌باشد. معیار استفاده شده در این مقاله سختی محوری یک متر لوله یا به عبارت دیگر حاصلضرب سطح مقطع لوله در مدول الاستیسیته آن است. نتایج حاصله از حل با انواع سختی‌های تکیه‌گاهی نشان می‌دهد که اگر سختی تکیه‌گاهی کمتر از سختی یک متر لوله باشد استفاده از مدل آنالیز تداخلی ضروری بوده و با انعطاف‌پذیرتر شدن سیستم میزان تنش‌ها در سیستم لوله افزوده شده ولی نیروهای وارده بر تکیه‌گاه‌ها کاهش خواهد یافت. همچنین در این مقاله مباحث

¹ Skalak

² Thorely

³ Williams

⁴ quasi-steady

⁵ rigid column

مهمی در زمینه رابطه سختی تکیه‌گاهی با فرکانس اصلی امواج فشاری، زمان آنالیز و واکنش‌های تکیه‌گاهی ارائه شده‌است. در مرجع [Adamkowski et.al,2017] تاثیر تکیه‌گاه‌های الاستیک لوله در پدیده ضربه‌قوچ بر اساس نتایج آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد تغییرات سختی تکیه‌گاه الاستیک لوله باعث تغییرات دامنه فشار ناشی از ضربه‌قوچ می‌شود و تئوری ضربه‌قوچ کلاسیک نمی‌تواند اثرات آن را پیش‌بینی کند، در نتیجه برای دستیابی به نتایج دقیقتر، لازم است در مدلسازی عددی اثرات FSI در نظر گرفته شود.

۲-۲- آنالیزها و روش‌های عددی اندرکنش سیال و سازه [جزایری،

۱۳۸۳ و کرامت، ۱۳۸۴]

در آنالیز کوپله سیال- سازه باید حرکت موج تنش در جداره لوله همانند حرکت موج فشاری در سیال در نظر گرفته شود. دیویدسون و اسمیت^۱ یک ماتریس انتقال مرکب از سیال و سازه را برای یک لوله خم‌دار توسعه دادند و نتایج آزمایشگاهی درستی کار آن‌ها را ثابت کرد. در ادامه این کار آن‌ها یک حل دقیق‌تر را توسعه دادند و یک سیستم لوله غیرمستوی را که شامل سه زانو بود، بررسی کردند و نتایج آن‌ها بوسیله مدل آزمایشگاهی تأیید شد.

ریتز^۲، دسوزا و اولدنبرگر^۳ و جونز و وود^۴ جریان نوسانگر را بعنوان یک عامل ایجادکننده ارتعاشات و حرکات طولی در یک لوله تنها، مورد مطالعه قرار دادند. وود جریان غیرماندگار سیال را با یک مدل یک درجه آزادی جرم - فنر، بصورت کوپله در نظر گرفت و توانست مهمترین تداخل سیال و سازه لوله را اثبات کند. این تحلیل همچنین برای ارتعاش سیستم‌های لوله یک درجه آزادی صحیح است.

¹ Davidson & Smith

² Regetz

³ D'souza & Oldenburger

⁴ Jones & Wood

همچنین وی به این نتیجه رسید، زمانی که بخش‌های ضروری سیستم به طور کامل مهار نشده باشند، می‌تواند تفاوت‌های شدیدی (تغییرات دامنه و فرکانس) در نتایج، نسبت به تحلیل کلاسیک ضربه قوچ بوجود آوردند.

ویلکینسون^۱ روشی برای تخمین پاسخ لرزه‌ای سیستم عمومی لوله ارائه کرد که در آن از یک ماتریس انتقال استفاده شده‌است. روابط شامل پنج خانواده کوپله (یکی در سیال و چهار رابطه) در سازه لوله بودند. در کار بعدی آقای ویلکینسون، تئوری ساده شده‌ای برای غیرماندگاری جریان و انتشار امواج و پاسخ سازه‌ای در سه راهی‌ها (T شکل) و خم‌ها ارائه شده‌است.

اولسن^۲ روشی را ابداع نمود که در آن لوله و سیال درون آن بصورت المان‌های جامد^۳ با ارتباط‌های مناسب در نظر گرفته می‌شوند و سپس کل سیستم با یک الگوریتم اجزا محدود تحلیل می‌شود.

هتفیلد و همکاران^۴ روش سنتز اجزا^۵ را برای پیش‌بینی امواج فشاری و پاسخ‌های سازه‌ای سیستم لوله توسعه دادند. در این روش در ابتدا فرکانس طبیعی و شکل مودهای سیستم لوله تعیین می‌شوند و سپس این مودها در تعدیل کردن تحلیل هیدرودینامیکی سیال مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ویگرت و هتفیلد و استاکنبروک^۶ یک روش مشخصه برای سیال و سازه بصورت همزمان ارائه کردند. در این روش روی خطوط مشخصه، فشار سیال و تنش محوری، برش و خمش لوله، همگی قابل تعریف بودند. البته این روش هم محدودیت‌هایی در معیارهای ریاضی و دینامیک سازه داشت. لووی و تایلینگ^۷ تداخل سیال و لوله را با بکار بردن تئوری ضربه قوچ برای سیال و تئوری خمش تیموشنکو تیموشنکو برای المان لوله، مدل کردند و یک پروسه مرکب از روش مشخصه (MOC) و اجزای محدود

¹ Wilkinson

² Olson

³ Solid Elements

⁴ Hatfield et al.

⁵ Component Synthesis

⁶ Wiggert & Hatfield & Stuckenbruck

⁷ Lavooij & Tijsseling

(FEM) ارائه گردید. معادلات هیدرولیکی با MOC و معادلات سازه ای با FEM تحلیل شدند [جزایری، ۱۳۸۳ و کرامت، ۱۳۸۴].

یکی از مهمترین مقالات تائسلینگ مرجع [Tijsseling, 2003] می‌باشد 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 می‌شود) به صورت تحلیلی حل شده‌اند. در اینجا هر دو اثر تداخلی پواسن و اتصال به دقت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. حل دقیق ارائه شده نشان داد که استفاده از روش‌های عددی معمولاً دارای خطای قابل توجهی می‌باشد و برای کاهش خطاها باید المان‌ها بسیار کوچک انتخاب شوند که این زمان محاسبه را بسیار بالا می‌برد. روش حل فوق به طور خلاصه عبارتست از روشی جهت مستقل ساختن ۴ معادله دیفرانسیل از یکدیگر در یک سیستم مجازی و سپس حل آن‌ها با روش خطوط مشخصه. از مزایای اصلی این کار در مقایسه با کارهای مشابه قبل ارائه ۶ مساله مرجع^۱ و حل آن‌ها با روش پیشنهادی و مقایسه نتایج حل، با روش عددی خطوط مشخصه می‌باشد.

مقاله مهم دیگری که در زمینه آنالیز فرکانسی تداخل سیال-سازه موجود است، به وسیله لی و همکاران

[Li et.al, 2003] ارائه شده‌است. این مقاله تنها در روش حل معادلات مجزا شده از هم با کار تائسلینگ تفاوت دارد، به این ترتیب که در اینجا به جای استفاده از روش خطوط مشخصه از روشی بر پایه حل دالامبر در معادلات موج استفاده شده‌است.

مقاله هینسبروک [Heinsbroek, 1997] یکی از مقالات اساسی در زمینه آنالیز زمانی اثرات تداخلی سیال-سازه در شبکه‌های لوله می‌باشد. روش ارایه شده در این مقاله روش خطوط مشخصه جهت حل معادلات هیدرولیک و روش اجزای محدود برای حل معادلات سازه می‌باشد. البته مقایسه ای بین استفاده از این روش و روش تمام خطوط مشخصه نیز انجام شده‌است. نتایج برای مدل‌های مختلفی

¹ Delft Hydraulics Benchmark Problems A to F

شامل برخورد محوری و جانبی جرم مشخصی با یک لوله مستقیم به طول ۳۰ متر جهت مقایسه روش حل تمام خطوط مشخصه (full MOC) و روش MOC-FEM و اعمال یک لنگر ثابت به انتهای لوله‌ای به طول ۲۰ متر جهت مقایسه استفاده از مدل‌های اولر-برنولی و تیموشنکو ارائه گردیده‌است. همچنین نتایج اثرات تداخلی برای یک سیستم دو لوله‌ای (۳۱۰ و ۲۰) متر دارای یک مخزن و یک شیر و یک زانویی نیز ارائه شده‌است. در پایان نتایج مدل کامپیوتری با نتایج آزمایشگاهی مربوط به مدل ۷ لوله و ۶ زانویی مقایسه شده و صحت برنامه تایید شده است. در نتیجه مهم این مقاله بیان شده است که استفاده از مدل تیر اولر-برنولی و حل آن با اجزای محدود و استفاده از حل خطوط مشخصه برای معادلات هیدرولیک، در حل بسیاری از سیستم‌های لوله عملی در صنعت جواب‌های بسیار قابل قبول می‌دهد.

احمدی و کرامت با ارائه مقاله‌ای [Ahmadi and Keramat, 2010] به بررسی اثرات انواع مختلف کوپله اتصال در پدیده ضربه قوچ پرداختند. آن‌ها در این مقاله روابط شرایط مرزی مورد نیاز جهت مدلسازی کوپله اتصال در حالات مختلف، مانند پمپ‌ها، شاخه‌ها و شیرهایی که امکان جابه‌جایی داشتند را برای حل معادلات هیدرولیکی و سازه‌ای با استفاده از روش MOC-FEM ارائه نمودند.

حل معادلات تداخلی سیال-سازه در شبکه‌های لوله از دو دیدگاه اصلی مورد توجه قرار گرفته است حل در بازه زمان و حل در بازه فرکانس که هر کدام مزایا و معایبی دارند [Tijsseling, 1996].

حل در بازه زمان که منظور حل عددی معادلات می‌باشد از این نظر اهمیت دارد که به وسیله آن می‌توان انواع مختلف سیستم‌های لوله (شاخه‌ای، حلقوی با انواع شرایط مرزی) را تحلیل کرد. ضعف این روش در لزوم استفاده از میانمایی جهت انتقال پارامترهای هیدرولیکی به معادلات سازه و بالعکس می‌باشد که این امر خود باعث کند شدن این مدل‌ها می‌شود [Wiggert and Tijsseling, 2001].

معادلات تداخل سیال-سازه در حالت سه بعدی با روش اجزای محدود برای هر دو دسته معادلات هیدرولیک و سازه‌ای حل شده‌اند [Sreejith et.al, 2004]. البته نتایج حاصله چندان از سرعت و دقت

کافی در همگرایی برخوردار نیستند ولی روش حل کاملاً اجزای محدودی برای حل معادلات تداخلی سیال-سازه در لوله در نوع خود کاملاً جدید و قابل تأمل است.

تشریح روش مدلسازی رفتار ویسکوالاستیک دیواره لوله در معادلات ضربه قوچ، با استفاده از روش MOC توسط کوواس و همکاران [Covas et.al 2004b and 2005] ارائه گردید. در این کارها، اثر کرنش‌های محیطی دیواره لوله با استفاده از المان‌های کلین-ویت مدلسازی شده است. در این مدل، رفتار ویسکوالاستیک به وسیله مجموعه‌ای از فنرها و میراگرها شبیه‌سازی می‌شود. معادلات ارائه شده در اینجا، دو معادله پیوستگی و مومنتم سیال می‌باشند که اثر رفتار ویسکوالاستیک همانند یک ترم چشمه‌ای^۱ در معادله پیوستگی وارد می‌گردد. البته ضعف عمده این روش این است که در آن، توابع خزش تطابقی باید با انجام یک آزمایش روی شبکه لوله، کالیبره شوند.

در تحقیقات کامل‌تری که توسط سوارس و همکاران [Soares et.al, 2009] و کرامت و همکاران [Keramat et.al, 2010] انجام شده است، اثر کاویتاسیون در لوله‌های ویسکوالاستیک به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

در تمام این مطالعات، اگرچه لوله به صورت ویسکوالاستیک فرض شده است. اما از اثرات تغییرشکل محوری که بعلاوه نسبت پواسن مواد، اجتناب ناپذیر هستند، به کلی صرف نظر شده است، بنابراین اثرات تداخلی در نظر گرفته نشده است.

آکایب و بهرار در مقاله‌ای [Achouyab and Bahrar, 2011] به مطالعه اثرات توام ویسکوالاستیسیته (VE) و تداخل و سازه (FSI) در پدیده ضربه قوچ پرداختند. در این تحقیق برای حل معادلات از روش MOC-FEM استفاده شده است. آن‌ها در مطالعه خود از حرکت تکیه‌گاه‌ها و زانوها در محل تداخل سیال و سازه صرف نظر نمودند.

در تحقیقی کامل‌تر، کرامت و همکاران [Keramat et.al, 2012] اثر تداخلی سیال-سازه را با در نظر گرفتن کوپله اتصال و پواسن در لوله‌های ویسکوالاستیک مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله رفتار

¹ Source term

ویسکوالاستیک مواد با مدل تعمیم یافته کلون-ویت قیاس و از فرم انتگرالی روابط ساختاری مدل آن، استفاده شده است. آن‌ها پس از استخراج معادلات با در نظر گرفتن اثرات تغییر شکل‌های محوری، با دو روش کاملاً MOC و روش MOC-FEM به حل معادلات پرداختند.

در زمینه حل عددی مواد ویسکوالاستیک در حوزه زمان که بر پایه معادلات دیفرانسیلی انتگرالی می‌باشد، چندین کار از جمله ارائه الگوریتمی کارآمد برای تقریب مشتقات زمانی و محاسبه انتگرال کانولوشن جهت ساده‌سازی محاسبات در مقاله [Mikhailenko et.al, 2003] و بسط سری دریشله تابع خزش (کرنش پیوسته) در مقاله [Chazal et.al, 2009] انجام شده است.

همچنین توسط کرامت و احمدی [Keramat and Ahmadi, 2011] جهت محاسبه انتگرال کانولوشن ناشی از رفتار ویسکوالاستیک بر اساس مقادیری از گام زمانی فعلی و قبلی به منظور پیاده‌سازی روش اجزا محدود در حوزه زمان ارائه شده است.

۲-۳ - مطالعات انجام شده پیرامون تکیه‌گاه ویسکوالاستیک

در تمام تحقیقات ذکر شده اثر مواد ویسکوالاستیک در دیواره لوله مورد بررسی قرار گرفته است. اما همواره استفاده از مواد ویسکوالاستیک در سازه اصلی به دلایل فنی و اقتصادی امکان پذیر نمی‌باشد. لذا می‌توان به روشی جایگزین از این مواد، به دلیل خاصیتشان در استهلاک انرژی و ارتعاشات سازه‌ای، در تکیه‌گاه‌های سیستم لوله و سازه‌ها جانبی آن مانند شیرها، پمپ‌ها، زانویی‌ها و ... استفاده نمود. در این خصوص مقالات بسیار اندکی تاکنون ارائه شده است. در این بین می‌توان به مرج [Stossel et.al, 1988] اشاره نمود که متاسفانه اطلاعات دقیق‌تری در مورد روش تحقیق و نتایج این مطالعه در دست نیست.

زنگانه در پایان نامه کارشناسی ارشد خود برای اولین بار آنالیز ضربه‌قوچ را در یک خط لوله (ازجنس الاستیک و ویسکوالاستیک) با تکیه‌گاه‌هایی از جنس ویسکوالاستیک (با در نظر گرفتن تغییرشکل

محوری تکیه‌گاه) به صورت عددی با بکارگیری روش MOC-FEM مورد بررسی قرار داد، و با نتایج حاصل از بکارگیری تکیه‌گاه‌های الاستیک و گیردار مقایسه نمود [Zanganeh et.al, 2015]. در این تحقیق کوپله پواسن و کوپله اتصال مکانیزم‌های اندرکنش سیال-سازه و مدل جامع کلوین-ویت برای مدلسازی رفتار ویسکوالاستیسیته در نظر گرفته شده است. نتایج این تحقیقات نشان داد که استفاده از این مواد در تکیه‌گاه‌ها می‌تواند ارتعاشات هد فشاری و جابه‌جایی دیواره لوله را میرا کند.

در جدیدترین تحقیقات انجام شده توسط هنکلک [Henlick, 2018]، مدلسازی یک خط لوله با تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک در پدیده ضربه‌قوچ به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است، در این تحقیق شرط مرزی (BC) تکیه‌گاه به صورت معادله دیفرانسیلی حرکت (EOM) در چهار معادله حاکم بر FSI در پدیده ضربه‌قوچ پیاده‌سازی و با روش مشخصه حل شده است، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که دامنه‌های فشار ناشی از ضربه‌قوچ بدلیل جذب انرژی تکیه‌گاه‌ها کاهش می‌یابد. در این تحقیق از مدل تک المان کلوین-ویت استفاده شده است.

عملکرد تکیه‌گاه ویسکوالاستیک در بخش‌های دیگر مهندسی مورد بررسی قرار گرفته است که می‌توان به مطالعات انجام شده در زمینه مهندسی راه آهن [Vostroukhov and Metrikine, 2003]، در زمینه مهندسی مکانیک به بررسی پاسخ ماشین‌آلات [Friswell et.al, 2006] اشاره نمود. در تمام این مطالعات تکیه‌گاه ویسکوالاستیک با استفاده از تک المان کلوین-ویت شبیه‌سازی شده است. همچنین در تحقیق کامل‌تری بصورت عددی و آزمایشگاهی به بررسی اثرات تکیه‌گاه ویسکوالاستیک بر کاهش صدا و پاسخ ماشین‌آلات چرخشی پرداخته است [Tillema, 1996]، در این تحقیق جهت مدلسازی رفتار تکیه‌گاه ویسکوالاستیک از مدل ماکسول تعمیم‌یافته و روش اجزای محدود برای حل عددی استفاده شده است.

۲-۴- مطالعات انجام شده پیرامون تکیه گاه اصطکاکی

ایجاد اثر اصطکاک در تکیه‌گاه که به صورت یک تکیه‌گاه لغزشی اصطکاکی عمل می‌کند می‌توان راه موثری برای اتلاف انرژی ناشی از بارهای دینامیکی در یک سیستم باشد. استفاده از اصطکاک در تکیه‌گاه می‌تواند انتخاب خوبی باشد تا بدون تغییر ویژگی‌های لوله بتوان نیاز لازم را برطرف کرد. برای اولین بار اندرسون و سینگ [Anderson and Singh, 1976] پیشنهاد مدلسازی اثرات اصطکاک را بر روی تکیه‌گاه یک خط لوله تحت بارهای لرزه‌ای دادند، بعد از آن این موضوع مورد بررسی‌های بیشتری قرار گرفت که می‌توان به تحقیقات [Kobayashi et.al, 1989]، [Chiba et.al,1992]، [Shimuzu et.al, 1996]، [Suzuki et.al, 1992]، [Yokoi et.al, 1993]، [Bakre et.al,2007] و [Bakre et.al,2004] اشاره کرد، در این مطالعات، برای بهبود رفتار یک سیستم لوله تحت بارهای لرزه‌ای، اثرات اصطکاک در تکیه‌گاه (تکیه‌گاه‌های اصطکاکی یا لغزشی) از طریق انتقال بین دو وضعیت چسبندگی - لغزش (stick-slip) در نظر گرفته شده است. در تمامی مطالعات انجام شده رفتار غیرخطی اثرات اصطکاک در تکیه‌گاه (تکیه‌گاه‌های اصطکاکی)، از طریق انتقال بین دو وضعیت چسبندگی - لغزش (stick-slip) مدلسازی شده است.

در زمینه تاثیر اصطکاک بین دو سطح (خشک) بر FSI در اثر تحریکات ضربه قوچ می‌توان به تحقیق عددی و آزمایشگاهی [Tijsseling and Vardy, 1996] بر روی سیستم‌های pipe-rack اشاره کرد. در این تحقیق برای جلوگیری از حرکت محوری لوله تنها نیروی اصطکاک بین دیواره لوله و rack در نظر گرفته شده است. در تحقیق که توسط فراس و همکاران [Ferras et.al,2017] منتشر شده است، تاثیر استفاده از تکیه‌گاه‌های ثابت و بلوک‌های تکیه‌گاهی (بلوک‌هایی که به صورت صلب به همراه لوله حرکت می‌کنند) در طول یک لوله مستقیم، بر اندرکنش سیال-سازه در پدیده ضربه‌قوچ مورد بررسی قرار گرفته است. در مدلسازی عددی بلوک‌های تکیه‌گاهی، اثرات اینرسی و اصطکاک در برابر حرکت افقی لوله در نظر گرفته شده است.

هدف از تحقیق حاضر بررسی تاثیر تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک با مکانیزم‌های عملکردی مختلف بر اندرکنش سیال-سازه در پدیده ضربه‌قوچ با استفاده از روش full MOC در حوزه زمان می‌باشد. بدین منظور از مدل 1D چهار معادله دیفرانسیل مرتبه اول جهت در نظر گرفتن اندرکنش سیال-سازه (کوپله پواسن و اتصال) در سیستم مخزن-لوله-شیر استفاده می‌گردد. در ابتدا تاثیر تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک با مکانیزم تغییرشکل محوری و سپس با مکانیزم تغییرشکل برشی ناشی از نیروهای (افقی) وارده بر تکیه‌گاه‌ها در هنگام وقوع پدیده ضربه‌قوچ بررسی می‌شود، در نهایت اثرات اصطکاک در تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک (با مکانیزم تغییرشکل برشی) با رویکرد تکیه‌گاه‌های لغزشی ویسکوالاستیک بر FSI در پدیده ضربه‌قوچ مورد بررسی قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، در مکانیزم سوم عملکردی تکیه‌گاه، با ارائه شرط مرزی مناسب اثرات توأم اصطکاک و ویسکوالاستیسته در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی اثر ویسکوالاستیسته تکیه‌گاه و دیواره لوله از مدل تعمیم‌یافته کلونین-ویت و با فرم انتگرالی روابط ساختاری مدل آن استفاده شده است. از اصطکاک بین دیواره لوله و سیال صرف نظر شده است. شرایط مرزی تکیه‌گاه‌ها بر اساس معادله تنش بر حسب کرنش مواد ویسکوالاستیک استخراج و رفتار غیرخطی تکیه‌گاه‌های لغزشی (اصطکاکی) به وسیله تغییر حالت چسبندگی-لغزش مدل‌سازی می‌شود. نسبت پواسن مصالح ویسکوالاستیک (دیواره لوله و تکیه‌گاه) نسبت به زمان ثابت فرض می‌شود. برای صحت‌سنجی معادلات ارائه شده شرط مرزی، جهت مدل‌سازی تکیه‌گاه ویسکوالاستیک در یک خط لوله به روش full MOC، نتایج مکانیزم عملکرد محوری آن با نتایج مرجع [Zanganeh et.al, 2015] به روش MOC-FEM مقایسه می‌شود.

۳- فصل سوم: مدل ریاضی

۳-۱-۱- اندرکنش سیال و سازه در لوله‌ها

تغییرات رفت و برگشتی فشار ناشی از پدیده ضربه قوچ در یک سیستم خط لوله باعث ایجاد تنش‌هایی می‌شود. که این تنش‌ها، منجر به جابجایی‌های دینامیکی در سازه لوله می‌شود که این جابه‌جای‌ها هم در جهت شعاعی و در جهت طولی هستند. این تغییر شکل‌ها نیز بر روی امواج فشاری درون لوله تاثیر می‌گذارند، بنابراین یک اندرکنش بین سیال و سازه در خط لوله وجود دارد و هر دو روی هم تأثیر می‌گذارند و تداخلی بین آن‌ها بوجود می‌آید، در نتیجه رفتارشان بهم مرتبط می‌باشد و نمی‌توان به صورت جداگانه بررسی شوند. پس برای تحلیل سیستم باید معادلات حاکم بر حرکت سیال و حرکت دینامیکی سازه، بصورت همزمان (کوپله) نوشته شده و با روشی مناسب حل شوند.

یکی از مسائل مهم در طراحی خطوط لوله، تخمین زدن نیروهای ایجاد شده در تکیه‌گاه‌ها، سازه اصلی و اتصالات بر اثر پدیده ضربه قوچ و همچنین پاسخ متقابل آن‌ها بر سیستم می‌باشد. این مطلب، بخصوص جهت طراحی تکیه‌گاه‌ها اهمیت فراوانی دارد تا بتوان یک طرح بهینه و مناسب برای کاهش خسارات ناشی از این پدیده ارائه کرد. بنابراین با انجام تحلیل همزمان سیال و خط لوله، می‌توان تخمینی مناسب جهت نیروهای تکیه‌گاهی بدست آورد تا در صورت لزوم بتوان تقویت مناسب را در محل‌هایی که احتمال پارگی خط لوله بدلیل تغییر مکان‌های طولی وجود دارد، اعمال نمود.

۳-۱-۱- طبقه بندی انواع مدلسازی های کوپله

تایسلینگ [Tijsseling and Vardy, 2008] روش‌های کوپله حل مسایل FSI لوله‌ها را با توجه به معادلات دیفرانسیلی که برای هر روش استفاده می‌شود، به صورت زیر طبقه بندی کرد.

مدل دو معادله دیفرانسیل، در این مدل فقط دو معادله دیفرانسیل هیدرولیک (پیوستگی و مومنتم) حل می‌شوند و سپس از فشارها و سرعت‌های به دست آمده از این حل، برای تحلیل معادلات سازه‌ای استفاده می‌شود. در این روش که در اصل یک روش نیمه کوپله می‌باشد. مقادیر به دست آمده از حل

معادلات هیدرولیکی برای معادلات سازه‌ای مانند یک بارگذاری خارجی تلقی می‌شوند. این روش تحلیل به نام روش حل ضربه کوچ کلاسیک نیز معروف می‌باشد.

مدل چهار معادله دیفرانسیل مرتبه اول، این چهار معادله عبارتند از دو معادله پیوستگی و مومنتم که معادلات هیدرولیکی می‌باشند و معادله ارتعاش محوری سازه که چون یک معادله مرتبه دوم است، خود به دو معادله دیفرانسیل مرتبه اول تبدیل می‌شود. این مدل برای لوله‌های مستقیم با حرکت محوری استفاده می‌شود. تنش محوری و سرعت محوری دیواره لوله علاوه بر فشار و سرعت متغیرهای دیگری هستند که در این چهار معادله دیفرانسیل مرتبه اول وجود دارند [Wiggert and Tijsseling, 2001]. در این مطالعه از این چهار معادله استفاده شده است.

مدل شش معادله دیفرانسیلی مرتبه اول، این مدل فقط زمانی که نیروهای اینرسی شعاعی هم بخواهند مورد استفاده قرار بگیرند لازم می‌شود. در این مدل علاوه بر مجهولات ذکر شده در مدل قبلی تنش هوک و سرعت شعاعی دیواره لوله نیز به آنها اضافه می‌شوند.

مدل چهارده معادله دیفرانسیل مرتبه اول، این چهارده معادله دیفرانسیل مرتبه اول عبارتند از: دو معادله هیدرولیکی، یک معادله ارتعاش محوری که چون مرتبه دوم است به دو معادله دیفرانسیل مرتبه اول تبدیل می‌شود. یک معادله ارتعاش پیچشی که این نیز چون مرتبه دوم است به دو معادله دیفرانسیل مرتبه اول تبدیل می‌شود، دو معادله ارتعاش خمشی در دو صفحه XY و XZ که چون معادلات ارتعاشی خمشی مرتبه چهار می‌باشند در نتیجه این دو معادله جمعاً به هشت معادله دیفرانسیلی مرتبه اول قابل تبدیل خواهند شد. این روش توانایی مدلسازی ارتعاش محوری لوله و سیال را در صفحه ارتعاشی و در خارج از صفحه ارتعاشی و نیز ارتعاش پیچشی را در حالت سه بعدی برای سیستم‌ها دارد.

۳-۱-۲- انواع مکانیزم اثرات کوپله

سه مکانیزم عمده در بررسی های انجام شده با توجه به اثرات متقابل سیال و سازه لوله و رفتار آن ها تاکنون شناخته شده است در واقع از این نظر که چه مکانیزم هایی می تواند باعث ایجاد پدیده FSI مورد بررسی قرار می گیرد [Wiggert and Tijsseling, 2001].

۳-۱-۲-۱- اثر تداخلی پواسن

مکانیزم کوپله پواسن ناشی از وجود نسبت پواسن برای مصالح لوله می باشد، که باعث تبدیل تنش های شعاعی به تنش های محوری می گردد. بررسی آن با استفاده از جمله ای که وابسته به نسبت پواسن مصالح است و در معادلات هیدرولیکی و سازه ای وجود دارد، انجام می شود. این اثر می تواند باعث تغییرات عمده ای در نمودارهای فشار سیال و تنش سازه گردد. 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.

۳-۲-۱-۲- اثر تداخلی اتصال

اگر نقاطی از سازه که در آنها تغییر مومنتم اتفاق می افتد مانند نقاط تغییر قطر (ونتوری ها)، اریفیس ها، تقاطع ها، زانویی ها، شیرها و سایر وسایل نصب شده بر روی شبکه، کاملاً به زمین تثبیت نشده باشند و امکان حرکت و جابه جایی داشته باشند، نوسانات فشار و سرعت ناشی از یک تحریک مکانیکی در سیستم می تواند باعث ایجاد یک اثر تداخلی دیگر به نام اثر کوپله اتصال گردد. بدیهی است که اگر از تکیه گاه گیردار در محل اتصالات و سازه های جانبی دیگر استفاده شود و در آن نقاط امکان حرکت، جابه جایی و تغییر شکل وجود نداشته باشد، کوپله اتصالی وجود نخواهد داشت.

چنانچه از تکیه گاه غلتکی و یا هر نوع تکیه گاهی که امکان جابه جایی و تغییر شکل محوری در آن وجود داشته باشد استفاده شود، به دلیل جابه جایی بوجود آمده، اثر تداخلی اتصال در آن نقاط تکیه گاهی به وجود خواهد آمد که باید در نظر گرفته شود.

جابه جایی محوری بوجود آمده ناشی از کوپله اتصال و شرایط مرزی، به سیستم لوله و اتصالات، خسارات زیادی را وارد می نماید و گاهی اثر این نوع کوپله جدی تر از کوپله پواسن بوده و می تواند باعث تشدید بیشتر تنش ها و تخریب سازه گردد. بعنوان مثال تکیه گاه ها از جنس الاستیک با سختی مناسب تا حدودی می توانند جابه جایی های بوجود آمده ناشی از ارتعاشات را کنترل نمایند و هم تنش های وارده به تکیه گاه را کاهش دهند اما به قابلیت میرایی سیستم کمکی نمی کنند. بنابراین نیاز به تکیه گاه هایی احساس می شود تا بتواند علاوه بر کنترل جابه جایی ها و کاهش تنش ها، به میرایی بیشتر و سریعتر سیستم کمک نمایند.

۳-۱-۲-۳- اثر تداخلی اصطکاک سیال با جداره لوله

مکانیزم کوپله اصطکاکی، ناشی از اصطکاک سیال با جداره لوله می باشد. این اثر تداخلی نیز مانند مکانیزم کوپله پواسن در شکل معادلات دیفرانسیلی هیدرولیکی و سازه ای وجود دارد. عملکرد این اثر به نحوی است که موجب کاهش فشارها و تنش های لوله می گردد (میرایی). به همین دلیل اکثر محققین، این اثر را جهت اطمینان دز طراحی در نظر نمی گیرند. برای بررسی دقیق آن باید یک مدل اصطکاک غیر ماندگار استفاده شود که در اینجا مورد نظر ما نیست [زنگانه، ۱۳۹۲].

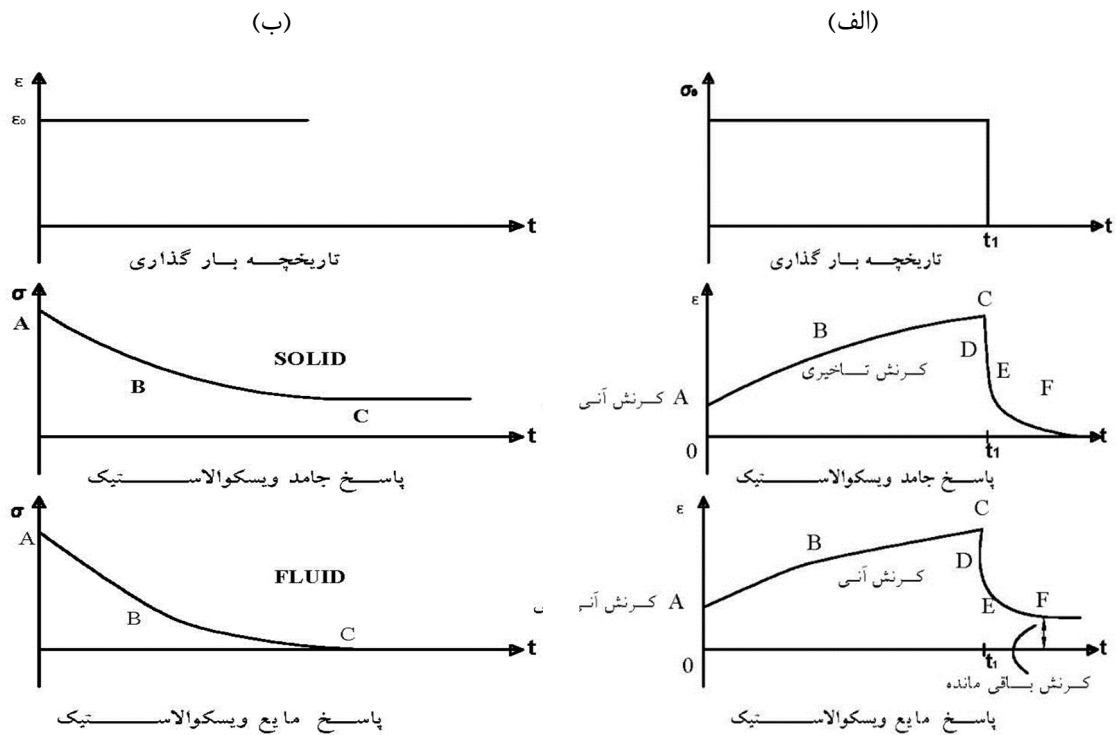
۳-۲- رفتار مواد ویسکوالاستیک

مواد ویسکوالاستیک (پلیمری) به دلیل خواص فیزیکی شان، باعث میرایی و استهلاک انرژی در یک سیستم می شوند. بنابراین به کارگیری مواد پلیمری در قسمت های مختلف از سیستم لوله می تواند در

کنترل ارتعاشات موثر واقع شوند. برای درک بهتر پاسخ مواد ویسکوالاستیک خطی، رفتار این مواد تحت تنش پله ای σ_0 تا زمان t_1 و پس از حذف آن، در (شکل ۳-۱-الف) نشان داده شده است (این تنش به گونه‌ای است که ارتعاشی در جسم ایجاد نمی‌شود). همانطوری که در این شکل مشاهده می‌شود پس از اعمال تنش در لحظه $t=0$ ، کرنش آنی‌ای (OA) مانند مواد جامد الاستیک رخ خواهد داد و پس از آن نیز کرنش به طور پیوسته، مانند مایع ویسکوز افزایش می‌یابد (ABC) که به آن کرنش تاخیری یا خزش^۱ نیز گفته می‌شود. در جامدات ویسکوالاستیک این افزایش کرنش به مقدار ثابت، باقی خواهد ماند و افزایش پیدا نمی‌کند. اما در مایعات ویسکوالاستیک کرنش تاخیری به کرنش ثابت خواهد رسید و در صورت عدم حذف تنش، کرنش با نرخ ثابت افزایش پیدا خواهد کرد. پس از رهاسازی تنش در لحظه t_1 ، مقداری از کرنش به طور آنی برگشته (CD) و مابقی در مواد جامد ویسکوالاستیک به طور کامل حذف خواهد شد در حالی که در مایع ویسکوالاستیک علاوه بر حذف بخشی از کرنش، مقداری دیگری از کرنش در جسم باقی خواهد ماند.

همچنین در (شکل ۳-۱-ب) پاسخ مایع و جامد ویسکوالاستیک را تحت اعمال کرنش پله ای ϵ_0 (تست رهاسازی) مشاهده نمود [۲].

¹ creep



شکل ۳-۱، پاسخ مکانیکی ماده ویسکوالاستیک در، (الف) تست خزش و (ب) تست رهاسازی [زنگانه، ۱۳۹۲]

جهت مدلسازی ریاضی یک ماده، باید آزمایش‌هایی انجام شود تا بتوان ثابت‌هایی را برای آن ماده خاص مورد نظر تعیین نمود. هرچه تعداد ثابت‌های مورد نیاز جهت توصیف آن ماده کمتر باشد می‌توان گفت که مدل ریاضی توصیف‌کننده رفتار مکانیکی آن ماده کامل‌تر است [کرامت، ۱۳۸۹].

تاکنون مدل‌های مختلفی برای توصیف ریاضی این مواد پیشنهاد شده است. این مدل‌ها که بر اساس ترکیب خاصی از تعدادی میراگر و فنر به صورت سری و موازی ارائه شده‌اند که می‌توانند سیستمی تولید کنند که رفتارشان معادل آن ماده ویسکوالاستیک مورد نظر باشد. از جمله این روش‌ها می‌توان به

مدل جامع کلوین-ویت^۱ و ماکسول^۲ اشاره نمود [Wineman and Rajagopal, 2000].

مطالعات انجام شده نشان داده‌اند که روابط حاکم بین تنش و کرنش در صورتی که مدل از تعداد نامحدودی المان فنر و میراگر تشکیل شده باشد شامل جملاتی از مشتقات زمانی تنش و کرنش از

¹ Generalized Kelvin-Voigt Model

² Maxwell Model

درجه صفر تا تعداد المان‌ها خواهد بود. این روابط حاکم اگرچه از دقت خوبی از نظر ریاضی برخوردارند، به دلیل وجود مشتقات از درجات بالا در آن‌ها، نمی‌توانند به منظور استفاده‌های مهندسی ابزار مناسبی باشند. برای رفع این مشکل با استفاده از اصل روی هم‌گذاری بولت‌زمن و یا به کارگیری یک سری محاسبات طولانی شامل استفاده از تبدیل لاپلاس جهت حذف مشتقات زمانی از درجات بالا، یک فرم انتگرالی معادل برای ارائه رابطه حاکم بین تنش و کرنش استخراج گردیده‌است که به تدریج مبنای اصلی بسیاری از روش‌های عددی قرار گرفته‌است.

تحقیقات اخیر در زمینه بررسی کارایی مدل‌های ریاضی ارائه شده برای توصیف مواد ویسکوالاستیک، منجر به ارائه مدل‌هایی مجازی (چون نمی‌توان ادعا کرد که معادل آرایش خاصی از فنرها و میراگرها هستند) گردیده‌است که شامل جملات با مشتقات کسری هستند.

با استفاده از این مدل‌ها می‌توان با به کارگیری تعداد ثابت‌های کمتری نسبت به مدل‌های با درجات مشتق اعداد طبیعی، رفتار یک ماده ویسکوالاستیک را شبیه‌سازی نمود. در این پایان‌نامه برای توصیف رفتار مواد ویسکوالاستیک از مدل جامع کلوین-ویت و فرم انتگرالی روابط ساختاری حاکم استفاده می‌شود.

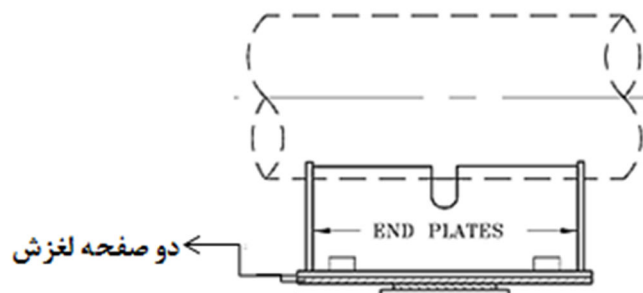
۳-۳- اصطکاک خشک^۱

اصطکاک نیروی مقاومی است که در برابر حرکت اجسام به وجود می‌آید. این نیرو همواره در خلاف جهت حرکت ایجاد شده و با حرکت اجسام مخالفت می‌کند.

طبق نظریه کلومب نیروی اصطکاک برابر با ضریب اصطکاک ضربدر مقدار نیروی عمود بر سطح می‌باشد. ضریب اصطکاک شامل دو نوع، ایستایی و جنبشی می‌باشد، زمانیکه که برآیند نیروهای وارده به جسم، بیشتر از نیروی اصطکاک ایستایی باشد، جسم شروع به حرکت می‌کند و نیروی اصطکاک

¹ Dry Friction

خلاف جهت حرکت جسم شکل می‌گیرد (لغزش^۱)، در غیر این صورت جسم ساکن می‌ماند (چسبندگی^۲) [Capone et.al,1993].



شکل ۲-۳ شماتیک تکیه‌گاه لغزشی

در مطالعات گذشته در مدلسازی تکیه‌گاه اصطکاکی (لغزنده) فرض شده است که تکیه‌گاه به همراه لوله بر روی لایه‌ای از جنس مصالحی با اصطکاک ناچیز که روی یک صفحه را پوشانده است (شکل ۲-۳)، می‌لغزد و رفتار غیرخطی آن از طریق انتقال بین شرایط چسبندگی و لغزش به صورت یک فنر با سختی بی نهایت (صلب) در حین چسبندگی و یک فنر با سختی صفر در حین لغزش مدلسازی شده

است [Park et.al, 1986 and Bakre et.al,2007]. حال در این تحقیق در نظر گرفته می‌شود که تکیه‌گاه-هایی از جنس ویسکوالاستیک به صورت لغزشی اجرا شود. بنابراین در این حالت دیگر رفتار تکیه‌گاه به صورت فنر با سختی بی نهایت (صلب) حین چسبندگی و فنر با سختی صفر حین لغزش فرض نخواهد شد، زیرا علاوه بر مکانیزم لغزش، امکان تغییرشکل برشی تکیه‌گاه ناشی از رفتار ویسکوالاستیک وجود خواهد داشت، بنابراین جابه‌جایی لوله ناشی از تغییرشکل تکیه‌گاه و حرکت احتمالی تکیه‌گاه بر روی صفحه لغزش خواهد بود. در نتیجه اثرات اصطکاک در تکیه‌گاه بصورت

¹ slip
² stick

غیرخطی از طریق انتقال بین شرایط چسبندگی (ایستایی) و لغزش (جنبشی) همزمان با در نظر گرفتن تغییر شکل برشی تکیه‌گاه در نظر گرفته خواهد شد. که در بخش ۳-۶-۳-۲-نحوه پیاده سازی آن به طور کامل بیان شده است.

۳-۴- معادلات حاکم

برای مدل‌سازی عددی یک سیستم ابتدا باید پارامترهای تاثیر گذار آن را بررسی کرد و در نهایت روابط حاکم بر آن‌ها را به نحوی که بیان کننده رفتار آن سیستم باشد استخراج کرد.

در اینجا، سیستم لوله با شرایط به کارگیری تکیه‌گاه‌های مختلف ویسکوالاستیک که در آن پدیده ضربه‌قوچ منجر به ایجاد اندرکنشی بین سیال و سازه می‌شود مورد بررسی قرار می‌گیرد. جنس دیواره لوله هم به صورت الاستیک و هم ویسکوالاستیک در نظر گرفته می‌شود. بنابراین بایستی معادلات حاکم بر حرکت سیال (پیوستگی و مومنتوم)، معادلات ارتعاش سازه و شرایط مرزی، با در نظر گرفتن اثرات واکنش‌های تکیه‌گاه‌های مختلف (محوری، برشی و لغزشی) و مواد ویسکوالاستیک بکار رفته در تکیه‌گاه و لوله و همچنین اثرات تداخلی استخراج گردد.

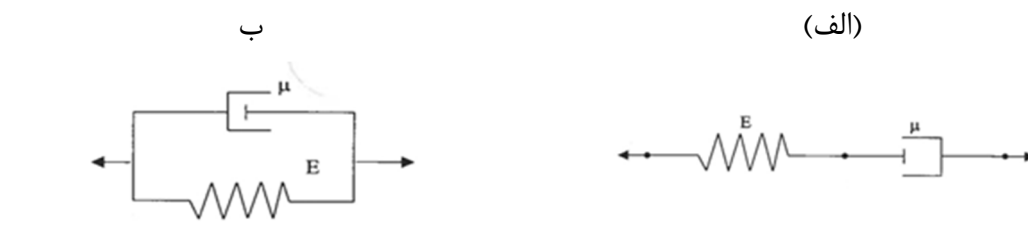
جهت مدل‌سازی تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک ابتدا بایستی با استفاده از مدل‌های مکانیکی مناسب، رفتار مواد ویسکوالاستیک را شبیه‌سازی نمود و روابط ساختاری (تنش- کرنش) حاکم بر این مواد را بدست آورد. سپس معادله ارتعاش محوری لوله الاستیک و ویسکوالاستیک را به نحوی که جهت اعمال شرایط مرزی تکیه‌گاه ویسکوالاستیک مناسب است، در حالت آنالیز تداخلی استخراج نمود.

۳-۴-۱- مدل‌های مکانیکی مواد ویسکوالاستیک

مواد ویسکوالاستیک مصالحی هستند که ویژگی‌های سیالات (ویسکوز) و جامدات (الاستیک) را دارا می‌باشند. منظور از رفتار خطی مواد ویسکو الاستیک شامل صورت‌هایی از پاسخ مکانیکی الاستیک

خطی و ویسکوز خطی می‌باشد. (شکل ۳-۳) رفتار این مواد را نشان می‌دهد. رفتار الاستیک مصالح توسط فنر خطی و رفتار ویسکوز توسط میراگر مدل می‌شود. در فنر خطی رابطه نیرو-تغییر شکل به صورت $F_s = k \cdot u_s$ می‌باشد که در آن نیرو در فنر، F_s جابه‌جایی و K ثابت فنر است. در میراگر ویسکوز رابطه نیرو-تغییر شکل به صورت $F_D = c\dot{u}$ است که در آن نیرو در میراگر، c پارامتری بر حسب ویسکوزیته میراگر و \dot{u} مشتق جابه‌جایی نسبت به زمان می‌باشد.

در نتیجه می‌توان جهت بیان رفتار خطی ویسکوالاستیک سیستمی متشکل از فنر و میراگر را در نظر گرفت که دو ترکیب ساده از فنرها و میراگرها بنام کلین-ویت و ماکسول ارائه شده است. شکل ۳-۳ الف-مدل ماکسول و شکل ۳-۳ ب-مدل کلین-ویت را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳ مدل مکانیکی، الف: (ماکسول)، ب: (کلین-ویت)

در مدل ارائه شده ماکسول یک فنر و یک میراگر به صورت سری به هم متصل شده‌اند و نیرو در کل سیستم برابر است با $F(t) = F_s(t) = F_D(t)$ و جابه‌جایی کل برابر جمع جابه‌جایی هر یک از اجزا $(u(t) = u_s(t) + u_D(t))$ می‌باشد.

به طور کل جهت بررسی پاسخ این مدل‌ها و مقایسه آن با رفتار واقعی مواد ویسکوالاستیک دو تست انجام می‌شود. یکی بررسی پاسخ خزش^۱ تحت اعمال تنش پله‌ای σ_0 (تست خزش) و دیگری بررسی پاسخ رهاسازی تنش^۲ تحت اعمال کرنش پله‌ای ϵ_0 (تست رهاسازی).

¹ Creep response

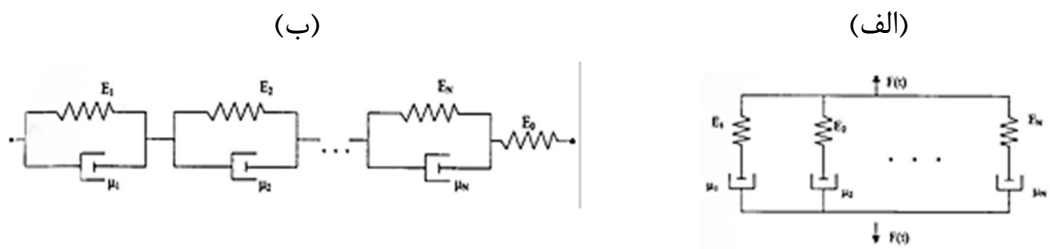
² Stress relaxation response

تست رهاسازی بر روی این مدل نشان می دهد بعد از رهاسازی تنش به طور کامل به صفر نمی رسد در نتیجه بیان کننده رفتار مایع ویسکوز می باشد و همچنین در تست خزش نیز پس از کرنش آنی به نرخ کرنش ثابت خواهد رسید. بنابراین این مدل برای مایع ویسکوز مناسب است.

در مدل کلوین-ویت، از یک فنر و یک میرگر به صورت موازی بهم متصل شده، تشکیل شده است. بنابراین در این حالت نیرو کل سیستم برابر است با $F(t) = F_s(t) + F_D(t)$ و جابه جایی کل با جابه جایی هر یک از اجزا برابر است $(u(t) = u_s(t) = u_D(t))$.

برای انجام تست خزش در این مدل، برای ایجاد تغییرشکل ناگهانی، باید میراگر به صورت ناگهانی تغییر شکل دهد، که برای انجام آن نیاز به نیروی زیادی می باشد. بنابراین پاسخ آنی رخ نخواهد داد. در تست رهاسازی، برای ثابت ماندن کرنش، جهت نگه داشتن میراگر ویسکوز در یک طول ثابت نیاز به هیچ نیرویی نیست ولی برای کشیده نگه داشتن فنر در طی کرنش، باید نیروی متناسب، به سیستم اعمال شود. بنابراین در تست رهاسازی، جهت ثابت ماندن کرنش نیازمند وجود تنش ثابت در سیستم می باشد و رهاسازی تنش رخ نخواهد داد. این دو پاسخ تست خزش و تست رهاسازی بر روی مدل کلوین-ویت پایه برخلاف رفتار واقعی مواد ویسکوالاستیک می باشد.

براساس پاسخ دو مدل پایه گفته شده در تست خزش و رهاسازی، این دو مدل به خوبی نمی توانند رفتار واقعی مواد ویسکوالاستیک را توصیف کنند، لذا باید ترکیب بهتری از فنرها و میراگرها، جهت مدل سازی رفتار مواد ویسکوالاستیک بکار گرفته شود. مانند مدل تعمیم یافته کلوین-ویت. (شکل ۳-۴-الف) که شامل N المان کلوین - ویت و یک فنر که به صورت سری به یکدیگر متصل شده اند و مدل تعمیم یافته مکسول. (شکل ۳-۴-ب) که شامل N المان مکسول به صورت موازی می باشد را مورد استفاده قرار داد. این دو مدل نیز هر کدام برای نوع خاصی از ماده ویسکوالاستیک مناسب می باشند. مدل مکسول تعمیم یافته برای مدل سازی رفتار مایع ویسکوالاستیک و مدل جامع کلوین-ویت برای مدل سازی رفتار جامد ویسکوالاستیک مناسب تر است. [Wineman and Rajagopal, 2000]



شکل ۳-۴ الف: مدل مکانیکی تعمیم یافته ماکسول، ب: مدل مکانیکی تعمیم یافته کلونین ویت

در این پایان نامه از مدل جامع کلونین-ویت برای توصیف رفتار مواد ویسکو الاستیک به کار رفته در تکیه‌گاه‌ها و دیواره لوله استفاده شده است.

حال با یافتن و به کارگیری رابطه دیفرانسیلی حاکم بر اساس آرایش فنرها و میراگرها در این مدل‌ها، می‌توان از آن‌ها در مدلسازی ریاضی مواد ویسکو الاستیک استفاده کرد و مدل تعریف شده کارایی خواهد داشت.

۳-۴-۲- معادلات ساختاری برای پاسخ یک بعدی مواد ویسکو الاستیک

منظور از روابط ریاضی حاکم، یافتن رابطه‌ای بر اساس تنش و کرنش این مواد که با مدل‌های مکانیکی تعریف شده قابل تطبیق باشند. این کار را می‌توان با نوشتن معادلات نیرو و تغییر شکل و سپس قیاس آن با تنش و کرنش در این مدل‌ها بدست آورد. به عنوان مثال برای مدل پایه‌ای کلونین-ویت همانطور که گفته شد، نیرو در کل سیستم برابر است، با $F = ku_s + c\dot{u}_D$ چنانچه این رابطه‌ی نیرو-تغییر شکل بر حسب تنش و کرنش نوشته شود، به صورت زیر خواهد بود.

$$p_0 \sigma = q_0 \varepsilon + q_1 \dot{\varepsilon}, \quad p_0 = 1, \quad q_1 = \mu \quad (1-3)$$

که در آن σ تنش، ε کرنش، E مدول الاستیسیته فنر، μ ویسکوزیته میراگر و $\dot{\varepsilon}$ آهنگ تغییر کرنش است.

با استفاده از آنالیز مشابهی که جهت بدست آوردن معادله (۳-۱) انجام شده است، اما با انجام مراحل پیچیده‌تر، می‌توان ثابت کرد که رابطه ساختاری حاکم برای مدل تعمیم یافته کلوین-ویت به شکل زیر می‌باشد [Wineman and Rajagopal, 2000].

$$p_0 \sigma + \sum_{k=1}^{N_{KV}} p_k \frac{d^k \sigma}{dt^k} = q_0 \varepsilon + \sum_{k=1}^{N_{KV}} q_k \frac{d^k \varepsilon}{dt^k} \quad (2-3)$$

که در آن N_{KV} تعداد المان‌های کلوین-ویت بکار رفته و ضرایب p و q توابعی از مدول الاستیسیته فنر و ویسکوزیته میراگر مربوط به هر المان می‌باشند.

در اینجا رابطه (۳-۲) برای مدل تعمیم یافته کلوین-ویت با یک المان ($N_{KV} = 1$) است که معروف به مدل سه پارامتری کلوین-ویت می‌باشد، اثبات خواهد شد. روش ارائه شده به راحتی قابل تعمیم برای تعداد المان‌های بیشتر می‌باشد.

روابط اصلی که برای یک کلوین-ویت با یک المان ($N_{KV} = 1$) صادق هستند عبارتند از:

$$\sigma = \sigma_0 = \sigma_1 \quad (3-3)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \quad (4-3)$$

اندیس 0 نشان دهنده پارامترهای مربوط به یک فنر تنها و اندیس 1 نشان دهنده خصوصیات مربوط به یک المان کلوین-ویت است و متغیرهای بدون اندیس نشان دهنده ویژگی‌های کل سیستم است. σ_0 و σ_1 به صورت زیر قابل بیان هستند.

$$\sigma = \sigma_0 = E_0 \varepsilon_0 \quad (5-3)$$

$$\sigma = \sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 + \mu_1 \dot{\varepsilon}_1 \quad (6-3)$$

برای بدست آوردن یک رابطه دیفرانسیلی بنیادی بین تنش و کرنش، رابطه (۳-۴) که در آن ε_0 بر حسب σ با استفاده از (۳-۵) قابل بیان است را در E_1 ضرب می نماییم. از سوی دیگر، با توجه به رابطه (۳-۴) از آن نسبت به زمان مشتق گیری نموده و در μ_1 ضرب می نماییم. در نهایت دو رابطه اخیر حاصله را با هم جمع می نماییم، رابطه زیر حاصل خواهد شد.

$$E_1 \varepsilon + \mu_1 \dot{\varepsilon} = \frac{E_1}{E_0} \sigma + \frac{\mu_1}{E_0} \dot{\sigma} + E_1 \varepsilon_1 + \mu_1 \dot{\varepsilon}_1 \quad (۷-۳)$$

در نهایت رابطه ساختاری حاکم بر مدل سه پارمتری به صورت زیر خواهد بود:

$$P_0 = 1, \quad p_1 = \frac{\mu_1}{E_0 + E_1}, \quad P_0 = \frac{E_0 E_1}{E_0 + E_1}, \quad q_1 = \frac{E_0 \mu_1}{E_0 + E_1} \quad (۸-۳)$$

این رابطه، معادل رابطه (۳-۲) حالتی که $N_{KV} = I$ می باشد است.

همانطور که مشاهده گردید رابطه حاکم بین تنش و کرنش برای مواد ویسکوالاستیک خطی شامل جملاتی از مشتقات زمانی تنش و کرنش با مرتبه تعداد المانهای کلین-ویت (N_{KV}) می باشد. در نتیجه با استفاده از تبدیل لاپلاس و سپس معکوس آن [Wineman and Rajagopal, 2000] یک شکل جایگزین برای بیان رابطه تنش و کرنش پیدا می شود که در نهایت می توان رابطه تنش و کرنش را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t)J(0) + \int_0^t \sigma(t-s) \frac{dJ(s)}{ds} ds = (\sigma * dJ)(t) = (d\sigma * J)(t) \quad (۹-۳)$$

" * " نشان دهنده اپراتور کانولوشن و " *d " اپراتور استیلیس کانولوشن می باشند. اپراتور استیلیس کانولوشن نسبت به اپراتور کانولوشن معمولی دارای یک ترم اضافی $\sigma(t)J(0)$ نشانگر پاسخ آنی

(الاستیک) سیستم است می‌باشد. در فرمول فوق تابع خزش تطابقی $J(t)$ مطابق با مدل تعمیم یافته کلوین-ویت به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$J(t) := J_0 + \sum_{k=1}^{NKV} J_k (1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}}) \quad (10-3)$$

که در آن $J_0 = I/E$ نشان دهنده پاسخ آنی مصالح ویسکوالاستیک، $J_k = I/E_k$ شان دهنده خزش تطابقی فنر مربوط به المان k ام کلوین - ویت و E_k مدول الاستیسیته فنر k ام و τ_k زمان تاخیر میراگر k ام است. در اینجا $\tau_k := \mu_k / E_k$ که در آن μ_k ویسکوزیته میراگر k ام است (منظور از τ_k تساوی تعریف شده است). معادله (10-3) برای یک مدل سه پارامتری کلوین-ویت در صفحه بعد اثبات می‌شوند.

جهت بدست آمدن یک فرمولاسیون انتگرالی بین تنش و کرنش، اپراتور لاپلاس به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$L(f(t)) = \bar{f}(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt. \quad (11-3)$$

با استفاده از انتگرالگیری جزء به جزء می‌توان ثابت کرد که تبدیل لاپلاس مشتق یک تابع به صورت زیر بدست می‌آید.

$$L\left(\frac{df(t)}{dt}\right) = sL(f(t)) - f(0) = s\bar{f}(t) - f(0). \quad (12-3)$$

در راستای این اپراتور، تابع f_3 که به عنوان انتگرال کانولوشن¹ (یا ریمان کانولوشن) دو تابع f_1 و f_2 خوانده می‌شود و به صورت $f_1 * f_2$ نشان داده می‌شود به صورت زیر تعریف می‌گردد.

¹ convolution integral

$$f_3(t) = \int_0^t f_1(t-s)f_2(s)ds, \quad (13-3)$$

در نتیجه داریم:

$$L(f_3(t)) = \bar{f}_3(s) = L(f_1(t) * f_2(t)) = L(f_1(t))L(f_2(t)) = \bar{f}_1(s)\bar{f}_2(s) \quad (14-3)$$

شرط اولیه ضروری جهت معادله مربوط به مدل سه پارامتری کلونین ویت (۸-۳) صورت زیر می‌باشد [Wineman and Rajagopal, 2000].

$$p_1\sigma(0) = q_1\varepsilon(0), \quad (15-3)$$

اکنون چنانچه از رابطه (۱۳-۳) لاپلاس گیری شود خواهیم داشت.

$$p_0\bar{\sigma} + p_1(s\bar{\sigma} - \sigma(0)) = q_0\bar{\varepsilon} + q_1(s\bar{\varepsilon} - \varepsilon(0)), \quad (16-3)$$

که با توجه به شرط اولیه (۱۵-۳) و معادله (۱۴-۳) خواهیم داشت:

$$\bar{\varepsilon}(s) = \frac{p_0 + p_1s}{q_0 + q_1s} \bar{\sigma}(s), \quad (17-3)$$

با فرض $t > 0$ و $\sigma(t) = \sigma_0$ ، و تبدیل لاپلاس $(L(f(t) = 1) = 1/s)$ ، خواهیم داشت:

$$L(\sigma(t)) = \bar{\sigma}(s) = \sigma_0 \frac{1}{s} \quad (18-3)$$

چنانچه معادله (۱۸-۳) را در معادله (۱۷-۳) قرار دهیم منجر به رابطه زیر خواهد شد.

$$\bar{\varepsilon}(s) = \sigma_0 \left[\frac{p_0}{q_0} \frac{1}{s} + \left(\frac{p_1}{q_1} - \frac{p_0}{q_0} \right) \frac{1}{s + \frac{q_0}{q_1}} \right] \quad (19-3)$$

با توجه به اینکه می دانیم $L(f(t) = e^{ct}) = 1/(s - c)$ ، تبدیل معکوس لاپلاس معادله (۱۹-۳) به صورت زیر می باشد.

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{p_0}{q_0} + \left(\frac{p_1}{q_1} - \frac{p_0}{q_0} \right) e^{-\left(\frac{q_0}{q_1}\right)t} \right] \quad (۲۰-۳)$$

در این صورت با توجه به تعریف تابع خزش تطابقی [Wineman and Rajagopal, 2000] برای مدل سه پارامتری کلوین-ویت، این تابع به صورت زیر بدست می آید.

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{p_0}{q_0} + \left(\frac{p_1}{q_1} - \frac{p_0}{q_0} \right) e^{-\left(\frac{q_0}{q_1}\right)t} \quad (۲۱-۳)$$

چنانچه در این رابطه، پارامترهای p_0, q_0, p_1 و q_1 با توجه به رابطه (۸-۳) جایگذاری و سپس ساده شود، معادله تابع خزش تطابقی (۱۰-۳) برای $N_{KV} = I$ اثبات می شود.

برای اثبات فرم انتگرالی رابطه ساختاری (۹-۳) برای مدل سه پارامتری، ابتدا از رابطه (۲۰-۳) تبدیل لاپلاس گرفته $(\bar{J}(s) = \bar{\varepsilon}(s)/\sigma_0)$ و در فرم ساده رابطه (۱۹-۳) می شود، که به رابطه زیر منجر می شود:

$$\bar{J}(s) = \frac{1}{s} \frac{p_0 + p_1 s}{q_0 + q_1 s} \quad (۲۲-۳)$$

سپس اگر رابطه (۱۹-۳) با رابطه (۱۷-۳) ترکیب شوند، می توان تبدیل لاپلاس رابطه ساختاری (۸-۳) را به طور مستقیم بر حسب $\bar{J}(s)$ نوشت:

$$\bar{\varepsilon}(s) = s \bar{J}(s) \bar{\sigma}(s) \quad (۲۳-۳)$$

و در نهایت معادله (۲۳-۳) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\bar{\varepsilon}(s) = \bar{\sigma}(s)(s\bar{J}(s) - J(0)) + \bar{\sigma}(s)J(0) \quad (24-3)$$

از تعریف، رابطه $(E_0 = 1/J_0, E_1 = 1/J_1, \tau_1 = \mu_1/E_1)$ در معادله $(3-18)$ و جاگذاری در رابطه $(23-3)$ به صورت زیر قابل نوشتن است.

$$\bar{J}(s) = \left(\frac{J_0 + J_1}{s} - \frac{J_1\tau_1}{s\tau_1 + 1} \right) \quad (25-3)$$

آنگاه با توجه به رابطه $(3-12)$ ، رابطه $(24-3)$ به صورت زیر قابل تبدیل است.

$$\bar{\varepsilon}(s) = \bar{\sigma}(s)L\left(\frac{dJ(t)}{dt}\right) + \bar{\sigma}(s)J(0), \quad J(t) = J_0 + J_1(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}}) \quad (26-3)$$

و با توجه به خاصیت $(3-16)$ به فرم زیر در خواهد آمد.

$$\bar{\varepsilon}(s) = L\left(\sigma(t) * \frac{dJ(t)}{dt}\right) + \bar{\sigma}(s)J(0), \quad J(t) = J_0 + J_1(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}}) \quad (27-3)$$

که در حقیقت این رابطه، تبدیل لاپلاس گرفته شده از رابطه زیر است.

$$\varepsilon(t) = \sigma(t)J(0) + \int_0^t \sigma(t-s) \frac{dJ(s)}{ds} ds = (\sigma * dJ)(t) \quad (28-3)$$

به طورکل این اپراتور برای دو تابع $X(t)$ و $Y(t)$ که باید برای کلیه $t < 0$ مقدارشان صفر بوده و برای

$t \geq 0$ تکه‌ای پیوسته باشند) به صورت زیر تعریف می شود:

$$X * dY(t) := X(t)Y(0) + \int_0^t X(t-s) \frac{dY(s)}{ds} ds \quad (29-3)$$

همچنین می توان رابطه ساختاری مدل جامع کلین-ویت مواد ویسکوالاستیک را به صورت تنش بر حسب کرنش نوشت که برابر خواهد بود با [Wineman and Rajagopal, 2000]:

$$\begin{aligned}\sigma(t) &= \int_{-\infty}^t \varepsilon(t-s) \frac{dG}{ds}(s) ds \\ &= \varepsilon(t)G(0) + \int_0^t \varepsilon(t-s) \frac{dG}{ds}(s) ds = (\varepsilon * dG)(t)\end{aligned}\quad (30-3)$$

که $G(t)$ تابع رهاسازی به صورت زیر تعریف می شود.

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{K=1}^{N_{KV}} G_k e^{-t/\hat{\tau}_k} \quad (31-3)$$

در این رابطه $\hat{\tau}_k$ ، زمان تاخیر رهاسازی المان k ام و $G_{\infty} = G(\infty)$ است که بیانگر تنش نهایی تحت کرنش واحد می باشد. اما برای مشخصات تابع رهاسازی تنش (G_k و $\hat{\tau}_k$) نمی توان روابط ساده و مستقیمی بر حسب فنرها و میراگرها مانند آنچه برای مشخصات تابع خزش تطابقی (J_k و τ_k) ذکر شد، ارائه نمود. لذا بر این اساس نمی توان توصیف دقیقی از اثرات پارامترهای این تابع بر رفتار مدل ویسکوالاستیک داشت. در حالی که در تابع خزش این چنین نیست و می توان گفت به عنوان مثال چنانچه J_1 زیاد شود، E_1 یا مدول الاستیسیته فنر المان یکم زیاد شده است و زمان تاخیر آن المان کاهش یافته است.

معادله (30-3) و (28-3) بیان می کند که تنش و کرنش کل سیستم با مصالح ویسکوالاستیک از دو جزء الاستیک و ویسکوالاستیک تشکیل شده است. بخش ویسکوالاستیک تابعی از کل تاریخچه بارگذاری وارده بر سیستم و توابع خزش تطابقی می باشد. پاسخ ویسکوالاستیک در حقیقت از روی هم انباشته شدن پاسخ های جزئی مربوط به هر جزء بارگذاری از ابتدا تا لحظه فعلی بدست می آید. بر طبق مطالب گفته شده تابع $G(t)$ معادل E (مدول الاستیسیته) در مصالح الاستیک می باشد.

۳-۴-۲-۱- پارامترهای توابع خزش تطابقی و رهاسازی تنش و رابطه ی بین آن دو تابع

[زنگانه، ۱۳۹۲]

برای یافتن رفتار خزشی یا رهاسازی یک ماده ویسکوالاستیک راهی بجز انجام تست‌هایی که این ویژگی‌ها را به صورت کمی تعیین نمایند وجود ندارد. زیرا این رفتار به طور مستقیم به ساختار مولکولی مواد، درجه حرارت محیط و تاریخچه بارگذاری وارده بر آن ماده مربوط می‌شود. برای اندازه گیری این ویژگی‌ها توابعی بنام‌های تابع خزش تطابقی به شکل فرمول (۳-۱۰) و تابع رهاسازی تنش به شکل فرمول (۳-۳۱) ارائه می‌گردد. علت نامگذاری "خزش تطابقی" ماهیت تغییر مکان تدریجی در زمان که از تطبیق آن‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی تعیین می‌شوند، می‌باشد.

به طور کل جهت تعیین پارامترهای توابع خزش تطابقی یا رهاسازی تنش ماده ویسکوالاستیک خاص بکار رفته در بحث آنالیز ضربه قوچ در لوله‌ها دو روش وجود دارد. این دو روش به روش‌های مستقیم و غیر مستقیم معروف می‌باشند. در روش مستقیم با انجام آزمایش بر روی ماده ویسکوالاستیک به طور مستقیم، مشخصات آن را می‌توان تخمین زد. در این روش می‌توان یا با انجام تست خزش مانند آنچه که گفته شد، با بررسی رفتار خزشی ماده ویسکوالاستیک، پارامترهای تابع خزشی تطابقی آن J_K و τ_K ها در فرمول (۳-۱۰) را بدست آورد یا با انجام تست رهاسازی که در آن پس از ایجاد یک کرنش ثابت در نمونه، کاهش تدریجی تنش در طول زمان اندازه گیری می‌شود، پارامترهای تابع رهاسازی \hat{t}_K ، G_K و G_∞ در فرمول (۳-۳۱) تخمین زد. البته به دلیل آسان تر بودن تست خزش، و وجود روابط ساده و مستقیم بین پارامترهای تابع خزش و خصوصیات فنرها و میراگر، معمولاً این آزمایش انجام می‌شود.

در روش دیگر (روش غیر مستقیم) که بوسیله کواس و همکاران [Covvas et.al,2005] و سوارس و همکاران [Soares et.al, 2009] پیشنهاد گردید، ابتدا با انجام آزمایشاتی، فشارهای ناشی از پدیده ضربه قوچ در سیستم لوله با ماده ویسکوالاستیک مورد نظر اندازه گیری می‌شود. سپس پارامترهای تابع خزش تطابقی در حل عددی جریان ناپایدار در سیستم لوله به نحوی تخمین زده می‌شود که

بتواند، فشارهایی تا حد ممکن نزدیک به مقادیر اندازه گیری شده آزمایشگاهی تولید نماید. علت نامگذاری غیر مستقیم برای این روش این است که ویژگی‌های فیزیکی مواد ویسکوالاستیک بکار رفته در سیستم لوله، بجای انجام تست‌های مستقیم بر روی مصالح، بوسیله انجام تست بر روی جریان سیال به طور غیر مستقیم تعیین می گردند. این روش که به عنوان کالیبراسیون توابع خزش به وسیله جریان گذرا خوانده می شود از دقت بیشتری در آنالیزهای ضربه قوچ و تداخل سیال - سازه برخوردار می باشد زیرا بدینوسیله اثرات تاریخچه بارگذاری‌های قبلی بر روی سیستم لوله و همچنین اثرات حرارت و محیط و شکل سیستم لوله که در تست‌های مستقیم به درستی وارد نمی گردند هم در اینجا در تعیین ضرایب به کار گرفته می شوند.

می توان رابطه‌ای ریاضی بین توابع خزش و رهاسازی بدست آورد. برای این منظور با توجه به معادله، (۹-۳) برای تنش پله ای σ_0 کرنش برابر است با، $\varepsilon(t) = \sigma_0 J(t)$ که با جایگذاری در معادله، (۳۰-۳) خواهیم داشت.

$$\sigma_0 = \sigma_0 J(t) * dG(t) \quad \Rightarrow \quad J(t) * dG(t) = 1 \quad (۳۲-۳)$$

اگر در عبارت دوم رابطه (۳۲-۳)، $t = 0$ باشد و با استفاده از اپراتور استیلیس کانولوشن بسط داده شود، رابطه زیر بدست می آید.

$$J(0) * dG(0) = 1 \quad (۳۳-۳)$$

که در آن $G(0)$ با توجه به تعریف تابع رهاسازی تنش (رابطه (۳۱-۳)) برابر $G(0) = G(\infty) + \sum_{K=1}^{N_{KV}} G_K$ می باشد. همچنین با قرار دادن $t = \infty$ در رابطه (۳۲-۳) و انجام یک سری عملیات ریاضی خواهیم داشت.

$$J(\infty) * dG(\infty) = 1 \quad (۳۴-۳)$$

که در آن با توجه به تابع خزش تطابقی رابطه (۳-۱۰)، $J(\infty) = \sum_{k=0}^{N_{KV}} J_k$ خواهد بود.

بنابراین با داشتن مشخصات تابع خزش تطابقی (J_k و J_0) می توان با استفاده از رابطه، (۳-۳۱) مشخصه های تابع رهاسازی (G_k و G_0) و یا برعکس را بدست آورد. در حالت کلی بایستی پارامترهای توابع خزش تطابقی و یا توابع رهاسازی تنش به عنوان بخشی از داده های ضروری ورودی جهت انجام آنالیز موجود باشند.

۳-۴-۲-۲- روابط تنش - کرنش ویسکوالاستیک در حالت سه بعدی

رابطه (۳-۳۰) و (۳-۲۸) تنها در بارگذاری یک بعدی صادق است و چنانچه بارگذاری در حالت سه بعدی مورد نظر باشد تغییر شکل ها به علت نسبت پواسن ν که یکی از مشخصه های بسیار مهم مصالح می باشد و در مواد ویسکوالاستیک که تابعی از زمان می باشد نیز باید در نظر گرفته شوند. بنابراین رابطه بنیادی بین تنش و کرنش در جهت محوری z در یک دستگاه مختصات استوانه ای به صورت زیر خواهد بود.

$$\varepsilon_z = \sigma_z * dJ - (\varepsilon_\phi + \varepsilon_r) * dv = \sigma_z * dJ - (\sigma_\phi * dJ) * dv - (\sigma_r * dJ) * dv \quad (۳-۳۵)$$

در اینجا دو فرض ساده کننده اساسی در فرمول در نظر گرفته می شود نخست اینکه نسبت پواسن در کل زمان پاسخ گذرا ثابت فرض می شود. در این صورت خواهیم داشت.

$$\varepsilon_z = \sigma_z * dJ - \nu(\varepsilon_\phi + \varepsilon_r) = \sigma_z * dJ - \nu((\sigma_\phi * dJ) - (\sigma_r * dJ)) \quad (۳-۳۶)$$

دوم اینکه با توجه به ویژگی‌های لوله‌های جدار نازک ($\sigma_\phi = \bar{P}D/2e$, $\sigma_r = \bar{P}$) که در آن \bar{P} نشان‌دهنده فشار دینامیکی می‌باشد) از σ_r در مقایسه با σ_ϕ صرفنظر می‌شود. با توجه به این امر رابطه (۳-۳۵) به این صورت در می‌آید.

$$\varepsilon_z = \sigma_z * dJ - v((\sigma_\phi * dJ)) \quad (۳-۳۷)$$

۳-۴-۲-۳ پاسخ برشی مصالح ویسکوالاستیک [Wineman and Rajagopal, 2000]

برای بیان رفتار برشی مصالح ویسکوالاستیک، $\mu_R(t)$ بعنوان تابع رهاسازی تنش برشی و $\mu_C(t)$ بعنوان تابع خزش برشی تعریف می‌شود. به بیانی دیگر $\mu_R(t)$ متناظر با $G(t)$ و $\mu_C(t)$ متناظر با $J(t)$ می‌باشد، در نتیجه داریم:

$$\tau_{yz}(t) = \gamma_{yz} * d\mu_R, \gamma_{yz}(t) = \tau_{yz} * d\mu_C \quad (۳-۳۸)$$

$$\mu_R * d\mu_C = \mu_C * d\mu_R = 1 \quad (۳-۳۹)$$

که $\mu_C(t)$ و $\mu_R(t)$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\mu_C(t) = 2(1 + v(t)) * dJ = 2 \left[J(0)(1 + v(t)) + \int_0^t v(t-s) \frac{dJ}{ds}(s) ds \right], \quad (۳-۴۰)$$

$$G(t) = 2(1 + v(t)) * d\mu_R = 2 \left[\mu_R(0)(1 + v(t)) + \int_0^t v(t-s) \frac{d\mu_R}{ds}(s) ds \right], \quad (۳-۴۱)$$

که $\mu_R(0)$ در رابطه (۳-۴۱) معادل مدول برشی در مواد الاستیک و برابر $E/(2(1 + v))$ می‌باشد.

اثبات روابط (۳-۴۰) و (۳-۴۱) به طور کامل در مرجع [Wineman and Rajagopal, 2000] آورده شده است. این روابط هنگامی به کار برده می‌شوند که نسبت پواسن نسبت به زمان متغیر باشد. در

نتیجه با توجه به فرض ساده کننده ثابت بودن نسبت پواسن در کل زمان، روابط به صورت زیر تغییر خواهند کرد.

$$\mu_C(t) = 2(1 + \nu)J(t) \quad (42-3)$$

$$G(t) = 2(1 + \nu)\mu_R(t) \quad \Rightarrow \quad \mu_R(t) = \left(\frac{1}{2(1 + \nu)}\right)G(t) \quad (43-3)$$

۳-۴-۲-۴ اثر مواد ویسکوالاستیک لوله و تکیه گاه بر تداخل سیال-سازه [زنگانه، ۱۳۹۲]

بروز جریان غیرماندگار در سیستم لوله منجر به بروز فشارهای دینامیکی در سازه لوله و ایجاد تغییر شکل محیطی در آن خواهد شد. در صورت در نظر گرفتن نسبت پواسن این کرنش‌های محیطی به کرنش‌های محوری تبدیل می‌شوند. همچنین با در نظر گرفتن کوپله اتصال، تنش محوری که در محل شیر، ناشی از فشار سیال ایجاد می‌شود می‌تواند خود، در سازه لوله تغییر شکل‌هایی ایجاد نماید. همانطور که در بخش‌های قبل نیز اشاره شده است در مواد ویسکوالاستیک، تغییر شکل‌ها از دو بخش الاستیک (آنی) و ویسکوالاستیک (تاخیری) تشکیل می‌شود. تغییر شکل‌های تاخیری می‌تواند بر رفتار جریان غیرماندگار تاثیر بگذارد و باعث تغییر فشارها گردد. تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک به دلیل قابلیت ارتجاعی، جابه‌جایی در آن‌ها و بروز رفتارها و تغییر شکل‌های تاخیری، می‌تواند بر جابه‌جایی‌های ایجاد شده در سازه لوله بر اثر نیروهای هیدرولیکی اثر بگذارد و منجر به تغییر رفتار سیال در جریان غیر ماندگار شود و همچنین باعث کاهش تنش‌های وارده بر تکیه‌گاه و سازه لوله گردد.

۳-۴-۳-۳ رابطه نیروی اصطکاک

برای نیروی اصطکاک بین دو سطح (خشک) دو رابطه پیشنهاد شده است، رابطه اول برای زمانی است که برآیند نیروهای وارده به جسم از نیروی اصطکاک ایستایی کمتر باشد، جسم ساکن می‌ماند

(چسبندگی) و نیروی اصطکاک بین جسم و سطحی که روی آن قرار گرفته است، برابر با نیروی اصطکاک ایستایی است.

$$F_{st} = \mu_{st}(N) \quad (۴۴-۳)$$

که در رابطه (۴۴-۳)، F_{st} نیروی اصطکاک ایستایی، N نیروی عمود بر سطح و μ_{st} ضریب اصطکاک ایستایی می باشد.

رابطه دوم زمانی است که برآیند نیروی های وارد بر جسم از نیروی اصطکاک ایستایی (رابطه (۴۴-۳)) بیشتر باشد در نتیجه باعث لغزش و حرکت جسم می شود، در این حالت نیروی اصطکاک به وجود آمده بین جسم و سطحی که روی آن می لغزد، برابر خواهد بود با نیروی اصطکاک لغزشی و از رابطه زیر به دست می آید.

$$F_k = \mu_k(N) \quad (۴۵-۳)$$

که در رابطه (۴۵-۳)، F_k نیروی اصطکاک جنبشی و μ_k ضریب اصطکاک جنبشی می باشد.

۳-۴-۳-۱ اثر اصطکاک تکیه گاه بر تداخل سیال-سازه

ایجاد اصطکاک در تکیه گاه های یک سیستم لوله می تواند یک روش موثر برای اتلاف انرژی باشد. همانطور که گفته شد جریان غیرماندگار در سیستم لوله منجر به تغییر شکل های محوری و جابه جایی، ناشی از بروز فشارهای دینامیکی در سازه لوله می شود. چنانچه در تکیه گاه های سیستم لوله اثر اصطکاک ایجاد شده باشد، جابه جایی ها و حرکت سازه لوله بر روی تکیه گاه زمانی که برآیند نیروهای وارده FSI به تکیه گاه از نیروی اصطکاک ایستایی بیشتر باشد باعث بسیج شدن نیروی اصطکاک جنبشی مابین تکیه گاه و سطح زیرین آن می شود، و اصطکاک ایجاد شده در هنگام

جابه‌جایی و حرکت تکیه‌گاه باعث مستهلک شدن انرژی سیستم شده و همین امر منجر به تغییر و اثرگذاری بر رفتار سیال در جریان غیر ماندگار می‌شود و در نهایت باعث تغییر در تنش‌های وارده بر تکیه‌گاه و سازه لوله می‌گردد.

۳-۴-۴- معادلات جریان گذرا در لوله الاستیک و ویسکوالاستیک

برای بدست آوردن معادلات فوق برای یک سیستم لوله، معادلات ناویر-استوکس در حالت دو بعدی در دستگاه مختصات استوانه‌ای $r-z$ نوشته می‌شود. این معادلات شامل یک معادله پیوستگی و دو معادله مومنتم در جهت‌های محوری و شعاعی با متغیرهای سرعت محوری، V_z سرعت شعاعی، V_r فشار سیال P و دانسیته سیال ρ_f می‌باشند. به علاوه، یک معادله حالت، فشار و دانسیته سیال را به هم مربوط می‌کند.

در تحقیق حاضر، اثر تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک در پدیده ضربه قوچ با در نظر گرفتن تداخل سیال - سازه هم در لوله‌های الاستیک و هم در لوله‌های ویسکوالاستیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین بایستی معادلات پیوستگی و مومنتم برای هر دو نوع لوله با اثرات تداخلی استخراج گردد و همچنین شرط مرزی تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (ساده با مکانیزم تغییر شکل محوری و برشی و اصطکاکی (لغزشی))، در معادلات اعمال شود. در نتیجه از معادلات هیدرولیکی ضربه قوچ در لوله‌های ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن اثرات تداخلی که در رساله دکتری کرامت [کرامت، ۱۳۸۹] ارائه شده، استفاده شده است. از اصطکاک دیواره لوله در معادلات صرف نظر می‌گردد. این فرض به دلیل بررسی دقیقتر اثرات تکیه‌گاه ویسکوالاستیک در میرایی هدهای فشار انجام شده است.

۳-۴-۱- معادله پیوستگی

در این معادله، هم اثر ویسکوالاستیک دیواره لوله و هم اثر تداخلی تاثیر می‌گذارد. در صورت در نظر گرفتن هر دو اثر، معادله پیوستگی به صورت زیر می‌باشد [کرامت، ۱۳۸۹]:

$$\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{g}{c_f^2} \frac{\partial H}{\partial t} + 2v \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} = (v^2 - 1) \rho_f g \frac{D}{e} \frac{\partial I_{\bar{H}}}{\partial t} \quad (۴۶-۳)$$

در این رابطه z امتداد محور لوله، t زمان، g شتاب گرانش زمین، \dot{u}_z سرعت محوری لوله، f ضریب اصطکاک داریسی - وایسباخ، D قطر داخلی لوله، v نسبت پواسن، ρ_f دانسیته سیال، e ضخامت دیواره لوله و V سرعت سیال می‌باشد که $I_{\bar{H}}$ ضریب کرنش محیطی تأخیری^۱ ناشی از رفتار مواد ویسکوالاستیک دیواره لوله است که با رابطه زیر معین می‌شود.

$$I_{\bar{H}} := \int_0^t \bar{H}(t-s) \frac{dJ(s)}{ds} ds = \sum_{k=1}^{N_{KV}} \left(\frac{J_k}{\tau_k} \int_0^t \bar{H}(t-s) e^{-\frac{s}{\tau_k}} ds \right) := \sum_{k=1}^{N_{KV}} I_{\bar{H}k} \quad (۴۷-۳)$$

که در آن H هد دینامیکی سیال و J تابع خزش تطابقی مواد ویسکوالاستیک لوله می‌باشد c_f نیز در معادله (۴۷-۳) سرعت موج فشاری است که با رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$c_f := \rho_f \left(\frac{1}{K} + (1 - v^2) \frac{D}{eE} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (۴۸-۳)$$

در این معادله E ، مدول الاستیک یانگ و K مدول بالک (الاستیسیته حجمی) سیال می‌باشد که مقدار متوسط آن برای آب تقریباً برابر 2.07×10^2 پاسکال می‌باشد. نسبت پواسن در مصالح ویسکوالاستیک بزرگتر از این نسبت در مصالح الاستیک است بنابراین اثر کوپله پواسن که به وسیله ترم سوم در معادله (۴۶-۳) مدلسازی می‌گردد. در لوله‌های ویسکوالاستیک از اهمیت بیشتری

^۱ Retarded circumferential strain

برخوردار است. اگر در معادله (۳-۴۷) طرف دوم تساوی حذف شود، معادله پیوستگی در لوله‌های الاستیک با در نظر گرفتن اثر کوپله پواسن بدست خواهد آمد. اثبات کامل رابطه (۳-۴۶) در مرجع [کرامت، ۱۳۸۹] آورده شده است.

۳-۴-۲- معادله مومنوم

رابطه مومنوم بر اساس اثرات ویسکوالاستیک و تداخلی پواسن و اتصال تغییر نخواهد کرد، این معادله در جهت محوری برابر خواهد بود با [کرامت، ۱۳۸۹]:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{2}{\rho_f R} \tau_0 + g \sin \theta \quad (۳-۴۹)$$

در این معادله چنانچه برای تنش برشی از مدل اصطکاک شبه ماندگار^۱ (تنش برشی τ_0 برابر مقدار معادل آن در حالت جریان پایدار فرض می‌گردد) استفاده شود، خواهیم داشت.

$$\tau_0 = \rho_f f \frac{V_{rel}|V_{rel}|}{8} \quad (۳-۵۰)$$

که در آن V_{rel} سرعت نسبی سیال درون لوله نسبت به دیوار داخلی لوله می‌باشد که برابر با $V - \dot{u}_z$ است. که در این V سرعت مطلق سیال، \dot{u}_z سرعت مطلق دیواره لوله و f ضریب افت داریسی وایسباخ می‌باشد. چنانچه P در رابطه مومنوم با، $P = \gamma H$ که در آن H هد فشار سیال و γ وزن حجمی سیال و Z رقوم نقطه مورد بررسی است، جایگزین گردد رابطه مومنوم (۳-۴۹) با فرض، $\theta = 0$ به صورت زیر خواهد بود.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} = -f \frac{V|V|}{2D} \quad (۳-۵۱)$$

¹ Quasi-steady friction model

چنانچه از اصطکاک نیز صرف نظر شود، ترم سمت راست معادله (۳-۵۱) حذف خواهد شد.

۳-۴-۵- معادله ارتعاش محوری

به علت وجود جمله کوپله پواسن در معادله پیوستگی و نیاز به محاسبه جابه‌جایی محوری نقاط مختلف لوله، معادلات مربوط به ارتعاش محوری نیز باید استخراج گردند. ارتعاش محوری نیز به نوبه خود، تحت تاثیر اثرات ویسکوالاستیسیته دیواره لوله خواهد بود. جهت مدلسازی ارتعاش محوری، نقطه آغازین، نوشتن معادلات حرکت در جهات محوری Z و شعاعی r در حالت دو بعدی در یک دستگاه مختصات استوانه‌ای است. این دو معادله به عنوان روابط تعادل مومنتم در جهت‌های محوری و شعاعی نیز خوانده می‌شوند. از اثرات سختی خمشی^۱، اینرسی دورانی^۲ و تغییر شکل برشی عرضی صرف‌نظر می‌گردد. این فرضیات به عنوان فرضیات امواج با طول موج‌های^۳ بلند خوانده می‌شوند. در این فرمولاسیون، متغیرها عبارتند از \dot{u}_r ، \dot{u}_z ، σ_r ، σ_z ، σ_ϕ و $\tau_{rz} = \tau_{zr}$ که همگی توابعی از r و Z و t می‌باشند. جرم حجمی مصالح لوله ρ_t ثابت می‌باشد و اثرات ترم‌های همرفتی^۴ همانند این ترم‌ها در معادلات پیوستگی و مومنتم سیال ناچیز فرض می‌شود (فرضیات اکوستیک). نیروی بدنی محوری^۵ به صورت $F_z = \rho_t g \sin \theta$ و نیروی بدنی شعاعی ناچیز در نظر گرفته می‌شود ($F_r = 0$). در این صورت روابط تعادل مومنتم در جهت محوری به صورت زیر می‌باشد.

$$\rho_t \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \tau_{zr})}{\partial r} + \rho_t g \sin \theta \quad (۳-۵۲)$$

و در جهت شعاعی به صورت زیر می‌باشد.

1 Bending stiffness
 2 Rotary inertia
 3 Long wavelength approximation
 4 Convective terms
 5 Axial body force

$$\rho_t \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r\sigma_r)}{\partial r} - \frac{\partial \sigma_\phi}{r} \quad (53-3)$$

جهت حصول یک فرمولاسیون یک بعدی (فقط بر حسب t و z) برای معادلات ارتعاش محوری، معادلات فوق در $2\pi r$ ضرب می‌شوند و سپس نسبت به r از R الی $R+e$ انتگرالگیری شده (R قطر داخلی لوله و e ضخامت دیواره لوله است.) و بر $2\pi \left(R + \frac{e}{2}\right) e$ تقسیم می‌شوند. همچنین نیروی برشی که نسبت به امتداد محوری متقارن می‌باشد، $\int_R^{R+e} 2\pi r \tau_{zr} dr$ ، (جمله موجود در سمت راست فرم انتگرالگیری شده معادله (53-3)) با توجه به فرضیات تقریب با طول موج بلند حذف می‌گردد. پس از این عملیات با توجه به شکل 5-3 معادله حرکت در جهت محوری به صورت زیر می‌باشد.

$$\rho_t \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial t} = \frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial z} + \frac{R+e}{\left(R + \frac{e}{2}\right) e} \tau_{zr}|_{r=R+e} - \frac{R}{\left(R + \frac{e}{2}\right) e} \tau_{zr}|_{r=R} + \rho_t g \sin \theta \quad (54-3)$$

و در جهت شعاعی به صورت زیر می‌باشد.

$$\rho_t \frac{\partial \bar{u}_r}{\partial t} = \frac{R+e}{\left(R + \frac{e}{2}\right) e} \sigma_r|_{r=R+e} - \frac{R}{\left(R + \frac{e}{2}\right) e} \sigma_r|_{r=R} - \frac{1}{R + e/2} \bar{\sigma}_\phi \quad (55-3)$$

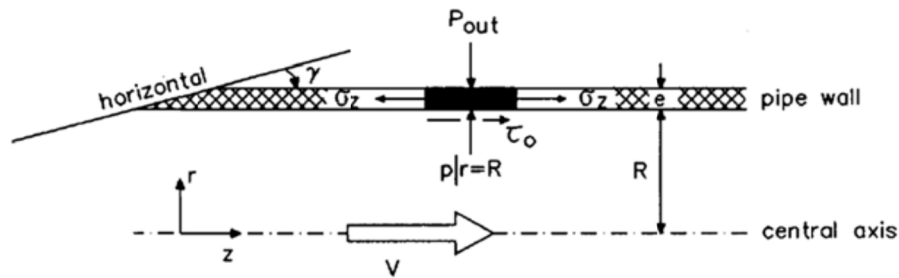
که در آن‌ها \bar{u}_z ، \bar{u}_r ، $\bar{\sigma}_z$ ، $\bar{\sigma}_r$ مقادیر متوسط‌گیری شده از متغیرهای \dot{u}_z ، \dot{u}_r ، σ_z ، σ_r می‌باشند:

$$\bar{u}_z = \frac{1}{2\pi \left(R + \frac{e}{2}\right) e} \int_R^{R+e} 2\pi r \dot{u}_z dr \quad (56-3)$$

$$\bar{u}_r = \frac{1}{2\pi \left(R + \frac{e}{2}\right) e} \int_R^{R+e} 2\pi r \dot{u}_r dr \quad (57-3)$$

$$\bar{\sigma}_z = \frac{1}{2\pi \left(R + \frac{e}{2}\right) e} \int_R^{R+e} 2\pi r \sigma_z dr \quad (58-3)$$

$$\bar{\sigma}_\phi = \frac{1}{e} \int_R^{R+e} \sigma_\phi dr \quad (59-3)$$



شکل ۵-۳ طرح نشان دهنده متغیرهای تعریف شده در توصیف تنش بر دیواره لوله، نمای جانبی [Tijsseling 1993] $(z-r)$

روابط تنش-جابجایی معادلات را کامل کرده و مدل ریاضی را قابل حل جهت پیاده‌سازی مدل‌های عددی می‌نماید. روابط تنش-کرنش برای مواد ویسکوالاستیک در حالت سه بعدی در بخش ۳-۲-۲-۲-۲ بررسی گردیدند. دسته دیگر روابط مورد نیاز، روابط کرنش-جابجایی می‌باشند که با فرض کرنش‌های کوچک^۱ به صورت زیر می‌باشند.

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad (60-3)$$

$$\varepsilon_\phi = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} \quad (61-3)$$

اکنون روابط تنش-جابجایی مورد نیاز، از جایگذاری روابط فوق برای کرنش در روابط تنش-کرنش ارایه شده در بخش ۳-۲-۴-۲ حاصل خواهند شد.

^۱ infinitesimal strains

چنانچه از رابطه (۳-۳۷) نسبت به زمان مشتق گیری شود و فرضیات مربوط به لوله‌های جدار نازک و ثابت بودن نسبت پواسن اعمال گردند خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \varepsilon_z}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\sigma_z * dJ) - v \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{PD}{e} * dJ \right) \quad (۳-۶۲)$$

اکنون با استفاده از تعریف اپراتور استیلیس کانولوشن و کرنش‌های کوچک برای، ε_z رابطه زیر که در حقیقت تنها از نوشتن رابطه تنش-کرنش در جهت محوری و تعریف کرنش‌های کوچک (و نه با استفاده از روابط (۳-۵۴) و (۳-۵۵)) به دست آمده، حاصل می‌گردد.

$$\frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} - \frac{1}{\rho_t c_t^2} \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} + g \frac{D v \rho_f}{2 E e} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial I_{\sigma_z}}{\partial t} - \rho_f g \frac{D v}{2 e} \frac{\partial I_{\bar{H}}}{\partial t}, \quad c_t^2 = E / \rho_t \quad (۳-۶۳)$$

که در آن σ_z تنش دیواره لوله، \dot{u}_z سرعت حرکت دیواره لوله، c_t سرعت موج برشی و ρ_t جرم حجمی مواد لوله و $I_{\bar{H}}$ به وسیله رابطه (۳-۴۷) و I_{σ_z} از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$I_{\sigma_z} := \int_0^t \sigma_z(t-s) \frac{dJ(s)}{ds} ds = \sum_{k=1}^{NKV} \left(\int_0^t \sigma_z(t-s) \frac{J_k}{\tau_k} e^{-\frac{s}{\tau_k}} ds \right) := \sum_{k=1}^{NKV} I_{\sigma_z k}, \quad (۳-۶۴)$$

معادله دیگر معادله پایداری مومنتم^۱ می‌باشد که از رابطه (۳-۵۴) با توجه به رابطه زیر که نظر به رفتار سیال و سازه در مرز تماس آن‌ها در دیواره لوله حاصل گردیده است، بدست می‌آید.

$$\tau_{zr}|_{r=R} = -\tau_0, \quad \tau_{zr}|_{r=R+e} = 0 \quad (۳-۶۵)$$

این معادله به صورت زیر می‌باشد و برای مواد الاستیک، ویسکوالاستیک و حتی در حالت وجود تغییر شکل‌های بزرگ در سیستم لوله فرم یکسانی خواهد داشت (معادله پایداری مومنتم).

¹ Conservation of momentum

$$\frac{\partial \bar{u}_z}{\partial x} - \frac{1}{\rho_t} \frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial z} = \frac{R}{\rho_t \left(R + \frac{e}{2} \right) e} \tau_0 + g \sin \theta \quad (۶۶-۳)$$

که در آن، θ زاویه بین محور لوله و یک صفحه افقی می‌باشد. اکنون چنانچه در این رابطه همانند رابطه (۵۱-۳) از مدل اصطکاک شبه ماندگار استفاده و فرضیات لوله‌های جدار نازک $e \ll R$ اعمال شوند خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \bar{u}_z}{\partial t} - \frac{1}{\rho_t} \frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial z} = \frac{\rho_f A_f}{\rho_t A_t} \frac{fV|V|}{2D} + g \sin \theta \quad (۶۷-۳)$$

که در آن A_f و A_t به ترتیب سطح مقطع لوله و سطح مقطع جریان می‌باشند. چنانچه از اصطکاک صرف نظر و لوله افقی در نظر گرفته شود، ترم سمت راست معادله (۶۷-۳) حذف خواهد شد.

دو معادله (۶۳-۳) و (۶۷-۳) همراه با دو معادله پیوستگی و مومنتم معادلات سیال (۴۶-۳) و (۵۱-۳) و با استفاده از روش حل عددی خطوط مشخصه (full MOC) جهت حل مساله تداخل سیال - سازه به عنوان مثال در یک سیستم مخزن - لوله (الاستیک و یا ویسکوالاستیک) - شیر به کار گرفته می‌شوند.

۳-۵ - شرایط اولیه

علاوه بر معادلات حاکم دانستن شرایط اولیه برای بیان مدل ریاضی و حل دقیق آن، بسیار مهم می‌باشد. در این مطالعه شرایط اولیه مربوط به لحظه پیش از بسته شدن شیر و وقوع جریان غیر ماندگار در سیستم لوله و ارتعاش در سازه لوله می‌باشد که باید مقادیر سرعت و فشار و مقادیر جابه‌جایی و سرعت و تنش‌ها در معادلات هیدرولیکی و ارتعاش سازه در حالت جریان پایدار و ماندگار سیستم در

لحظه‌ای پیش از آغاز غیر ماندگاری جریان مشخص باشد. این مقادیر می‌تواند در نتایج اثر گذار باشند بنابراین باید سعی شود حداقل امکان نزدیک به مقادیر واقعی فرض شوند. در نتیجه خواهیم داشت:

$$H(z, 0) = H_0, \quad V(z, 0) = V_0 = Q_0/A_f \quad (۶۸-۳)$$

در تحلیل دینامیکی یک مساله سازه‌ای به دو روش می‌توان اثرات شرایط اولیه را وارد نمود. به عنوان روش اول می‌توان کل نیرو اعم از استاتیکی و دینامیکی را در هر لحظه بر سازه وارد کرد. در این صورت در لحظه صفر که نیروی استاتیکی بر سیستم وارد می‌شود، باید جابه‌جایی معادل این نیرو را در لحظه t به عنوان شرط اولیه در نظر گرفت (در حل با روش نیومارک استفاده می‌شود). در روش دیگر می‌توان ابتدا تغییر شکل سازه را به علت بار استاتیکی وارده بر آن محاسبه نمود و سپس در فرایند حل دینامیکی، تنها نیروی دینامیکی را بر سازه وارد نمود بنابراین شرط اولیه در تحلیل دینامیکی، جابه‌جایی برابر صفر خواهد بود. در این حالت جابه‌جایی کل در هر نقطه سازه در هر لحظه برابر با جمع جابه‌جایی دینامیکی و استاتیکی می‌باشد. البته هر دو روش مذکور در نهایت منجر به نتایج یکسانی خواهند شد [کرامت، ۱۳۸۹]، لذا با توجه به الگوریتم حل عددی یکی از دو روش می‌تواند انتخاب شود. در نتیجه خواهیم داشت.

$$u_z(z, 0) = 0, \quad \dot{u}_z(z, 0) = 0, \quad \sigma_z(z, 0) = 0 \quad (۶۹-۳)$$

قابل توجه است که در محاسبه ترم‌های ویسکوالاستیک در صورتی که هدف محاسبه آهنگ تغییر این ترم باشد (مانند محاسبه آهنگ تغییر کرنش محیطی تاخیری طبق معادله دیفرانسیل (۳-۴۶)) تنها پاسخ دینامیکی دارای آهنگ تغییر غیر صفر خواهد بود به همین دلیل نیازی به وارد کردن نیروی استاتیکی وارد بر سازه و تغییر مکان نظیر آن جهت محاسبه آن آهنگ تغییر نیست. به همین دلیل در رابطه (۳-۴۶) اثری از فشار جریان پایدار نیست (مشتق نسبت به زمان صفر است).

۳-۶- شرایط مرزی

همواره شرایط مرزی حاکم بر سیستم به عنوان بخش تکمیلی و اصلی برای مدل ریاضی و روش‌های عددی مورد نیاز می‌باشد. این شرایط مرزی به صورت معادلاتی بر حسب مجهولات در مرزها تعریف می‌شوند. در این تحقیق بدلیل استفاده از تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (ساده) (محوری و برشی) و اصطکاکی) در محل شیر و در طول لوله در سیستم مخزن-لوله-شیر، لوله قابلیت جابه‌جایی خواهد داشت. لذا باید شرایط مرزی به نحو مناسبی با در نظر گرفتن اثر تداخلی اتصال هم برای معادلات حاکم ارائه شوند. در واقع برای مدلسازی اثر تداخلی اتصال، در معادلات شرایط مرزی پارامترهایی وابسته به معادلات هیدرولیکی و سازه‌ای وارد می‌گردد، بنابراین هیچگونه تغییری در صورت معادلات دیفرانسیلی سیال و سازه ایجاد نمی‌شوند. در این تحقیق سه شرط مرزی خواهیم داشت، که در ادامه در مورد آن بحث شده است.

۳-۶-۱- شرط مرزی مخزن

وجود مخزن در یک سمت سیستم، یک شرط مرزی برای معادلات محسوب می‌شود. این شرط مرزی برای معادلات مانند تکیه‌گاه گیردار (سختی بسیار زیاد) مانع حرکت سازه لوله می‌شود. برای معادلات در محل مخزن، هد فشار همواره ثابت خواهد بود. بنابراین خواهیم داشت:

$$H(0, t) = H_0, \quad V(0, t) = V_0, \quad (۷۰-۳)$$

$$u_z(0, t) = 0, \quad \dot{u}_z(0, t) = 0, \quad (۷۱-۳)$$

۳-۶-۲- شرایط مرزی شیر

شرط مرزی دیگری که برای سیستم مورد نظر نیاز است، شرط مرزی شیر می‌باشد. شرط مرزی مورد نیاز برای شیر، پیشتر به طور مفصل در بررسی تایسلینگ [Tijsseling, 1993] برای شرایط مرزی

شیر، زانویی، تقاطع و انتهای بسته^۱ و پمپ در سیستم لوله مورد مطالعه قرار گرفته است، که برای شیر بدون جرم و تکیه‌گاه با بستن تدریجی و امکان ارتعاش به صورت زیر می‌باشند.

$$\frac{V_P - \dot{u}_{zP}}{V_0} = \tau \sqrt{\frac{H_P}{H_0}} \quad (72-3)$$

$$\sigma_{zP} A_t = \rho_f g A_f \tilde{H}_P, \quad \tilde{H}_P = H_P - H_{P,0} \quad (73-3)$$

که در آن اندیس P نشان دهنده مجهولات در محل شیر، و پارامتر τ درصد بازشدگی شیر می‌باشد. معادله

(72-3) رابطه‌ای است بعنوان معادله شرط مرزی شیر مورد استفاده قرار می‌گیرد و معادله (73-3) نیز بیانگر نیروی محوری است که به دلیل فشار سیال انباشته شده در پشت شیر، در این مرز ایجاد می‌شود. در واقع 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. بنابراین این نیروی محوری به عنوان شرط مرزی، در معادلات سازه-ای در محل شیر اعمال خواهد شد.

۳-۶-۳- شرایط مرزی تکیه‌گاه ویسکوالاستیک

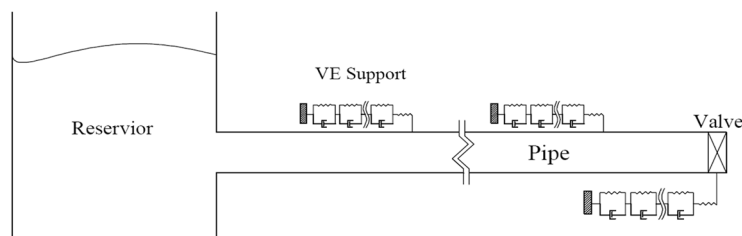
در این مطالعه سه حالت مختلف تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک در محل شیر و در طول، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با استفاده از این نوع تکیه‌گاه‌ها جابه‌جایی‌ها، سرعت‌ها و شتاب‌های ارتعاش سازه ناشی از وقوع پدیده ضربه‌قوچ تغییر خواهد کرد و این تغییرات بر سرعت و فشار سیال تاثیر خواهد گذاشت.

¹ Closed end

برای مدلسازی رفتار ویسکوالاستیک این تکیه‌گاه‌ها همان طور که در شکل دیده می‌شود، از مدل جامع کلومین-ویت (شکل ۳-۴-الف) استفاده می‌شود.

حالت اول، زمانی است که پاسخ تکیه‌گاه ویسکوالاستیک به صورت تغییر شکل محوری در نظر گرفته شود، که پیشتر توسط [زنگانه، ۱۳۹۲] با به کارگیری روش MOC-FEM پیاده سازی شده است. حالت دوم زمانی است که پاسخ تکیه‌گاه ویسکوالاستیک به صورت تغییر شکل برشی در نظر گرفته شود.

در نهایت، حالت سوم زمانی است که این نوع تکیه‌گاه‌ها، به صورت اصطکاکی (لغزشی) اجرا شود. شرایط مرزی حالت‌های مختلف تکیه‌گاه ویسکوالاستیک با به کارگیری روش full MOC پیاده سازی شده است که در فصل بعد به طور مفصل بحث خواهد شد. شکل ۳-۶ سیستم مخزن، لوله و شیر را به همراه تکیه‌گاه ویسکوالاستیک بکار رفته در محل شیر و در محل‌هایی از طول لوله نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶ سیستم مخزن - لوله-شیر، به همراه تکیه‌گاه ویسکوالاستیک در محل شیر و در طول لوله

۳-۶-۳-۱ - شرایط مرزی تکیه‌گاه میانی ویسکوالاستیک ساده (مکانیزم تغییر شکل

محوری و برشی)

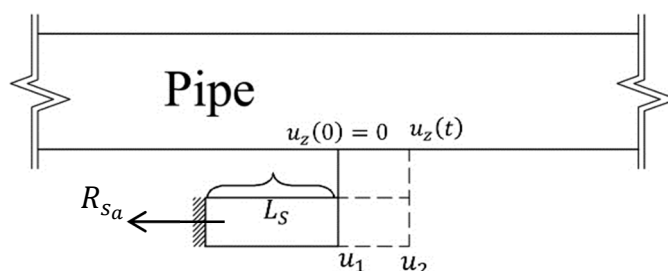
بر این اساس، شرط مرزی تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک با مکانیزم تغییر شکل محوری که در طول لوله قرار گرفته‌اند بر اساس شرط تعادل در نقطه قرارگیری تکیه‌گاه به صورت زیر خواهد بود:

$$R_{Sa} = (\sigma_{z=z_s^+} - \sigma_{z=z_s^-}) \times A_t = \sigma_s \times A_s = (\varepsilon_s * dG^s(t)) \times A_s \quad (۷۴-۳)$$

که در آن منظور از $\sigma_{z=z_s^-}$ و $\sigma_{z=z_s^+}$ تنش قبل و بعد از تکیه‌گاه در دیواره لوله، σ_s تنش در تکیه‌گاه، R_{sa} عکس‌العمل افقی تکیه‌گاه با مکانیزم تغییر شکل محوری، A_t و A_s بیانگر سطح مقطع لوله و تکیه‌گاه، $G^s(t)$ تابع رهاسازی تنش مصالح ویسکوالاستیک تکیه‌گاه و علامت، "d" عملگر استیلیس کانولوشن تعریف شده در معادله (۳-۲۹) می‌باشد. در واقع در محل‌های قرارگیری تکیه‌گاه‌ها در طول لوله (Zهای مورد نظر) معادله (۳-۷۴) جهت حل عددی معادلات FSI اعمال می‌شود. ε_s کرنش محوری در جهت طول لوله می‌باشد که با توجه به شکل ۳-۷ از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon_s(t) = \frac{u_2 - u_1}{L_s} = \frac{u_z(t)}{L_s}, \quad (۳-۷۵)$$

که در آن u_z جابه‌جایی (تغییر شکل محوری) دیواره لوله در محل‌های قرارگیری تکیه‌گاه‌ها در طول لوله (Zهای مورد نظر) که برابر با تغییر شکل محوری تکیه‌گاه می‌باشد و L_s طول تکیه‌گاه می‌باشد.



شکل ۳-۷ طرحی شماتیک تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری)

اگر مکانیزم تغییر شکل برشی تکیه‌گاه مورد نظر باشد، به جای $G^s(t)$ ، باید تابع رهاسازی تنش برشی $\mu_R^s(t)$ طبق معادله (۳-۴۳) و (۳-۳۸) به کار گرفته شود، در نتیجه شرط مرزی برای تکیه‌گاه میانی ویسکوالاستیک با مکانیزم تغییر شکل برشی به صورت زیر خواهد بود:

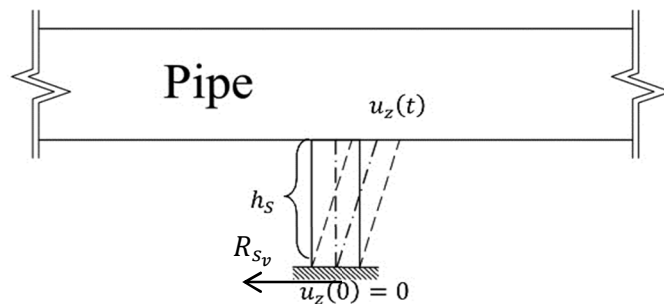
$$R_{sv} = (\sigma_{z=z_s^+} - \sigma_{z=z_s^-}) \times A_t = \tau_{yz_s} \times A_s = \left(\gamma_{yz_s} * d\mu_{R^s}(t) \right) \times A_s$$

$$= \left(\frac{1}{2(1+\nu)} \right) \left(\gamma_{yz_s} * dG^s(t) \right) \times A_s \quad (76-3)$$

که در این رابطه R_{sv} عکس العمل افقی تکیه گاه با مکانیزم تغییر شکل برشی و γ_{yz_s} کرنش برشی در جهت طول لوله می باشد که با توجه به شکل ۸-۳ از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\gamma_{yz_s}(t) = \frac{u_z(t)}{h_s}, \quad (77-3)$$

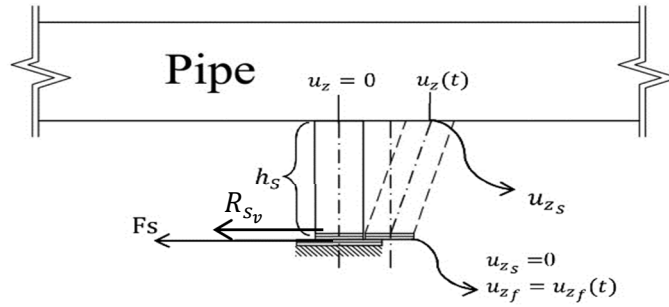
که در آن u_z جابه جایی (تغییر شکل محوری) دیواره لوله در محل های قرارگیری تکیه گاه ها در طول لوله (Zهای مورد نظر) که برابر با تغییر شکل محوری تکیه گاه می باشد و h_s ارتفاع تکیه گاه می باشد.



شکل ۸-۳ شماتیک تکیه گاه ویسکوالاستیک (با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی)

۳-۶-۳-۲- شرایط مرزی تکیه گاه میانی ویسکوالاستیک لغزشی اصطکاکی

اجرا تکیه گاه ویسکوالاستیک به صورت لغزشی (اصطکاکی)، عملکرد متفاوت تر و پیچیده تری نسبت به دو حالت قبل دارد و شرط مرزی آن به شرح زیر می باشد:



شکل ۹-۳ شکل شماتیک تکیه گاه اصطکاکی ویسکوالاستیک

با توجه به شکل ۹-۳ در تکیه‌گاه‌های اصطکاکی (لغزشی) به دلیل حرکت (لغزش) تکیه‌گاه، جابه‌جایی کل لوله در هر گره برابر است با:

$$u_z(t) = u_{zs}(t) + u_{zf}(t), \quad (۷۸-۳)$$

که u_z جابه‌جایی کل گره در لوله و u_{zs} تغییر شکل تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و u_{zf} جابه‌جایی ناشی از لغزش تکیه‌گاه می‌باشد.

به طور کل رفتار تکیه‌گاه اصطکاکی دارای دو فاز می‌باشد: ۱- چسبندگی ۲- لغزش

همانطور که در بخش ۳-۴-۳- اشاره شد، لغزش زمانی انجام می‌شود که برآیند نیروهای وارده به یک جسم بیشتر از نیروی اصطکاک آستانه حرکت باشد، در نتیجه ابتدا باید فرض شود برآیند نیروهای وارد به تکیه‌گاه (عکس العمل تکیه‌گاه) از نیروی اصطکاک آستانه حرکت کمتر باشد و لغزشی صورت نگیرد (چسبندگی)، بنابراین عکس العمل تکیه‌گاه ویسکوالاستیک در حالت ساده (برشی) محاسبه و با اصطکاک آستانه حرکت مقایسه می‌شود اگر از آن مقدار کمتر باشد فرض انجام شده درست است و تکیه‌گاه در آن لحظه مانند حالت ساده برشی عمل می‌کند و خواهیم داشت:

$$if \quad R_{sv} = (\sigma_{z=z_s^+} - \sigma_{z=z_s^-}) \times A_t = \left(\frac{1}{2(1+\nu)} \right) \left(\frac{u_{zs}(t)}{h_s} * dG^s(t) \right) \times A_s < F_{st} \quad (۷۹-۳)$$

$$u_{zf}(t) = u_{zf}(t - \Delta t), \quad (۸۰-۳)$$

$$(\sigma_{z=z_s^+} - \sigma_{z=z_s^-}) \times A_t = \left(\frac{1}{2(1+v)} \right) \left(\frac{u_{z_s}(t)}{h_s} * dG^s(t) \right) \times A_s \quad (۸۱-۳)$$

اگر برآیند نیروهای FSI وارد به تکیه‌گاه (عکس العمل تکیه‌گاه) بیشتر از نیروی اصطکاک آستانه حرکت باشد لغزش انجام شده و نیرو اصطکاک جنبشی بسیج می‌شود، همچنین با توجه به حرکت تکیه‌گاه باید نیروی ناشی از اینرسی در نظر گرفته شود در نتیجه خواهیم داشت:

$$if \quad R_s = (\sigma_{z=z_s^+} - \sigma_{z=z_s^-}) \times A_t = \left(\frac{1}{2(1+v)} \right) \left(\frac{u_{z_s}(t)}{h_s} * dG^s(t) \right) \times A_s > F_{st} \quad (۸۲-۳)$$

$$(\sigma_{z=z_s^+} - \sigma_{z=z_s^-}) \times A_t = \left(\frac{1}{2(1+v)} \right) \left(\frac{u_{z_s}(t)}{h_s} * dG^s(t) \right) \times A_s + \mu_k(N) + ma, \quad (۸۳-۳)$$

$$\mu_k(N) = mg * sign(\dot{u}_{zf}(t)) \quad a = \frac{(\dot{u}_z(t) - \dot{u}_z(t - \Delta t))}{\Delta t} \quad (۸۴-۳)$$

که a شتاب حرکت لوله، g شتاب گرانش، \dot{u}_z سرعت حرکت لوله، \dot{u}_{zf} سرعت حرکت (لغزش) تکیه‌گاه، mg نیروی عکس العمل قائم وارد به تکیه‌گاه (معادل مجموع وزن وارده به تکیه‌گاه) و $sign(\dot{u}_{zf})$ مقادیر تابع علامت سرعت حرکت تکیه‌گاه و نشاندهنده جهت نیروی اصطکاک می‌باشد. همچنین رابطه شتاب تسبی حرکت لوله در تکیه‌گاه‌ها را به صورت زیر خواهیم داشت:

$$a = a_f - a_s = \frac{(\dot{u}_{zf}(t) - \dot{u}_{zf}(t - \Delta t))}{\Delta t} - a_s \quad (۸۵-۳)$$

که در آن a_f شتاب لغزش تکیه‌گاه می‌باشد و a_s شتاب تغییر شکل تکیه‌گاه می‌باشد که با توجه به قانون دوم نیوتن می‌توان از تقسیم نیرو بر مجموع جرم سیستم به دست آید در نتیجه خواهیم داشت:

$$a_s = \frac{R_{sv}}{m} = \frac{\left(\frac{1}{2(1+\nu)}\right) \left(\frac{u_{zs}(t)}{h_s} * dG^s(t)\right) \times A_s}{m} \quad (۸۶-۳)$$

۳-۳-۶-۳ - شرایط مرزی تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک

در صورتی که از انواع تکیه گاه ویسکوالاستیک ذکر شده در بخش قبلی در محل شیر استفاده شود، رابطه (۷۸-۳)، (شرط مرزی مربوط به شیر) به صورت زیر تغییر خواهد نمود:

$$\sigma_z A_t = \rho_f g A_f \tilde{H} - F_a \quad (۸۷-۳)$$

که در آن برای تکیه گاه ویسکوالاستیک با مکانیزم تغییر شکل محوری $F_a = R_{sa}$ ، (معادله (۷۴-۳))، برای تکیه گاه با مکانیزم تغییر شکل برشی $F_a = R_{sv}$ ، (معادله (۷۶-۳)) و برای تکیه گاه با مکانیزم لغزشی F_a برابر با سمت راست معادله (۸۳-۳) خواهد بود.

۴ - فصل چهارم: حل عددی

۴-۱- مقدمه

برای حل مسائل تداخلی مرتبط با پدیده ضربه‌قوچ دو روش کاملاً خطوط مشخصه (full MOC) و خطوط مشخصه-اجزای محدود (MOC-FEM) ارائه شده است. هر یک از این روش‌ها معایب و مزایایی دارند. به عنوان مثال در روش MOC-FEM معادلات سازه‌ای و هیدرولیکی به صورت مجزا حل می‌شوند، در نتیجه نیاز به تکرار در هر گام زمانی می‌باشد، تا زمانیکه پارامترهای مشترک در معادلات هیدرولیکی و سازه‌ای همگرا شوند، لذا زمان حل نسبت به روش کاملاً مشخصه (full MOC) که معادلات در آن به صورت همزمان حل می‌شوند به مراتب بیشتر خواهد بود. همچنین روش MOC-FEM، به راحتی می‌تواند در حالتی که سایر پدیده‌ها جهت آنالیز مورد نظر هستند مانند اصطکاک غیرماندگار، جدایی ستون مایع، اثرات ویسکوالاستیک و یا ویسکوپلاستیک و ... به کار گرفته شود.

ضعف دیگر روش MOC-FEM در این است که روش عددی معمول FEM نمی‌تواند ناپیوستگی‌هایی را که در حل دقیق مسایل FSI در چکش آبی وجود دارد، مدلسازی نماید، زیرا ممکن است در مواردی مانند ضربه‌قوچ به دنبال خاموشی پمپ یا بسته شدن تدریجی شیر، ناپیوستگی در جواب‌ها (نوسانات آبی فشار) رخ دهد، که البته مورد اخیر نگرانی عمده‌های ایجاد نمی‌کند زیرا در جواب‌ها و نمودارهای خروجی تاثیر زیادی نمی‌گذارد.

فرایند حل عددی در هر دو روش برای حالتی که اثرات ویسکوالاستیک در نظر گرفته شود پیشتر توسط محققان مختلف، [Lavooij and Tijsseling, 1989]، [Tijsseling, 1993]، [Wiggert et.al, 1985]، [Heinsbroek,1997] و [کرامت، ۱۳۸۹] بررسی شده است. تنها تفاوت در نحوه محاسبه ترم‌های شامل انتگرال کانولوشن است که برای مدلسازی تغییر شکل‌های ویسکوالاستیک (تاخیری) به معادلات حاکم اضافه شده‌اند. در هیچ یک از این مطالعات رویکردی برای پیاده‌سازی اثرات تکیه‌گاه ویسکوالاستیک در نظر گرفته نشده است. اما همانطور که قبلاً اشاره شده است در مرجع [زنگانه، ۱۳۹۲] و [Zanganeh et.al, 2015] علاوه بر اثرات ویسکوالاستیسیته در

لوله‌ها، اثرات تغییر شکل محوری تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک در یک خط لوله با استفاده از روش MOC-FEM مورد بررسی قرار گرفته است، همچنین بر خلاف مرجع [کرامت، ۱۳۸۹] که معادله ارتعاش محوری در لوله‌های ویسکوالاستیک، بر حسب تابع خزش تطابقی نوشته شده و حل گردیده است، بر حسب تابع رهاسازی تنش نوشته و با استفاده از روش FEM و معادلات هیدرولیکی حاکم بر حرکت سیال به روش MOC حل شده است، علاوه بر این برای پیاده‌سازی شرط مرزی تکیه‌گاه نیز از تابع رهاسازی استفاده شده است. در تحقیق حاضر از معادلات ارتعاش محوری به کار گرفته شده در مرجع [کرامت، ۱۳۸۹] که بر حسب تابع خزش تطابقی نوشته شده، استفاده می‌شود، اما برای پیاده سازی شرط مرزی تکیه‌گاه‌ها همانند مرجع [زنگانه، ۱۳۹۲] از تابع رهاسازی استفاده خواهد شد. در این بین انتگرال‌های کانولوشن ایجاد شده در معادلات، به دلیل رفتار مواد ویسکوالاستیک، با استفاده از تقریب عددی مناسب حل و در روش‌های عددی استفاده می‌شوند.

۴-۲- تقریب عددی ترم‌های انتگرال کانولوشن

همانطور که در تعریف عملگر استیلیس کانولوشن، رابطه (۳-۲۹) مشاهده می‌شود، پس از بسط این عملگر، ترم انتگرال کانولوشن در معادلات ظاهر خواهد شد. این ترم در معادله پیوستگی (۳-۴۶) و معادله ارتعاش محوری (۳-۶۳)، بر حسب تابع خزش تطابقی و روابط (۳-۷۴)، (۳-۷۶)، (۳-۸۱) و (۳-۸۳) شرط مرزی تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک بر حسب تابع رهاسازی تنش می‌باشد. جهت انجام آنالیز در حوزه زمان، این عبارات بایستی به صورت عبارات‌های مستقیمی از مجهولات نوشته شوند. در غیر اینصورت با یک سری معادلات انتگرال روبرو خواهیم بود که حل عددی آنها بسیار هزینه بر خواهد بود. برای این منظور از یک تقریب عددی بازگشتی بر اساس مقادیری از گام زمانی فعلی و قبلی که در مرجع [Keramat et.al, 2012 and Keramat and Ahmadi,2012] ارائه شده است استفاده می‌شود. با به کار گیری این تقریب، به راحتی می‌توان در حوزه زمان به مطالعه رفتار مواد

ویسکوالاستیک پرداخت. این تقریب عددی در روش کاملاً مشخصه، به صورت ضرایبی در مجهولات اصلی و ترم‌های اضافی که با آن‌ها جمع می‌شود، می‌باشد.

تقریب عددی ترم مشتق نسبت به زمان انتگرال کانولوشن بر حسب تابع خزش با توجه به اینکه در رابطه پیوستگی (۳-۴۶) و رابطه (۳-۶۳) وجود دارد باید استخراج شود.

برای یک تابع دلخواه $I_{hk}(t) = \frac{J_k}{\tau_k} \int_0^t h(t-s)e^{-s/\tau_k} ds$ با انجام یک سری عملیات جبری می‌توان ثابت کرد [Covas et.al,2005]:

$$\frac{dI_{hk}(t)}{dt} = -\frac{I_{hk}(t)}{\tau_k} + \frac{J_k}{\tau_k} h(t) \quad (1-4)$$

تقریب عددی ترم انتگرال کانولوشن بر حسب تابع خزش و تابع دلخواه $h(t)$ به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} I_{hk}(t) &= \int_0^t h(t-s) \frac{dJ}{ds}(s) ds = \frac{J_k}{\tau_k} \int_0^t h(t-s) e^{-\frac{s}{\tau_k}} \\ &\approx h(t) \left(J_k + \frac{J_k \tau_k}{\Delta t} \left(e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} - 1 \right) \right) \\ &\quad + h(t - \Delta t) \left(-J_k e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} - \frac{J_k \tau_k}{\Delta t} \left(e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} - 1 \right) \right) + e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} I_{hk}(t - \Delta t) \end{aligned} \quad (2-4)$$

همچنین این تقریب بر حسب تابع رهاسازی تنش برای معادلات شرایط مرزی تکیه‌گاه‌های ویسکو الاستیک و تابع دلخواه $h(t)$ به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned}
I_{hk}(t) &= \int_0^t h(t-s) \frac{dG}{ds}(s) ds = -\frac{G_k}{\tau_k} \int_0^t h(t-s) e^{\frac{-s}{\tau_k}} \\
&\approx h(t) \left(-G_k - \frac{G_k \tau_k}{\Delta t} \left(e^{\frac{-\Delta t}{\tau_k}} - 1 \right) \right) \\
&\quad + h(t - \Delta t) \left(+G_k e^{\frac{-\Delta t}{\tau_k}} + \frac{G_k \tau_k}{\Delta t} \left(e^{\frac{-\Delta t}{\tau_k}} - 1 \right) \right) + e^{\frac{-\Delta t}{\tau_k}} I_{hk}(t - \Delta t)
\end{aligned} \tag{۳-۴}$$

اثبات رابطه (۲-۴) را می‌توان در مرجع [کرامت، ۱۳۸۹] مشاهده نمود. در این صورت با جای‌گذاری معادله (۲-۴) در معادله (۱-۴)، تقریب عددی ترم مشتق نسبت به زمان انتگرال کانولوشن بر حسب تابع خزش استخراج می‌شود:

$$\begin{aligned}
\frac{I_{hk}(t)}{dt} &= h(t) \left(-\frac{J_k}{\Delta t} \left(e^{\frac{-\Delta t}{\tau_k}} - 1 \right) \right) + h(t - \Delta t) \left(+\frac{J_k}{\tau_k} e^{\frac{-\Delta t}{\tau_k}} + \frac{J_k \tau_k}{\Delta t} \left(e^{\frac{-\Delta t}{\tau_k}} - 1 \right) \right) \\
&\quad - \frac{e^{\frac{-\Delta t}{\tau_k}}}{\tau_k} I_{hk}(t - \Delta t)
\end{aligned} \tag{۴-۴}$$

قابل ذکر است که تقریب بکار رفته در استخراج رابطه تقریبی (۱-۴) از درجه اول می‌باشد، زیرا تابع $h(t)$ در زمان $t - \Delta t$ الی t به صورت ثابت فرض شده است، بنابراین با توجه به بکارگیری تقریب درجه اول برای ترم‌های ویسکوالاستیسیته، بهتر است چنانچه سایر اثرات از قبیل اثرات تداخلی سیال - سازه مورد نظر باشد، نیاز به انجام محاسبات عددی تقریبی است، تقریب باید از درجه اول و نه از درجات بالاتر بکار گرفته شود زیرا در غیر این صورت، هزینه مصرفی جهت افزایش دقت (بالا بردن درجه تقریب) به علت وجود ترم ویسکوالاستیسیته با تقریب کمتر به هدر خواهد رفت.

۴-۳- حل عددی با روش کاملاً مشخصه

در این روش ۴ معادله دیفرانسیل جزئی درجه اول حاکم (معادلات (۳-۴۶)، (۳-۴۹)، (۳-۶۳) و (۳-۶۷)) به صورت ماتریس زیر نوشته می‌شوند.

$$\mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial t} + \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial z} = \mathbf{r} \quad (۵-۴)$$

که در آن \mathbf{y} و \mathbf{r} بردار مجهولات و بردار سمت راست و ماتریس‌های \mathbf{A} و \mathbf{B} ماتریس ضرایب ثابت می‌باشند. با توجه به معادلات حاکم اشاره شده، هریک از بردارها و ماتریس‌ها به صورت زیر می‌باشند.

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} V \\ H \\ \dot{u}_z \\ \sigma_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} \frac{-fV|V|}{2D} \\ \rho_f g (v^2 - 1) \frac{D}{e} \frac{\partial I_{\bar{H}}}{\partial t} \\ \frac{\rho_f A_f}{\rho_t A_t} \frac{fV|V|}{2D} + g \sin \alpha \\ \frac{\partial I_{\sigma_z}}{\partial t} - \rho_f g \frac{vD}{2e} \frac{\partial I_{\bar{H}}}{\partial t} \end{bmatrix}, \quad (۶-۴)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{g}{c_f^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{vD}{\rho_f g 2Ee} & 0 & \frac{-1}{\rho_t c_t^2} \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} g & 0 & 0 \\ 0 & -2v & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\rho_t} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (۷-۴)$$

با استفاده از تبدیل MOC برای سیستم معادلات ارایه شده در (۴-۶) و (۴-۷) شبیه به آنچه به طور مفصل توسط تایلینگ [Tijsseling, 1993] در پایان‌نامه دکتری‌اش بحث شده و همچنین در [Yang and Zhang, 2004] و [Kwon and Bang, 2000] نیز استفاده و بحث شده است، می‌توان این دستگاه معادلات را به صورت جدا از هم نوشت. این کار به عنوان قطری سازی دستگاه معادلات دیفرانسیل جزئی خوانده می‌شود.

با توجه به رابطه (۴-۶)، مقادیر ویژه نظیر این رابطه (λ_i) را می‌توان از $|\mathbf{B} - \lambda\mathbf{A}| = 0$ به صورت زیر به دست آورد.

$$\hat{c}_f = \lambda_1 = -\lambda_2 = \sqrt{\frac{1}{2}\{q^2 - \sqrt{q^4 - 4c_f^2 c_t^2}\}}, \quad q = c_f^2 + c_t^2 + 2v^2 \frac{\rho_f R}{\rho_t e} c_f^2 \quad (۸-۴)$$

$$\hat{c}_t = \lambda_3 = -\lambda_4 = \sqrt{\frac{1}{2}\{q^2 + \sqrt{q^4 - 4c_f^2 c_t^2}\}}, \quad (۹-۴)$$

اکنون جهت جداسازی سیستم معادلات (۴-۵) به چهار معادله دیفرانسیل معمولی مستقل از هم، آن را در ماتریس \mathbf{T} ضرب می‌نمایم که در آن $\mathbf{T} = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{A}^{-1}$ و \mathbf{S} ماتریسی است که ستون‌هایش، بردارهای ویژه نظیر هریک از مقادیر ویژه بدست آمده λ_i می‌باشند. در نتیجه ماتریس قطری مقادیر ویژه که با \mathbf{A} نشان داده می‌شود، در رابطه زیر صدق خواهد کرد.

$$\mathbf{S}^{-1}(\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})\mathbf{S} = \mathbf{\Lambda} \quad (۱۰-۴)$$

از ضرب رابطه فوق در \mathbf{S}^{-1} و با توجه به $\mathbf{S}^{-1} = \mathbf{TA}$ خواهیم داشت:

$$\mathbf{TB} = \Lambda \mathbf{TA} \quad (11-4)$$

به طوری که با نوشتن، $\mathbf{v} = \mathbf{TAy}$ رابطه (4-5) را پس از ضرب نمودن طرفینش در \mathbf{T} می توان به صورت زیر نوشت.

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \Lambda \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} = \mathbf{Tr} \quad \text{or} \quad \frac{\partial v_i}{\partial t} + \Lambda_i \frac{\partial v_i}{\partial z} = (\mathbf{Tr})_i, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (12-4)$$

اکنون می توان خطوط مشخصه را به گونه ای بنا کرد که رابطه $\lambda_i = \frac{dz}{dt}$ را ارضا نمایند. در این صورت در امتداد هریک از خطوط می توان نوشت.

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} = (\mathbf{Tr})_i \quad (13-4)$$

با استفاده از $\mathbf{v} = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{y} = \mathbf{TAy}$ ، روابط سازگاری فوق را می توان برحسب مجهولات \mathbf{y} نوشت. چنانچه عبارات v_i و $(\mathbf{Tr})_i$ به صورت باز شده شان ارائه شوند رابطه (4-13) به صورت زیر در خواهد آمد.

$$\begin{aligned} (\mathbf{TA})_{i1} \frac{dy_1}{dt} + (\mathbf{TA})_{i2} \frac{dy_2}{dt} + (\mathbf{TA})_{i3} \frac{dy_3}{dt} + (\mathbf{TA})_{i4} \frac{dy_4}{dt} \\ = T_{i1}r_1 + T_{i2}r_2 + T_{i3}r_3 + T_{i4}r_4 \end{aligned} \quad (14-4)$$

رابطه (4-14) را می توان به صورت عددی انتگرالگیری نمود. چنانچه این انتگرالگیری بر روی خطوط متصل کننده نقطه P به نقاط A_1 و A_2 که مطابق با مقادیر ویژه λ_i (\hat{c}_t و $-\hat{c}_f$) می باشند و نیز بر روی خطوط متصل کننده نقطه P به نقاط A_3 و A_4 که مطابق با مقادیر ویژه λ_i ($-\hat{c}_t$ و \hat{c}_f) می باشند انجام گیرد. شکل روابط سازگاری به صورت زیر حاصل خواهد شد.

$$\lambda_1 \rightarrow (\mathbf{TA})_{11}(V_p - V_{A_1}) + (\mathbf{TA})_{12}(H_p - H_{A_1}) + (\mathbf{TA})_{13}(\dot{u}_{zP} - \dot{u}_{zA_1}) + (\mathbf{TA})_{14}(\sigma_{zP} - \sigma_{A_1}) = \Delta t [T_{11}r_1 + T_{12}r_2 + T_{13}r_3 + T_{14}r_4] \quad (15-4)$$

$$\lambda_2 \rightarrow (\mathbf{TA})_{21}(V_p - V_{A_2}) - (\mathbf{TA})_{22}(H_p - H_{A_2}) + (\mathbf{TA})_{23}(\dot{u}_{zP} - \dot{u}_{zA_2}) - (\mathbf{TA})_{24}(\sigma_{zP} - \sigma_{A_2}) = \Delta t [T_{21}r_1 + T_{22}r_2 + T_{23}r_3 + T_{24}r_4] \quad (16-4)$$

$$\lambda_3 \rightarrow (\mathbf{TA})_{31}(V_p - V_{A_3}) + (\mathbf{TA})_{32}(H_p - H_{A_3}) + (\mathbf{TA})_{33}(\dot{u}_{zP} - \dot{u}_{zA_3}) + (\mathbf{TA})_{34}(\sigma_{zP} - \sigma_{A_3}) = \Delta t [T_{31}r_1 + T_{32}r_2 + T_{33}r_3 + T_{34}r_4] \quad (17-4)$$

$$\lambda_4 \rightarrow (\mathbf{TA})_{41}(V_p - V_{A_4}) - (\mathbf{TA})_{42}(H_p - H_{A_4}) + (\mathbf{TA})_{43}(\dot{u}_{zP} - \dot{u}_{zA_4}) - (\mathbf{TA})_{44}(\sigma_{zP} - \sigma_{A_4}) = \Delta t [T_{41}r_1 + T_{42}r_2 + T_{43}r_3 + T_{44}r_4] \quad (18-4)$$

در این روابط، اندیس P نشاندهنده متغیرهای مجهول در گام زمانی فعلی (گام زمانی مجهول) و اندیس‌های A_1, A_2, A_3 و A_4 نشانگر مقادیر محاسبه شده در گام زمانی قبلی در محلی که خطوط خروجی از P با شیب خطوط مشخصه آن خط زمانی را قطع کند می‌باشند، مطابق شکل ۴-۱ و شکل ۴-۲. شیب هر یک از خطوط مشخصه برابرست با معکوس مقدار ویژه نظیر آن خط. در این تحقیق شبکه مربوط به خطوط مشخصه به گونه‌ای بنا می‌شود که گام زمانی به کار رفته شده در آنالیز عددی براساس سرعت موج فشاری (و نه موج تنشی) تعیین گردد. مرجع [Tijsseling, 1993] اطلاعات کاملی در مورد انواع شبکه‌های ممکن و مزیت و مضرت هر کدام ارائه می‌نماید. که در ادامه به بخشی از آن می‌پردازیم. درایه‌های ماتریس \mathbf{T} در معادلات (۴-۱۵) الی (۴-۱۷) به صورت زیر می‌باشند.

$$T_{11} = T_{21} = 1, \quad T_{12} = -T_{22} = \hat{c}_f, \quad T_{13} = T_{23} = 2v \left(\frac{\hat{c}_f}{c_t} \right)^2 \left(1 - \left(\frac{\hat{c}_f}{c_t} \right)^2 \right)^{-1}, \quad (19-4)$$

$$T_{14} = -T_{24} = 2v\hat{c}_f \left(1 - \left(\frac{\hat{c}_f}{c_t}\right)^2\right)^{-1}, \quad T_{34} = T_{41} = \frac{-\rho_f v D c_f^2}{2Ee} \left(1 - \left(\frac{\hat{c}_f}{c_t}\right)^2\right)^{-1}, \quad (20-4)$$

$$T_{32} = -T_{42} = \frac{-\rho_f v D c_f^2 \hat{c}_t}{2Ee} \left(1 - \left(\frac{c_f}{\hat{c}_t}\right)^2\right)^{-1}, \quad (21-4)$$

$$T_{33} = T_{43} = 1 + \frac{2\rho_f v^2 D c_f^2}{2Ee} \left(1 - \left(\frac{c_f}{\hat{c}_t}\right)^2\right)^{-1} \quad T_{34} = -T_{44} = \hat{c}_t, \quad (22-4)$$

در اینجا جهت ساده‌تر نمودن حل عددی ارایه شده در این بخش، یک فرض ساده کننده انجام می‌شود اینکه بین جریان سیال و دیواره لوله اصطکاکی وجود ندارد. قابل ذکر است که این فرض به خصوص در لوله‌های ویسکوالاستیک کاملاً منطقی می‌باشد زیرا در آزمایش‌های انجام شده در این نوع لوله‌ها، دیده شده است که اثر میرایی اصطکاک بین سیال و لوله در مقایسه با ویسکوالاستیسیته، بسیار کوچک بوده و قابل صرف‌نظر است. همچنین درایه‌های ماتریس (TA) پس از محاسبه که ضرائب معادلات سازگاری (۴-۱۵) الی (۴-۱۸) می‌باشد به شرح زیر می‌باشد.

$$(TA)_{11}=(TA)_{21}=1, \quad (TA)_{12}=- (TA)_{22}=\frac{g}{c_f} \left\{ \frac{\hat{c}_f}{c_f} + 2v^2 \frac{\rho_f D c_f \hat{c}_f}{\rho_t 2e c_t^2} \left(1 - \left(\frac{\hat{c}_f}{c_t}\right)^2\right)^{-1} \right\}, \quad (23-4)$$

$$(TA)_{13}=(TA)_{23}=2v \left(\frac{\hat{c}_f}{c_t}\right)^2 \left(1 - \left(\frac{\hat{c}_f}{c_t}\right)^2\right)^{-1}, \quad (TA)_{14}=- (TA)_{24}=-\frac{2v}{\rho_t \hat{c}_f} \left(\frac{\hat{c}_f}{c_t}\right)^2 \left(1 - \left(\frac{\hat{c}_f}{c_t}\right)^2\right)^{-1} \quad (24-4)$$

$$(TA)_{31}=(TA)_{41}=-v \frac{\rho_f D}{\rho_t 2e} \left(\frac{c_f}{c_t}\right)^2 \left(1 - \left(\frac{c_f}{\hat{c}_t}\right)^2\right)^{-1}, \quad (25-4)$$

$$(TA)_{32}=- (TA)_{42}=-v \frac{\rho_f D g}{\rho_t 2e c_t} \left(\frac{\hat{c}_t}{c_t}\right) \left(\frac{c_f}{\hat{c}_t}\right)^2 \left(1 - \left(\frac{c_f}{\hat{c}_t}\right)^2\right)^{-1} \quad (26-4)$$

$$(\mathbf{TA})_{33}=(\mathbf{TA})_{43}=1+2v\frac{\rho_f D}{\rho_t} \frac{D}{2e} \left(\frac{c_f}{c_t}\right)^2 \left(1-\left(\frac{\hat{c}_t}{c_t}\right)^2\right)^{-1}, \quad (\mathbf{TA})_{34}=- (\mathbf{TA})_{44}=\frac{1}{\rho_t c_t} \left(\frac{\hat{c}_t}{c_t}\right), \quad (27-4)$$

ترم‌های شامل انتگرال کانولوشن در سمت راست معادله ((۴-۶) در بردار \mathbf{r}) بر حسب مجهولات در گام زمانی فعلی، با استفاده از رابطه ((۳-۴۷)، ((۳-۶۴)، ((۴-۲) و ((۴-۴) صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\frac{\partial I_{\hat{H}}}{\partial t} \approx a_h H_p + b_h, \quad a_h = \sum_{k=1}^{N_{kv}} \left(\frac{J_k}{\Delta t} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} \right) \right),$$

$$b_h = (H(t - \Delta t) - H_0) \left(\sum_{k=1}^{N_{kv}} \left(\frac{J_k}{\tau_k} e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} - \frac{J_k}{\Delta t} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} \right) \right) \right) - \left(\sum_{k=1}^{N_{kv}} \left(\frac{e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}}}{\tau_k} \right) \right) I_{\hat{H}} - a_h H_0 \quad (28-4)$$

$$\frac{\partial I_{\sigma_z}}{\partial t} \approx a_z \sigma_{zP} + b_z, \quad a_z = \sum_{k=1}^{N_{kv}} \left(\frac{J_k}{\Delta t} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} \right) \right),$$

$$b_z = (\sigma_z(t - \Delta t)) \left(\sum_{k=1}^{N_{kv}} \left(\frac{J_k}{\tau_k} e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} - \frac{J_k}{\Delta t} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} \right) \right) \right) - \left(\sum_{k=1}^{N_{kv}} \left(\frac{e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}}}{\tau_k} \right) \right) I_{\sigma_z} \quad (29-4)$$

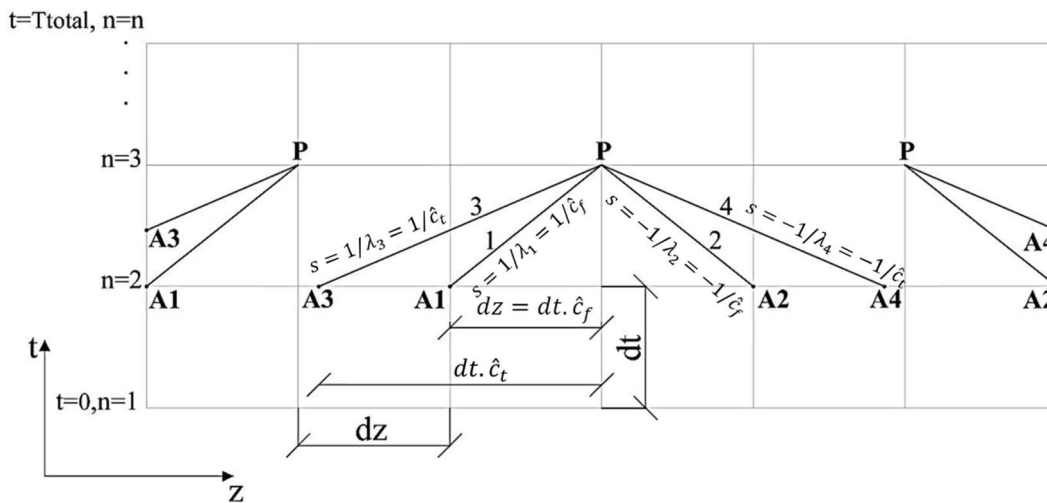
که در آن زمان t معادل زمان مربوط به نقطه P در شکل ۴-۱ و شکل ۴-۲ می‌باشد. روابط (۲۸-۴) و (۲۹-۴) این امکان را بوجود می‌آورند که بتوان بر دار τ را به صورت توابع خطی از مجهولات در زمان t و مقادیر متغیرهای محاسبه شده در گام زمانی قبل $(t - \Delta)$ ارائه داد. حل همزمان معادلات سازگاری (۴-۱۵) الی (۴-۱۸) همراه با شرایط اولیه و شرایط مرزی در هر گام زمانی با استفاده از یک ماتریس معکوس ثابت، جواب مطلوب را می‌توان به ما بدهد.

۴-۴-شبکه مشبندی

برای حل عددی با روش کاملاً مشخصه (full MOC) دو شبکه موج فشاری و موج تنشی در مرجع [Tijsseling, 1993] پیشنهاد شده است که هر کدام ویژگی، مزایب و معایبی دارد که به بخشی از آن پرداخته می‌شود. در این مطالعه از روش مشبندی موج فشاری استفاده شده است.

۴-۴-۱- شبکه موج فشاری

در این روش مشبندی، اندازه مش‌ها تابع سرعت موج فشاری می‌باشد ($\frac{\Delta z}{\Delta t} = \hat{c}_f$)، در نتیجه با توجه به شیب خطوط مشخصه ($s = 1/\lambda_i$, $i = 1,2,3,4$) و معادلات (۸-۴) و (۹-۴)، محل نقطه P و نقاط (A_i , $i = 1,2,3,4$) به کار گرفته شده در معادلات سازگاری (۱۵-۴) الی (۱۸-۴) در صفحه $z - t$ در شکل ۱-۴ مشخص شده است.



شکل ۱-۴ جزئیات شبکه بر اساس سرعت موج فشاری

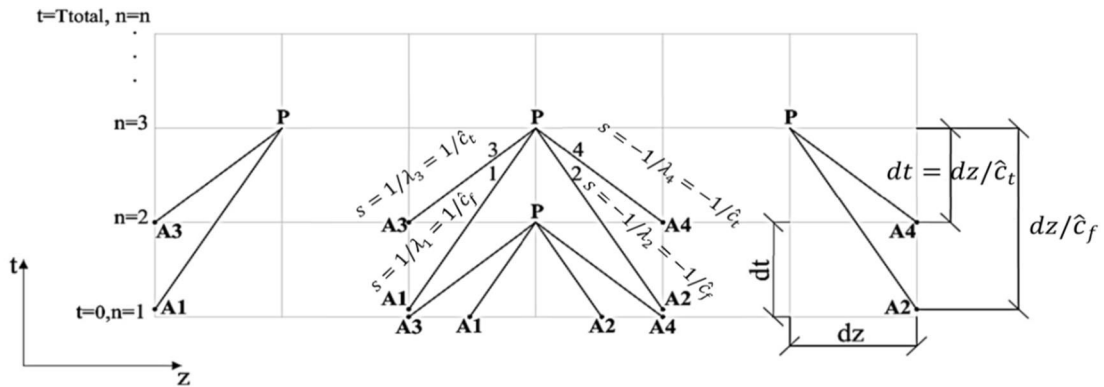
در این نوع مشبندی، خطوط مشخصه نظیر موج تنش (۳ و ۴)، لزوماً نقاط شبکه را در گام زمانی قبل قطع نمی‌کنند (نقاط A_3 و A_4). راه حل این مشکل استفاده از میانبایی خطی با استفاده از مقادیر محاسبه شده نظیر نزدیکترین گره در گام زمانی قبل می‌باشد. برای نقاطی که خطوط مشخصه نظیر

آنها خط زمانی مربوط به گام زمانی قبل را قطع نمی‌کند مانند نقاط A_3 و A_4 در مرزهای چپ و راست شکل ۴-۱، میانمایی با استفاده از مقادیر گام زمانی فعلی و گام زمانی قبلی در مرزها انجام می‌شود. در این صورت ابتدا باید گره‌های مرزی محاسبه شوند و سپس گره‌های داخلی. زیرا مقادیر محاسبه شده در مرزها جهت انجام میانمایی که بین مقادیر مرزی در گام فعلی و قبلی انجام می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این روش مش‌بندی همانطور که مشخص است، در محاسبات نیازمند به درون‌یابی‌هایی می‌باشد، تعداد این درون‌یابی‌ها به خصوص در مرزهای میانی به دلیل وجود تکیه‌گاه، نسبت به حالت ساده (بدون تکیه‌گاه) افزایش می‌یابد و این امر ممکن است باعث افزایش خطای محاسبات شود. تعداد نقاط قبل و بعد تکیه‌گاه‌ها که درگیر درون‌یابی می‌شوند به شرایط مسئله (نسبت صحیح \hat{c}_t/\hat{c}_f) بستگی دارد.

۴-۴-۲- شبکه موج تنشی

در این روش مش‌بندی، اندازه مش‌ها تابع سرعت موج تنشی می‌باشد ($\frac{\Delta z}{\Delta t} = \hat{c}_t$)، در نتیجه با توجه به شیب خطوط مشخصه ($s = 1/\lambda_i$, $i = 1,2,3,4$) و معادلات (۴-۸) و (۴-۹)، محل نقطه P و نقاط (A_i , $i = 1,2,3,4$) به کار گرفته شده در معادلات سازگاری (۴-۱۵) الی (۴-۱۸) در صفحه $z - t$ در شکل ۴-۲ مشخص شده است.



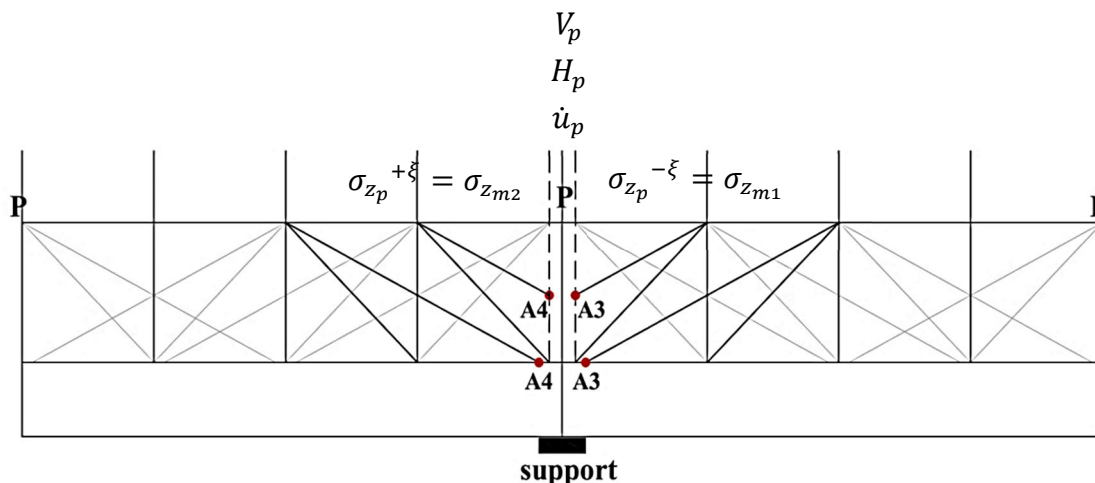
شکل ۲-۴ جزئیات شبکه بر اساس سرعت موج تنشی

با توجه به شبکه موج تنشی در شکل ۲-۴، خطوط مشخصه نظیر موج فشار (۱ و ۲)، لزوماً نقاط شبکه را در گام زمانی قبل قطع نمی‌کنند (نقاط A_2 و A_1). همانطور که مشخص است در این روش نقاط A_1 و A_2 خطوط شبکه را با توجه به شرایط مسئله (مقادیر \hat{c}_t و \hat{c}_f)، در بیشتر از یک گام زمانی قبلی قطع می‌کند بنابراین محاسبه این نقاط باید از طریق میانبایی خطی با استفاده از مقادیر محاسبه شده نظیر گره‌ها در گام‌های زمانی قبلی مورد نظر صورت گیرد. همچنین برای نقاطی که در گام‌های زمانی ابتدایی قرار گرفته‌اند (بسته به شرایط مسئله، در شکل ۲-۴ گام زمانی $n=2$)، برای محاسبه نقاط A_1 و A_2 باید درونیابی روی خط زمانی ($t=0$) یا مقادیر مربوط به شرایط اولیه مسئله انجام شود. در این روش مش‌بندی هم مانند روش قبل نیاز به درونیابی می‌باشد اما در روش موج تنشی تعداد این درونیابی در مرزهای میانی که به دلیل وجود تکیه‌گاه‌ها ایجاد شده است کمتر از روش موج فشاری می‌باشد، البته مسئله کاهش تعداد درونیابی سبب تسهیل نوشتن کد می‌شود، اما به دلیل کوچک شده، زمان محاسبات افزایش می‌یابد و به علاوه این موارد، اگرچه کاهش درونیابی‌ها ممکن است باعث کاهش خطای محاسبات شود اما چون در این روش برای محاسبات از چند گام زمانی قبل‌تر استفاده می‌شود (نقاط A_2 و A_1)، این موضوع به خصوص در مسائل مربوط به ویسکوالاستیسیته که خاصیت میرایی مصالح نسبت به زمان برای ما مهم می‌باشد، ممکن است به خوبی نتواند مقدار میرایی

را با گذشت زمان نشان دهد، در نتیجه چون هدف این مطالعه نشان دادن میرایی سیستم به کار رفته شده، می‌باشد از روش مش‌بندی اول (سرعت موج فشاری) استفاده شده است.

۴-۵- پیاده سازی شرایط مرزی

در روش حل کاملاً مشخصه معادلات دیفرانسیلی ارتعاش محوری لوله و پیوستگی و مومنت سیال به ۴ رابطه مشخصه (دو معادله مربوط به سیال و دو معادله مربوط به سازه است) تبدیل می‌شوند. در مرزها، با توجه به اینکه همواره یک سمت هر مرز با نقاط درونی محدوده حل در ارتباط است همیشه می‌توان روابط مشخصه مناسبی را برای آن سمت مرز نوشت، برای مرز سمت راست خطوط مشخصه ۱ و ۳ درگیر هستند پس باید از روابط (۴-۱۵) و (۴-۱۷) و روابط ارائه شده در بخش ۳-۶-، (معادلات (۳-۷۲) و (۳-۷۳) مربوط به شرط مرزی شیر) و برای مرز سمت چپ خطوط مشخصه ۲ و ۴ درگیر هستند پس باید از روابط (۴-۱۶) و (۴-۱۸) و روابط ارائه شده در بخش ۳-۶-، (معادلات (۳-۷۰) و (۳-۷۱) مربوط به شرط مرزی مخزن) استفاده شود (شکل ۴-۳). در فرآیند حل عددی MOC بهتر است با توجه به مرز خاص مورد بررسی، تمام روابط لازم (روابط مشخصه مربوط به آن سمت از مرز که با نقاط میانی در ارتباط است و روابط خاص مربوط به آن مرز مورد نظر مانند رابطه‌های اریفیس و تعادل نیرو برای مرز شیر یا روابط پیوستگی و تعادل نیرو برای مرز تقاطع) نوشته شوند و پس از حل همزمان تمام روابط به صورت سمبلیک، عبارات صریحی برای هر کدام از مجهولات در محل مرز به دست آورد. آنچه برای ما مورد اهمیت است پیاده سازی شرایط مرزی تکیه‌گاه در روش کاملاً مشخصه می‌باشد که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۴ جزئیات شبکه و خطوط مشخصه در مرزها

۴-۵-۱- شرط مرزی تکیه‌گاه

شکل ۳-۴ وضعیت یک تکیه‌گاه را در طول لوله نشان می‌دهد. تکیه‌گاه گره‌ای است که به دلیل وجود تنش (عکس‌العمل) تکیه‌گاه، باعث تغییر مقادیر تنش در دیواره لوله می‌شود، که در اپسیلون قبل و بعد تکیه‌گاه متفاوت خواهد بود. در نتیجه در این نقطه بجای یک مجهول تنش (σ_{z_p}) ، دارای دو مجهول تنش (تنش قبل تکیه‌گاه $(\sigma_{z_p}^{-\xi} = \sigma_{z_{m1}} = \sigma_{z=z_s^-})$ و تنش بعد تکیه‌گاه $(\sigma_{z_p}^{+\xi} = \sigma_{z_{m2}} = \sigma_{z=z_s^+})$ می‌باشد.

همانطور که قبلاً نیز گفته شد وجود تکیه‌گاه باعث ایجاد مرز محاسباتی در میانه شبکه می‌شود، در نتیجه نقاط قبل و بعد تکیه‌گاه در درون‌بایی‌ها تحت تاثیر قرار گرفته به طوری که با حالت ساده (بدون مرز میانی) مطابق با شکل ۳-۴ متفاوت می‌باشد. برای مثال در شکل ۳-۴ در دو گره قبل و دو گره بعد تکیه‌گاه، برای محاسبه مقادیر گام زمانی قبلی در محلی که خطوط مشخصه خروجی نقطه P ، هم خط مکانی و هم خط زمانی را قطع می‌کند، (نقاط A_3 برای بعد تکیه‌گاه و A_4 برای قبل تکیه‌گاه) نیاز به درون‌بایی دارد که محل این نقاط در شکل ۳-۴ مشخص شده است. همچنین مجهولات دیگر شامل سرعت سیال و هد فشار می‌باشد، به علاوه‌ی مجهول سرعت لوله که با توجه به جابه‌جایی لوله و تبدیل آن به سرعت با استفاده از معادله (۳۵-۴) و همچنین نوع تکیه‌گاه که در بخش ۳-۶-۳-۲-۲ بحث شد، به صورت زیر خواهد بود:

- تکیه‌گاه ویسکوالاستیک ساده (مکانیزم تغییر شکل برشی و محوری) : در این حالت با توجه به شکل ۷-۳ و شکل ۸-۳ جابه‌جایی لوله در گره تکیه‌گاه با تغییر شکل تکیه‌گاه برابر می‌باشد. در نتیجه تعداد مجهولات برابر با پنج و نیاز به پنج معادله سازگاری می‌باشد که چهار معادله آن مربوط به خطوط مشخصه است. بنابراین معادلات (۱۵-۳) و (۱۷-۳) برای قبل تکیه‌گاه و معادلات (۱۶-۳) و (۱۸-۳) برای بعد تکیه‌گاه می‌باشد که به صورت زیر تغییر خواهد کرد:

$$\lambda_1 \rightarrow (\mathbf{TA})_{11}(V_p - V_{A_1}) + (\mathbf{TA})_{12}(H_p - H_{A_1}) + (\mathbf{TA})_{13}(\dot{u}_{zP} - \dot{u}_{zA_1}) + (\mathbf{TA})_{14}(\sigma_{z_{m1}} - \sigma_{A_1}) = \Delta t [T_{11}r_1 + T_{12}r_2 + T_{13}r_3 + T_{14}r_4] \quad (۳۰-۴)$$

$$\lambda_2 \rightarrow (\mathbf{TA})_{21}(V_p - V_{A_2}) - (\mathbf{TA})_{22}(H_p - H_{A_2}) + (\mathbf{TA})_{23}(\dot{u}_{zP} - \dot{u}_{zA_2}) - (\mathbf{TA})_{24}(\sigma_{z_{m2}} - \sigma_{A_2}) = \Delta t [T_{21}r_1 + T_{22}r_2 + T_{23}r_3 + T_{24}r_4] \quad (۳۱-۴)$$

$$\lambda_3 \rightarrow (\mathbf{TA})_{31}(V_p - V_{A_3}) + (\mathbf{TA})_{32}(H_p - H_{A_3}) + (\mathbf{TA})_{33}(\dot{u}_{zP} - \dot{u}_{zA_3}) + (\mathbf{TA})_{34}(\sigma_{z_{m1}} - \sigma_{A_3}) = \Delta t [T_{31}r_1 + T_{32}r_2 + T_{33}r_3 + T_{34}r_4] \quad (۳۲-۴)$$

$$\lambda_4 \rightarrow (\mathbf{TA})_{41}(V_p - V_{A_4}) - (\mathbf{TA})_{42}(H_p - H_{A_4}) + (\mathbf{TA})_{43}(\dot{u}_{zP} - \dot{u}_{zA_4}) - (\mathbf{TA})_{44}(\sigma_{z_{m2}} - \sigma_{A_4}) = \Delta t [T_{41}r_1 + T_{42}r_2 + T_{43}r_3 + T_{44}r_4] \quad (۳۳-۴)$$

برای حل مجهولات تنش قبل ($\sigma_{z_{m1}}$) و بعد تکیه‌گاه ($\sigma_{z_{m2}}$) در معادلات (۳۰-۴) الی (۳۳-۴)، معادله شرط مرزی تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (معادلات (۷۳-۳) و (۷۵-۳)) باید مورد استفاده قرار گیرد.

- تکیه‌گاه ویسکوالاستیک لغزشی : در حالت لغزشی جابه‌جایی لوله در گره تکیه‌گاه با توجه به شکل ۹-۳ برابر با جابه‌جایی ناشی از لغزش تکیه‌گاه (تغییر مکان تکیه‌گاه) به اضافه تغییر شکل برشی تکیه‌گاه می‌باشد. بنابراین تعداد مجهولات در حالت لغزشی به هفت می‌رسد، (دو مجهول u_{z_f} و u_{z_s} اضافه می‌شود). در نتیجه علاوه بر معادلات (۲۷-۳) و (۲۹-۳) برای قبل تکیه‌گاه و معادلات (۲۸-۳) و (۳۰-۳) برای بعد تکیه‌گاه، سه معادله دیگر مربوط به معادلات شرط مرزی لازم می‌باشد، با توجه به آنچه که در بخش ۳-۶-۳-۲، بحث شده است، ابتدا فرض می‌شود که تکیه‌گاه وارد فاز لغزش نشده

است و مجهولات و عکس‌العمل تکیه‌گاه محاسبه می‌شوند، اگر عکس‌العمل به دست آمده تکیه‌گاه از نیروی اصطکاک کمتر باشد، فرض درست است و سه معادله دیگر معادلات شرط مرزی (۷۸-۳)، (۸۰-۳) و (۸۱-۳) می‌باشد، در غیر این صورت وارد فاز لغزش می‌شود، سه معادله دیگر شامل معادلات مرزی (۷۸-۳)، (۸۳-۳) و (۸۴-۳) می‌باشد.

ترم‌های شامل انتگرال کانولوشن در سمت راست معادلات (۷۴-۳)، (۷۶-۳)، (۷۹-۳)، (۸۱-۳)، (۸۲-۳)، (۸۳-۳) و (۸۶-۳) بر حسب مجهول تغییر شکل تکیه‌گاه در گام زمانی فعلی در گره تکیه‌گاه، با استفاده از معادله (۲۹-۳) و (۳-۴) صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$u_z(t) * dG^s(t) \approx c_u u_{zp} + b_u,$$

$$c_u = G^s(0) + \sum_{k=1}^{N_{kv}} \left(\left(-G^s_k - \frac{G^s_k \tau_k}{\Delta t} \left(e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} - 1 \right) \right) \right),$$

$$b_u = u_z(t - \Delta t) \sum_{k=1}^{N_{kv}} \left(+G^s_k e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} + \frac{G^s_k \tau_k}{\Delta t} \left(e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} - 1 \right) \right) + \sum_{k=1}^{N_{kv}} e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} I_{u_z k}(t - \Delta t),$$
(۳۴-۴)

۴-۵-۱-۱- رابطه بین سرعت و جابه‌جایی

در حل معادلات (۴۶-۳)، (۵۱-۳)، (۶۳-۳) و (۶۷-۳) هدف بدست آوردن مجهولات معادلات یعنی سرعت حرکت لوله (\dot{u}_z)، تنش دیواره لوله (σ_z)، سرعت سیال (V)، و هدفشار (H) در گره‌های مختلف می‌باشد اما روابط مربوط به شرط مرزی تکیه‌گاه (شماره روابط ذکر شود) بر حسب جابه‌جایی (u_z) لوله می‌باشد. بنابراین باید روابط را به نحوی استخراج نمود که بتوان شرایط مرزی را به گونه‌ای اعمال کرد که همچنان (\dot{u}_z) به عنوان تنها مجهول باقی بماند و مجهول جدیدی در معادله اضافه نشود. به همین دلیل از فرمول تبدیل جابه‌جایی به سرعت ارائه شده در مرجع [Tijsseling, 1993] استفاده می‌شود.

$$u_z(t) = u_z(t - \Delta t) + \left(\frac{1}{2}\right) (\dot{u}_z(t) + \dot{u}_z(t - \Delta t)) * \Delta t \quad (۳۵-۴)$$

۴-۶- الگوریتم در حل عددی

برنامه تهیه شده جهت حل عددی معادلات ارائه شده با شرایط مرزی خاص تکیه‌گاه ویسکوالاستیک، در نرم افزار متلب^۱، کد نویسی شده است. به این صورت که در آن یک تابع اصلی تعریف شده و سایر زیر تابع‌ها مانند زیر تابع مرتبط با ورودی‌های مورد نیاز، زیر تابع بخش ترم‌ها و ضرائب ویسکوالاستیسیته مربوط به دیواره لوله و تکیه‌گاه و زیر تابع مرتبط با درون‌یابی‌ها در آن قرار داده شده است. پس از خواندن ورودی‌های مورد نیاز مانند مشخصات حاکم بر مسئله از جمله رفتار دیواره لوله (الاستیک، ویسکوالاستیک)، شرایط تکیه‌گاهی (ویسکوالاستیک ساده با تغییر شکل محوری و برشی و ویسکوالاستیک لغزشی)، اثرات تداخلی، مشخصات فیزیکی لوله و تکیه‌گاه‌ها، مقادیر اولیه فشار و دبی و موارد مورد نیاز دیگر در زیرتابع‌های ورودی، برنامه ابتدا وارد محاسبات مربوط به گره‌های مرز چپ و راست و بعد تکیه‌گاه‌ها می‌شود، و در نهایت گره‌های میانه شبکه محاسبه شده و مجهولات جابه‌جایی و سرعت دیواره لوله، هد فشاری، تنش در دیواره لوله و تکیه‌گاه‌ها و سرعت سیال در هر گام زمانی به صورت همزمان محاسبه می‌شوند.

^۱matlab

۵- فصل پنجم: صحت سنجی و ارائه نتایج

۵-۱- مقدمه

پس از ارائه مدل‌های ریاضی (فصل سوم)، روش‌های حل عددی و نحوه پیاده سازی شرایط مرزی (فصل چهارم)، بایستی درستی این موارد قبل از انجام بررسی‌های اصلی مورد ارزیابی قرار گیرند. برای این منظور روش‌های مختلفی وجود دارد. به عنوان مثال می‌توان برای یک مورد خاص که نتایج آزمایشگاهی آن موجود است، خروجی‌های عددی با آن‌ها مقایسه شوند. در صورتی که این مدل‌های مرجع وجود نداشته باشند می‌توان خروجی‌های عددی را در صورت امکان با حل‌های تحلیلی در حالت‌هایی خاص یا با نتایج روش‌های عددی دیگر مقایسه نمود و درستی مدل ریاضی و روش حل را اثبات نمود.

نظر به اینکه هدف از این تحقیق بررسی اثرات تکیه‌گاه‌های مختلف ویسکوالاستیک بر اندرکنش سیال-سازه در پدیده ضربه قوچ در لوله‌های الاستیک و ویسکوالاستیک می‌باشد و مدل‌های ریاضی و روش‌های حل عددی برای این منظور و متناسب با این هدف ارائه گردیده‌اند، برای اثبات درستی آن به دلیل عدم وجود مدل‌های مرجع و آزمایشگاهی، از نتایج عددی مشابه بخشی از کار با روش‌های حل متفاوت، استفاده می‌شود. لذا در این فصل ابتدا با استفاده از نتایج ارائه شده با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری با استفاده از روش MOC-FEM در مرجع [Zanganeh et.al, 2015]، روابط شرط مرزی تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و نحوه پیاده سازی آن به روش full MOC مورد صحت سنجی قرار می‌گیرد. سپس نتایج بررسی اثرات تکیه‌گاه ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی تکیه‌گاه و همچنین اثرات اصطکاک در تکیه‌گاه ویسکوالاستیک با رویکرد تکیه‌گاه‌های لغزشی ویسکوالاستیک در سیستم لوله الاستیک و ویسکوالاستیک به هنگام وقوع ضربه قوچ ارائه خواهد شد.

در این بخش درستی معادلات، روش حل و نحوه پیاده سازی شرط مرزی تکیه‌گاه ویسکوالاستیک، با بررسی نتایج مرجع [Zanganeh et.al, 2015] مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۵-۲-۱- ارائه نتایج مرجع [Zanganeh et.al, 2015] (تاثیر تکیه‌گاه‌های

ویسکوالاستیک با در نظرگرفتن تغییر شکل محوری آن) با به

کارگیری روش (full MOC)

در این مرجع [Zanganeh et.al, 2015]، تاثیر تکیه‌گاه ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل‌های محوری تکیه‌گاه در پدیده ضربه قوچ با در نظر گرفتن اندرکنش سیال-سازه در یک خط لوله (شیر-لوله-مخزن) مورد بررسی قرارگرفته و با استفاده از روش MOC-FEM حل شده است، نتایج ارائه داده شده نشان می‌دهد که استفاده از تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک با مشخصات و تعداد مناسب (متناسب با شرایط خط لوله)، در میرایی و کاهش جابه‌جایی‌های دیواره لوله، ارتعاشات هد فشار ناشی از پدیده FSI و میرایی هد فشار، با گذشت زمان به ویژه در لوله‌های الاستیک بسیار موثر و کارآمد می‌باشد. در ادامه، نتایج حاصل از تحقیق حاضر با در نظر گرفتن شرایط مسئله و مشخصات تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک در مرجع [Zanganeh et.al, 2015] و به کارگیری روش کاملاً مشخصه ارائه و با نتایج آن مقایسه می‌شود.

جهت بررسی اثر تکیه‌گاه ویسکوالاستیک بر پدیده ضربه قوچ در سیستم لوله‌های الاستیک و ویسکوالاستیک، از مشخصات بکاررفته در آزمایش انجام شده در دپارتمان مهندسی عمران و محیط زیست ایمپریال کالج لندن که توسط کواس انجام شده است، استفاده می‌شود. علت این انتخاب این می‌باشد که ابتدا کرامت و همکاران در مرجع [Keramat et.al, 2012] با استفاده از همین آزمایش نتایج اثرات کوپله پواسن و اتصال را در لوله‌های الاستیک و ویسکوالاستیک (بدون تاثیر تکیه‌گاه‌های

ویسکوالاستیک) مورد بررسی قرار داده‌اند و بعد از آن زنگانه در مرجع [Keramat et.al, 2012] و [Zanganeh et.al, 2015]، اثر تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک را اضافه کرده است. بنابراین می‌توان در اینجا با استفاده از این نتایج به بررسی اثرات تکیه‌گاه ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن اندرکنش سیال-سازه در پدیده ضربه‌قوچ پرداخت. مشخصات این آزمایش که در یک سیستم مخزن-لوله-شیر انجام شده است در جدول ۱-۵ داده شده است. همچنین مشخصات تابع خزش تطابقی کالیبره شده مواد ویسکوالاستیک که برای آزمایش ایمپریال کالج در لوله ویسکوالاستیک، با $Q_0 = 1.01 \text{ l/s}$ ، $c_f = 395 \text{ m/s}$ و صرف نظر از اصطکاک غیرماندگار در آنالیزهای عددی، از مقاله [Covas et.al, 2004a] در جدول ۲-۵ ارائه شده است. علت استفاده از روش کالیبراسیون توسط آزمایش ضربه قوچ به جای استفاده از روش تست‌های خزشی برای بدست آوردن توابع خزش تطابقی، حساسیت زیاد رفتار ویسکوالاستیک نسبت به عواملی مانند دما، شرایط تکیه‌گاهی و یکنواخت نبودن مواد لوله می‌باشد.

جدول ۱-۵ داده‌های ورودی مورد نیاز در آزمایش ایمپریال کالج جهت بررسی ضربه قوچ [Covas et.al, 2004a]

طول لوله	قطر داخلی لوله	ضخامت دیواره لوله	جرم مخصوص لوله	مدول یانگ	نسبت پواسن	دبی جریان پایدار	هد مخزن	زمان بستن شیر
277 m	50.6 mm	6.3 mm	5000 kg/m ³	1.43 GPa	0.46	1.01 l/s	45 m	0.09s

برای حل عددی مسئله با توجه با داده‌های جدول ۱-۵ و همچنین تقسیم لوله به تعداد ۵۰ المان (۵۱ گره محاسباتی)، طول هر المان برابر با $\Delta x = \frac{L_p}{50} = 5.54$ ، مقادیر سرعت موج فشاری و تنش برابر با $\hat{c}_t = 372.2067$ ، $\hat{c}_t = 648.1811$ و گام زمانی بر اساس شبکه محاسباتی موج فشاری برابر با $dt = \frac{\Delta x}{\hat{c}_f} = 0.0149$ می‌باشد.

جدول ۲-۵ مشخصات لوله ویسکوالاستیک [Zanganeh et.al, 2015]

تعداد المان کلوین-ویت	$J_0 (10^{-10} \text{Pa}^{-1})$	$\tau_k (s)$, $J_k (10^{-10} \text{Pa}^{-1})$				
		$\tau_1=0.05$	$\tau_2=0.5$	$\tau_3=1.5$	$\tau_4=5$	$\tau_5=10$
5	7.00	$J_1=1.057$	$J_2=1.054$	$J_3=0.9051$	$J_4=0.2617$	$J_5=7.456$

قابل توجه است، تعداد المان‌های مورد نیاز جهت مدلسازی صحیح رفتار ویسکوالاستیک یک ماده به زمانی که آن ماده به مقدار حدی‌اش همگرا می‌شود بستگی دارد. به عبارت دیگر در یک مساله دینامیکی ویسکوالاستیک هر چه المان‌های بیشتری مورد نیاز باشد نشان دهنده این است که آن ماده ویسکوالاستیک دیرتر به مقدار حدی‌اش همگرا خواهد شد و بالعکس. از آنجایی که این تابع مربوط به ماده پلی‌اتیلن با چگالی بالاست (HPDE) و از ماده PVC ویسکوزتر می‌باشد، به همین دلیل زمان‌های تاخیر بزرگتر و تعداد المان‌های کلوین-ویت بیشتری برای توصیف دقیق‌تر این ماده ویسکوالاستیک نیاز است.

سیستم دارای یک تکیه‌گاه مرزی ویسکوالاستیک در محل شیر (تکیه‌گاه مرزی) و چهار تکیه‌گاه ویسکوالاستیک در طول لوله (تکیه‌گاه‌های میانی) در محل‌های، $z_1 = 55.4$ ، $z_2 = 110.8$ و $z_3 = 166.2$ و $z_4 = 221.6$ با مشخصات داده شده در جدول ۳-۵ می‌باشد.

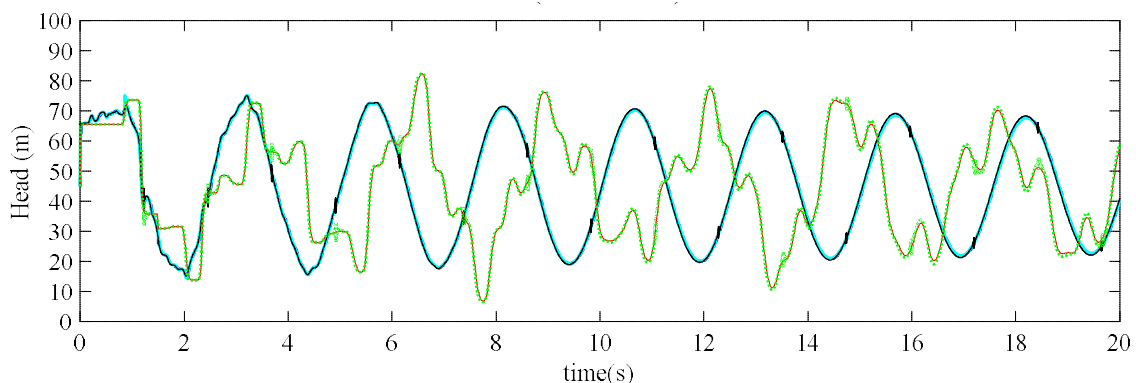
جدول ۳-۵ مشخصات تکیه‌گاه ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری [Zanganeh et.al, 2015]

$L_{sm}(m)$ (طول تکیه‌گاه‌های میانی)	$L_s(m)$ (طول تکیه‌گاه‌های مرزی)	A_s	$G_\infty (10^6 \text{Pa})$	$\tau_k (10^{-2} \text{s})$, $G_k (10^7 \text{Pa})$		
				$\tau_1=0.1$	$\tau_2=1$	$\tau_3=5$
2	1	$0.11 \times 10^{-2} \text{m}^2$	6.5	$G_1=0.65$	$G_2=4.55$	$G_3=0.65$

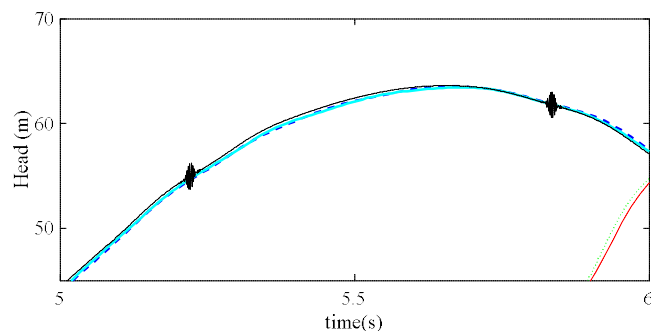
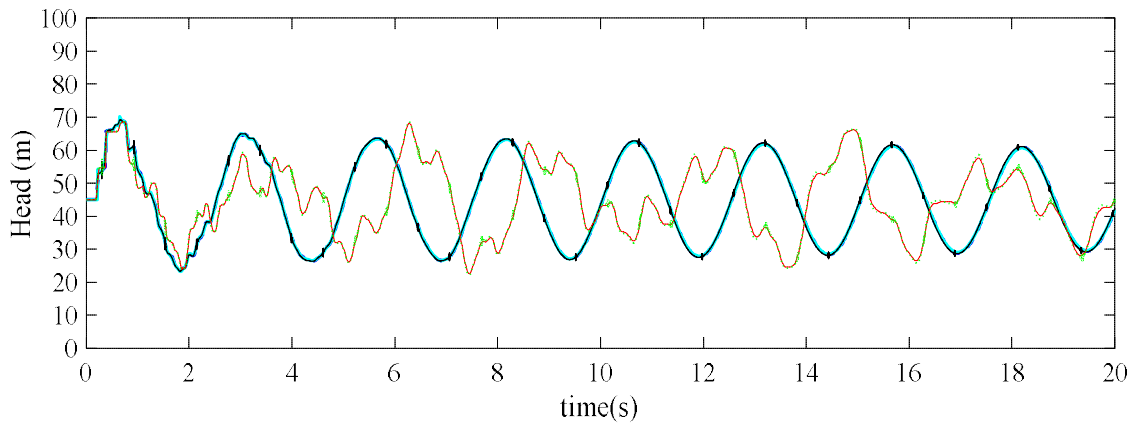
۵-۲-۱-۱- لوله الاستیک با تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر

شکل محوری)

Error! Reference source not found. شکل ۵-۱، شکل ۵-۲ به ترتیب نتایج هد فشار در گره شیر و گره میانی در لوله الاستیک با در نظر گرفتن هر دو کوپله اتصال و پواسن، در حالتی که از تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل محوری) استفاده شود با به کارگیری روش حل (full MOC) با خط‌چین آبی پرننگ بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار و خط آبی روشن بر اساس شبکه مش‌بندی موج تنش در مقایسه با روش (MOC-FEM) در مرجع [Zanganeh et.al, 2015] که با خط مشکی، مشخص شده است را نشان می‌دهد، همچنین حالت ساده و بدون تکیه‌گاه (حرکت محوری شیر و سایر المان‌های لوله در جهت محوری کاملاً آزاد است) با بکارگیری روش (full MOC) با خط قرمز و روش (MOC-FEM) با نقطه‌چین سبز که در مرجع [Keramat et.al, 2012] ارائه شده است، نیز نشان داده می‌شود.

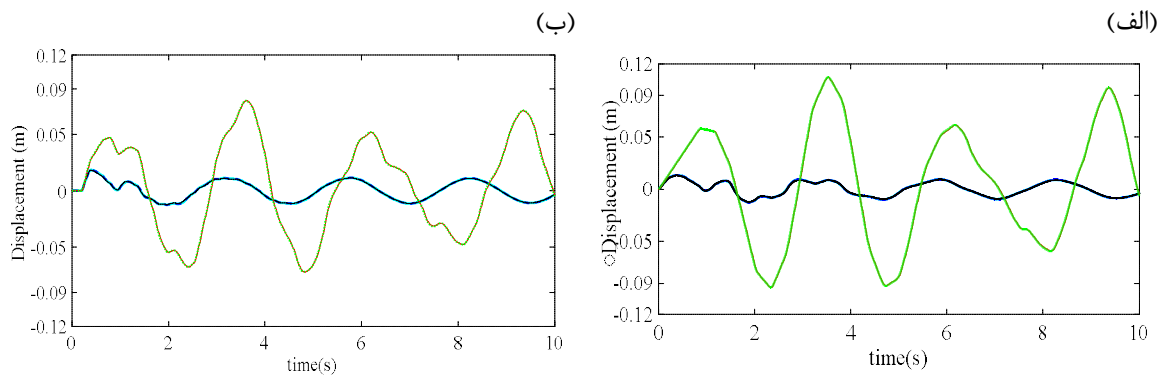


شکل ۵-۱ تاریخچه هد فشار در گره شیر در لوله الاستیک با تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل محوری) و هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC: شبکه مش بر اساس موج فشار (خط چین آبی تیره)، شبکه مش بر اساس موج تنش (آبی روشن)، با روش MOC-FEM (خط مشکی) و بدون تکیه‌گاه و با هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشار (خط قرمز)، با روش MOC-FEM (نقطه‌چین سبز)



شکل ۵-۲ تاریخچه هد فشار در گره میانی در لوله الاستیک با تکیه‌گاه های ویسکوالاستیک (مکانیزم محوری) و هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC: شبکه مش بر اساس موج فشار (خط چین آبی تیره)، شبکه مش بر اساس موج تنش (آبی روشن)، با روش MOC-FEM (خط مشکی) و بدون تکیه‌گاه و با هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشار (خط قرمز)، با روش MOC-FEM (نقطه چین سبز)

شکل ۵-۳، نتایج تاریخچه جابه‌جایی دیواره لوله الاستیک با در نظر گرفتن هر دو کوپله اتصال و پواسن، در حالتی که از تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل محوری) استفاده شود، با به کارگیری روش حل (full MOC) با خط چین آبی پررنگ بر اساس شبکه مش بندی موج فشار و خط آبی روشن بر اساس شبکه مش بندی موج تنش در مقایسه با روش (MOC-FEM) در مرجع [Zanganeh et.al, 2015] که با خط مشکی، مشخص شده است را نشان می‌دهد، همچنین حالت ساده و بدون تکیه‌گاه (حرکت محوری شیر و سایر المان‌های لوله در جهت محوری کاملاً آزاد است) با به کارگیری روش (full MOC) با خط قرمز و روش (MOC-FEM) با نقطه چین سبز که در مرجع [Keramat et.al, 2012] ارائه شده است، نیز نشان داده می‌شود.



شکل ۳-۵ تاریخچه جابه‌جایی در الف: گره شیر و ب: در گره میانی در لوله الاستیک با تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل محوری) و هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC: شبکه مش بر اساس موج فشار (خط چین آبی تیره)، شبکه مش بر اساس موج تنش (آبی روشن)، با روش MOC-FEM (خط مشکی) و بدون تکیه‌گاه و با هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشار (خط قرمز)، با روش MOC-FEM (نقطه‌چین سبز)

همانطور که در شکل‌ها مشخص است، میرایی حاصل از بکارگیری تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک در طول لوله الاستیک به دو صورت ظاهر می‌شود. یکی میرایی در ارتعاشات هد فشار و دیگری در میرای و کاهش حداکثر هدهای فشار. در اینجا ارتعاشات هد فشار ناشی از FSI پس از تقریباً چهار سیکل، کاملاً میرا می‌شود. اما میرایی هد فشار با سرعت کمی اتفاق می‌افتد که حتی پس از گذشت ۲۰ ثانیه، در حداکثر هدهای فشاری کاهش چشمگیری ایجاد نمی‌شود که علت آن می‌تواند افزایش سختی کل سیستم و کاهش جابه‌جایی‌های محوری لوله با توجه به (شکل ۳-۵) نسبت به حالت بدون تکیه‌گاه (آزاد) باشد، همچنین این موضوع می‌تواند باعث جلوگیری از پارگی خط لوله بدلیل کاهش جابه‌جایی‌ها شود.

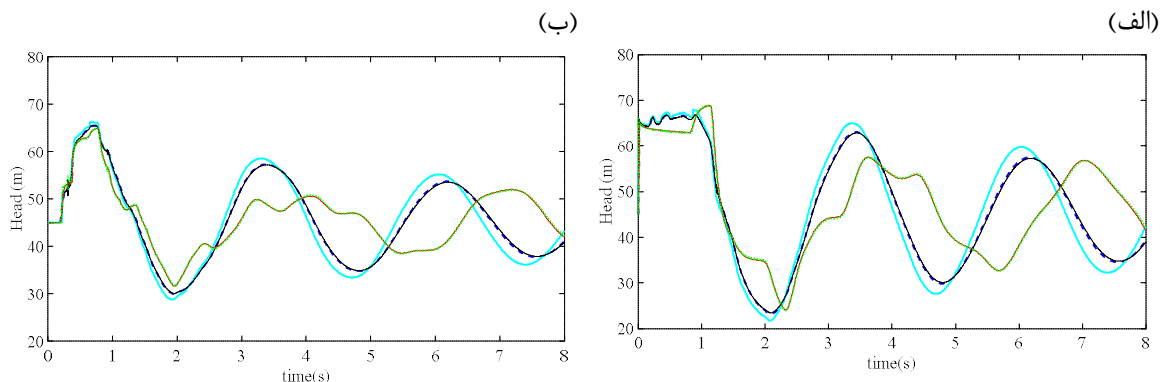
نتایج مربوط به تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک با روش کاملاً مشخصه (full MOC) با دو نوع مش‌بندی موج فشاری (خط‌چین آبی تیره) و موج تنشی (خط آبی روشن) به نتایج مربوط به مرجع [Zanganeh et.al, 2015] با روش MOC-FEM (خط مشکی) کاملاً منطبق می‌باشد، در نتیجه می‌توان گفت که این امر نشان دهنده صحیح بودن معادلات و شرایط مرزی استخراج شده، نحوه اعمال و حل آن‌ها می‌باشد.

علاوه بر این همانطور که قبلا اشاره شده است به دلیل ناپیوستگی‌هایی که در مسائل FSI وجود دارد، در نتایج به دست آمده به روش MOC-FEM، در بعضی از قسمت‌های نمودار (شکل ۲-۵-۲ ناحیه بزرگنمایی شده) دارای نوساناتی می‌باشد، اما در روش full MOC با توجه به نتایج، این نوسانات وجود نخواهد داشت در نتیجه می‌توان بعنوان یک مرجع دقیق‌تر از آن استفاده کرد.

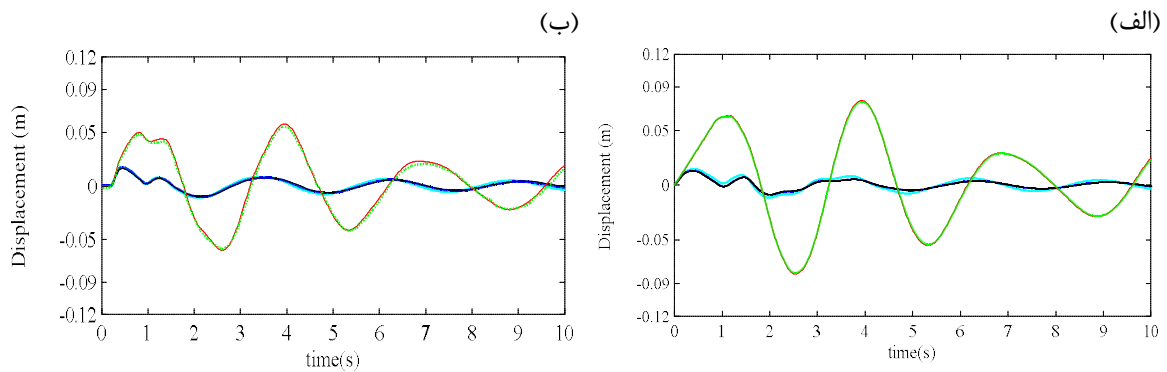
۲-۱-۲-۵ - لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک (مکانیزم

تغییر شکل محوری)

اگر به جای بکارگیری مصالح الاستیک در دیواره لوله، از مصالح ویسکوالاستیک با مشخصات جدول ۲-۵ استفاده شود، نتایج تاریخچه هد فشاری در (شکل ۴-۵) و نتایج تاریخچه جابه‌جایی دیواره لوله در (شکل ۵-۵) در پنج حالت مذکور بخش قبل نشان داده شده است.



شکل ۴-۵ تاریخچه هد فشاری در الف: گره شیر و ب: در گره میانی در لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل محوری) و هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC: شبکه مش بر اساس موج فشار (خط چین آبی تیره)، شبکه مش بر اساس موج تنش (آبی روشن)، با روش MOC-FEM (خط مشکی) و بدون تکیه‌گاه و با هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشار (خط قرمز)، با روش MOC-FEM (نقطه‌چین سبز)



شکل ۵-۵ تاریخچه جابه‌جایی الف: در گره شیر و ب: در گره میانی در لوله الاستیک با تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل محوری) و هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC؛ شبکه مش بر اساس موج فشار (خط چین آبی تیره)، شبکه مش بر اساس موج تنش (آبی روشن)، با روش MOC-FEM (خط مشکی) و بدون تکیه‌گاه و با هر دو کوپله اتصال و پواسن، با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشار (خط قرمز)، با روش MOC-FEM (نقطه‌چین سبز)

همانطور که در شکل ۴-۵ نشان می‌دهد، با توجه به نتایج هد فشار در لوله‌های ویسکوالاستیک، وجود تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک، جهش‌های فشاری ناشی از FSI را نسبت به حالت آزاد کاهش می‌دهد، اما به طور کلی تاثیر وجود تکیه‌گاه‌ها با حالت بدون آن (آزاد) در لوله‌های ویسکوالاستیک تقریباً مشابه می‌باشد، که دلیل آن می‌تواند استفاده از خود مصالح میراکننده ویسکوالاستیک در سازه اصلی لوله باشد، همچنین حالت تغییرات نمودار هد فشاری نیز عوض شده است که ناشی از بروز میرایی در هد فشار و وجود تکیه‌گاه‌ها نیز می‌باشد. قابل ذکر است در این حالت، مانند بخش (۵-۲-۱-۱) به دلیل وجود تکیه‌گاه‌ها و افزایش سختی سیستم، میرایی هد فشاری چشمگیر نمی‌باشد و جابه‌جایی‌های محوری بسیار کاهش پیدا می‌کند.

نتایج مربوط به تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل محوری) در لوله ویسکوالاستیک با روش (full MOC) با نوع مش‌بندی موج فشاری (خط‌چین آبی تیره) به نتایج مربوط به مرجع [Zanganeh et.al, 2015] با روش MOC-FEM (خط مشکی) کاملاً منطبق می‌باشد، و همانطور که گفته شد نشان دهنده صحیح بودن معادلات و شرایط مرزی استخراج شده و نحوه اعمال و حل آن‌ها می‌باشد. البته با توجه به شکل ۴-۵، نتایج هد فشاری در لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه‌های

ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل محوری) با روش (full MOC) و مش بندی موج تنشی (رنگ آبی روشن) نسبت نتایج مرجع کمی متفاوت است و مقادیر فشار به دست آمده بیشتر می باشد، دلیل این امر استفاده از چند گام زمانی قبل تر در محاسبات مربوط به روش مش بندی بر اساس سرعت موج تنشی می باشد زیرا در مسائل مربوط به اثر ویسکوالاستیسیته، میرایی و خواص مصالح با گذشت زمان مشخص می شود.

۵-۲-۲- نتایج تاثیر تکیه گاه های ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن مکانیزم

تغییر شکل برشی آن و بکارگیری روش (full MOC)

با توجه به آنچه که در بخش (۵-۲-۱) بحث شده است در صورتی که فرض شود تنش های FSI (نیروهای محوری) که در دیواره لوله به وجود می آید باعث تغییر شکل برشی تکیه گاه شوند، نتایج ارائه شده در دو بخش (۵-۲-۱-۱) و (۵-۲-۱-۲) تغییر خواهد کرد، همچنین مشخصات هندسی تکیه گاه های ویسکوالاستیک به دلیل تغییر در شکل و رفتار آن نیز تغییر خواهد کرد (شکل ۳-۸)، اما مشخصات مصالح لوله، تکیه گاه ها و محل تکیه گاه ها همانند آنچه که در بخش (۵-۲-۱) آمده است، می باشد، (جدول ۵-۴) مشخصات کامل تکیه گاه های ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی را نشان می دهد.

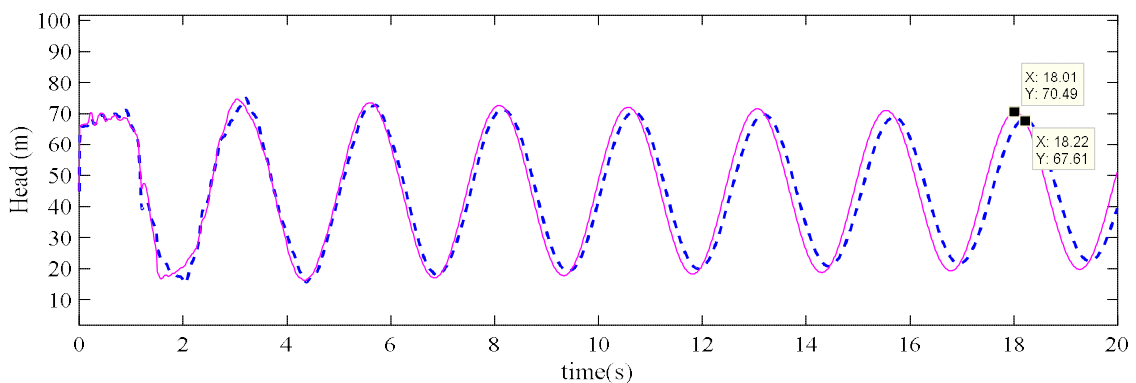
جدول ۴-۵ مشخصات تکیه گاه ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن مکانیزم برشی (شکل ۳-۸)

$h_{sm}(m)$	$h_s(m)$	A_{sv}	A_{sv}	$G_{\infty}(10^6)$	$\tau_k(10^{-2}s)$, $G_k(10^7 Pa)$		
(ارتفاع تکیه گاه های میانی)	(ارتفاع تکیه گاه های مرزی)	سطح مقطع برشی تکیه گاه مرزی	سطح مقطع برشی تکیه گاه مرزی		$\tau_1=0.1$ $G_1=0.65$	$\tau_2=1$ $G_2=4.55$	$\tau_3=5$ $G_3=0.65$
0.2	0.2	$0.13 \times 10^{-2} m^2$	$0.16 \times 10^{-2} m^2$	6.5			

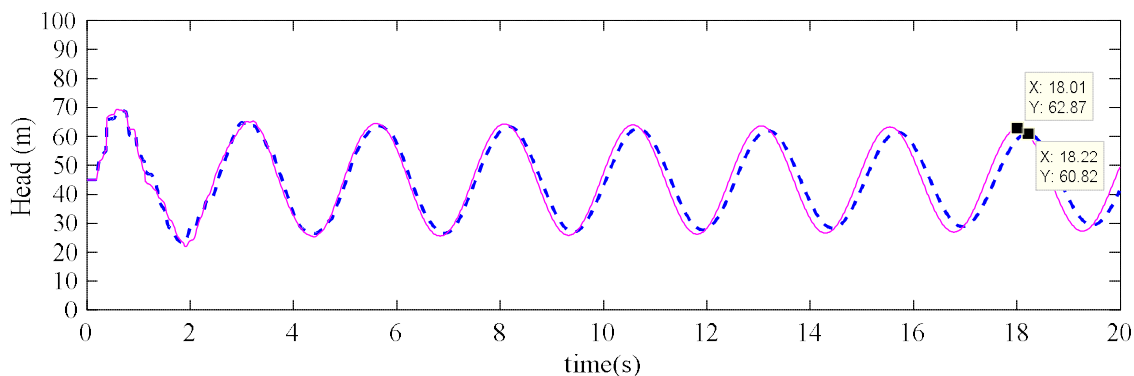
۵-۲-۱- لوله الاستیک با تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن

مکانیزم تغییر شکل برشی

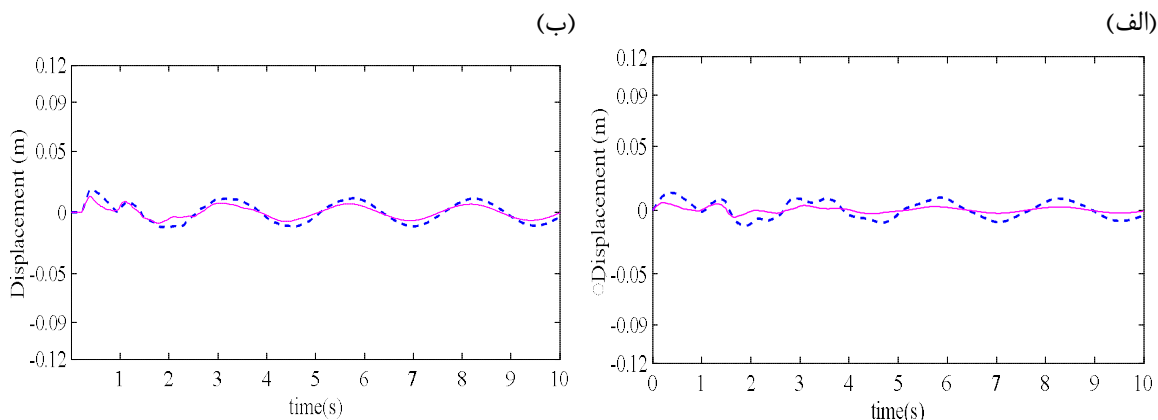
شکل ۵-۶، شکل ۵-۷ و شکل ۵-۸ به ترتیب تاریخچه نتایج هد فشار در گره شیر و گره میانی و جابه‌جایی لوله الاستیک با تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک برای حالتی که فرض شود نیروهای FSI باعث تغییر شکل برشی تکیه‌گاه می‌شوند (مکانیزم تغییر شکل برشی) (خط بنفش)، در مقایسه با نتایج تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی پر رنگ)، که در بخش‌های قبل نیز آورده شده است را نشان می‌دهد. در هر دو حالت کوپله پواسن و کوپله اتصال در نظر گرفته شده و با روش (full MOC) بر اساس شبکه مشبندی موج فشار حل شده است.



شکل ۵-۶ تاریخچه هد فشار در گره شیر در لوله الاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مشبندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش)

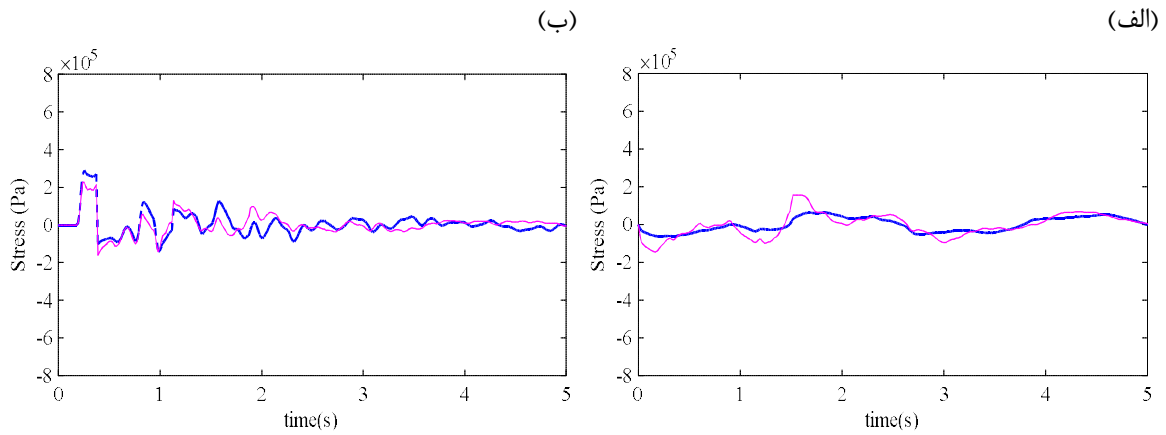


شکل ۵-۷ تاریخچه هد فشار در گره میانی در لوله الاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش)

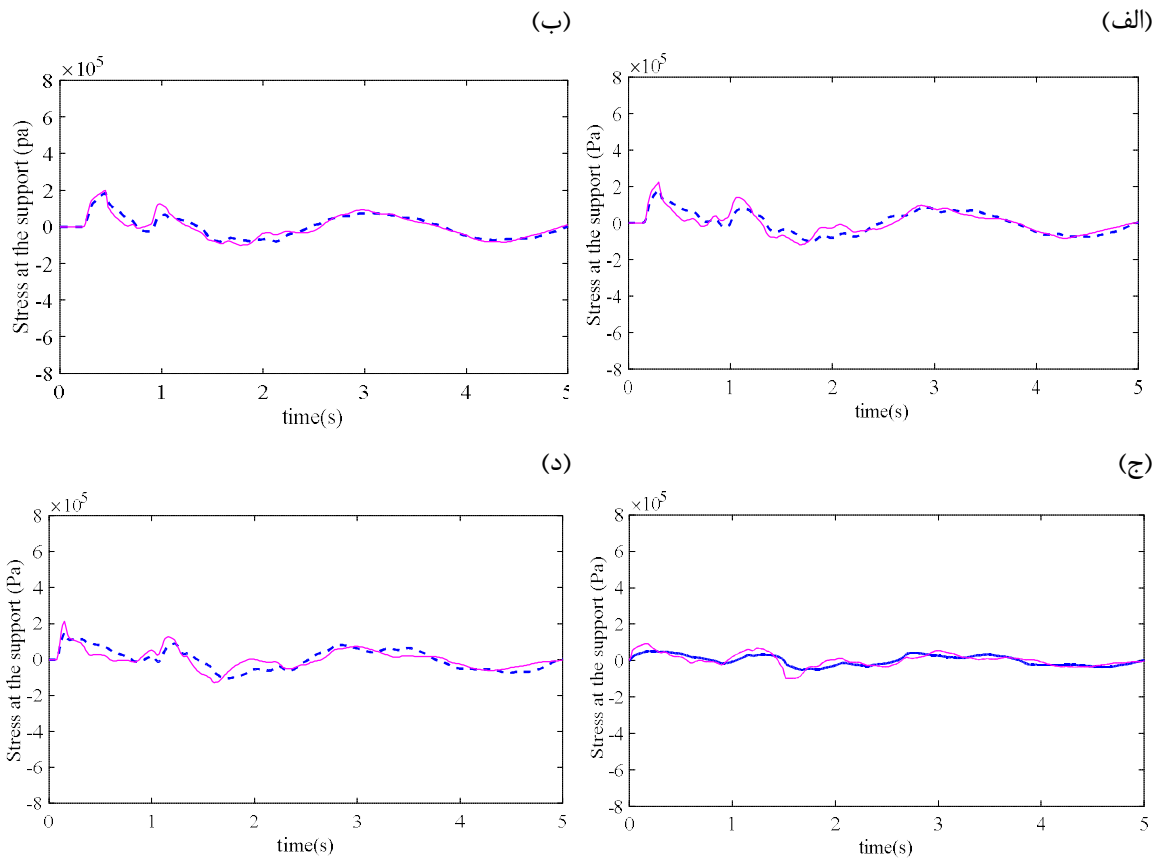


شکل ۵-۸ الف: تاریخچه جابه‌جایی دیواره لوله (الف) در گره شیر، (ب) در گره میانی در لوله الاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش)

شکل ۵-۹ و شکل ۵-۱۰ به ترتیب نتایج تاریخچه تنش در دیواره و در تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک مرزی و میانی لوله الاستیک برای حالتی که فرض شود نیروهای FSI باعث تغییر شکل برشی تکیه‌گاه می‌شوند (مکانیزم تغییر شکل برشی) (خط بنفش)، در مقایسه با حالتی که مکانیزم تغییر شکل محوری در نظر شود (خط چین آبی پر رنگ)، را نشان می‌دهد. در هر دو حالت کوپله پواسن و کوپله اتصال در نظر گرفته شده و با روش (full MOC) بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار حل شده است.



شکل ۵-۹ تاریخچه تنش در دیواره لوله (الف) در گره شیر، (ب) در گره میانی در لوله الاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش)



شکل ۵-۱۰ نتایج تاریخچه تنش در محل تکیه‌گاه‌ها، (الف) در محل شیر، (ب) $z_2 = 110.8$ (ج) $z_3 = 166.2$ (د) $z_4 = 221.6$ در لوله الاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش)

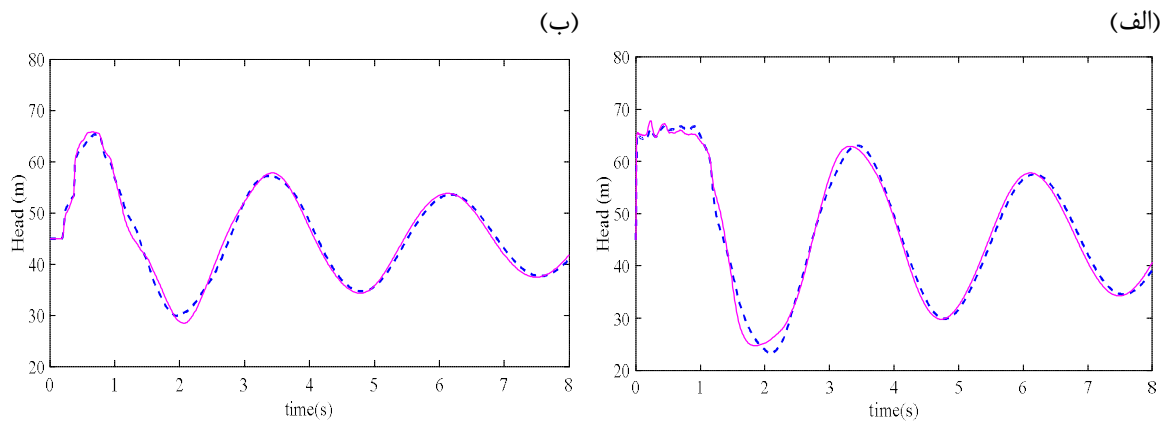
همانطور که از نتایج به دست آمده مشخص است، تبدیل مکانیزم تغییر شکل محوری تکیه‌گاه در بخش (۵-۲-۱-۱) به مکانیزم تغییر شکل برشی، تغییر محسوسی در نتایج ایجاد نمی‌کند که دلیل آن می‌تواند، استفاده از همان تعداد تکیه‌گاه در همان محل و با همان مصالح ویسکوالاستیک باشد که با توجه به ثابت فرض کردن نسبت پواسن تنها تفاوت آن، در سطح مقطع، کرنش برشی و ضرایب به کار رفته می‌باشد $\left(\frac{1}{L_s} * dG^s(t)\right) \times A_s \neq \left(\frac{1}{h_s} * dG^s(t)\right) \times A_{sv}$ ، که باعث تغییر در سختی تکیه‌گاه‌ها، تنش‌ها ایجاد شده در تکیه‌گاه (شکل ۵-۱۰) و در نتیجه تغییر در روند تنش در دیواره لوله (شکل ۵-۹) می‌شود. در اینجا به دلیل افزایش سختی در حالتی که رفتار تکیه‌گاه به صورت مکانیزم تغییر شکل برشی در نظر گرفته شود، جابه‌جایی به میزان کمی کاهش می‌یابد (شکل ۵-۸)، در نتیجه هد فشاری (شکل ۵-۷) و (شکل ۵-۶) به مقدار کمی افزایش یافته و روند نمودار کمی به تاخیر می‌افتد (دیرتر میرا می‌شود).

دلیل در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی تکیه‌گاه، نزدیک شدن به رفتار واقعی آن و همچنین بررسی تاثیر حالت لغزشی (اصطکاکی) آن که در بخش‌های بعدی بحث خواهد شد.

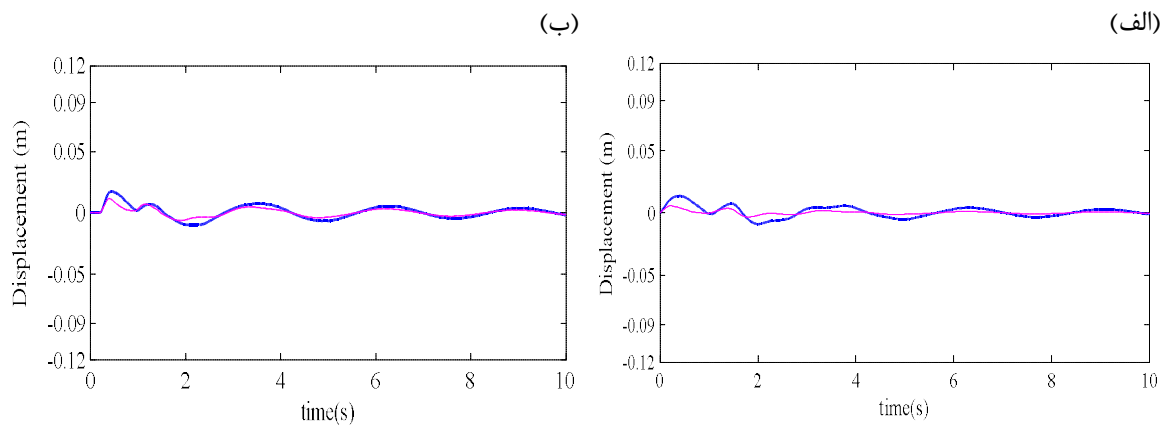
۵-۲-۲-۲- لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه مرزی و میان‌ی ویسکوالاستیک با در

نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی

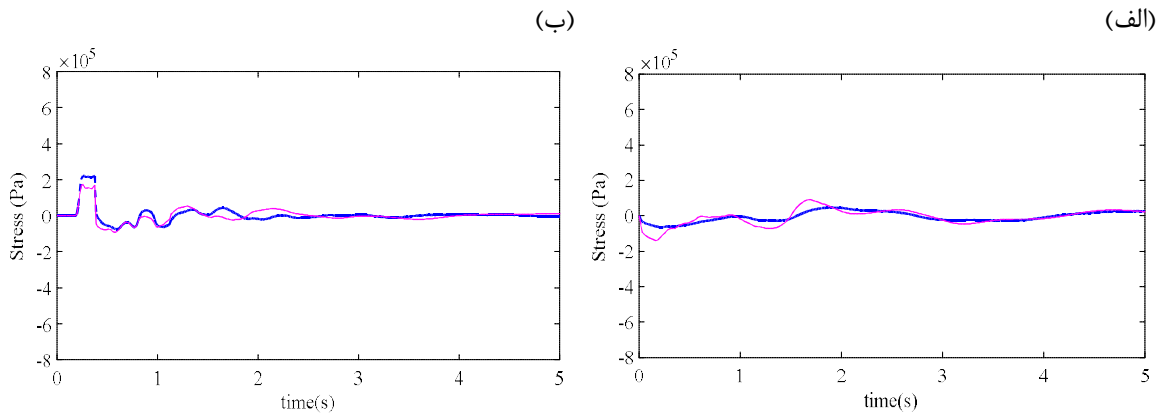
اگر به جای به کارگیری دیواره لوله از مصالح الاستیک، از مصالح ویسکوالاستیک با مشخصات جدول ۵-۲ استفاده شود، نتایج تاریخچه هد فشاری، نتایج تاریخچه جابه‌جایی دیواره لوله و نتایج تاریخچه تنش در دیواره لوله و نتایج تاریخچه تنش در محل تکیه‌گاه‌ها به ترتیب در (شکل ۵-۱۱)، (شکل ۵-۱۲)، (شکل ۵-۱۳) و (شکل ۵-۱۴) برای دو حالت مذکور بخش (۵-۲-۲-۱) نشان داده شده است.



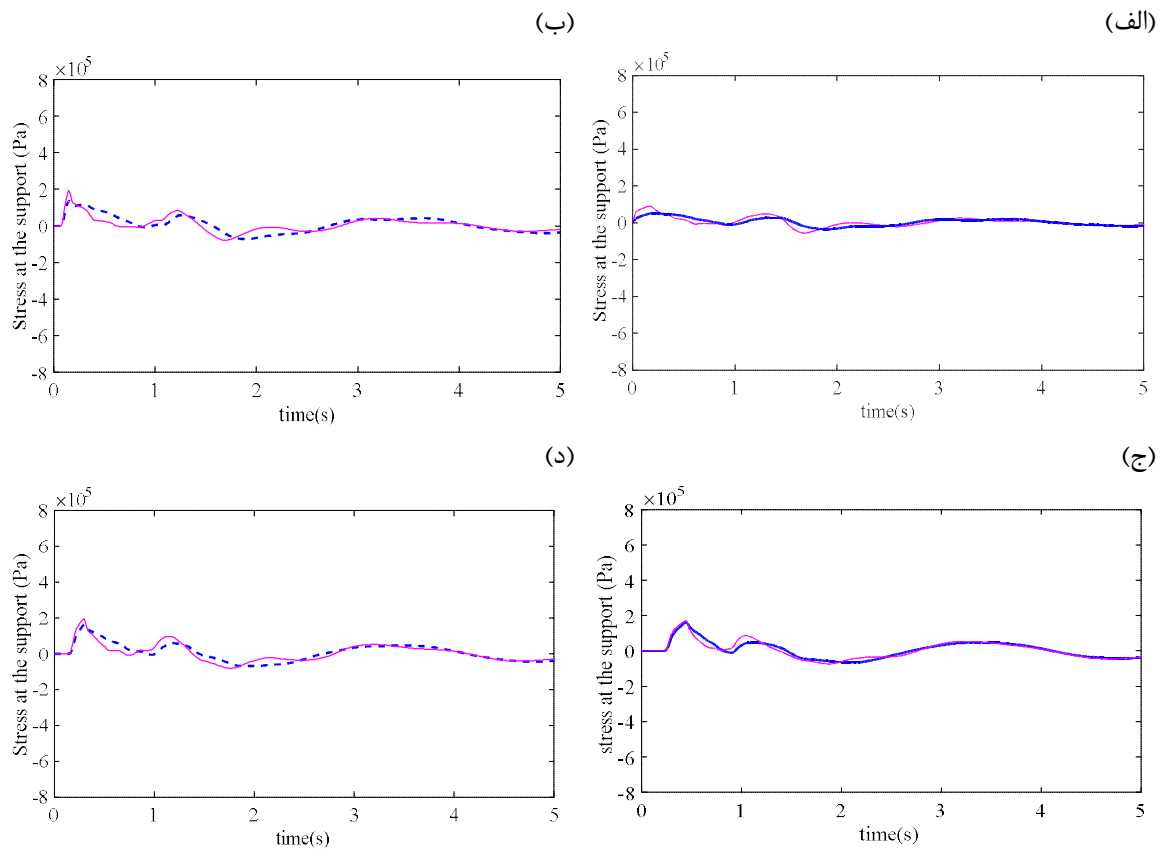
شکل ۵-۱۱ تاریخچه هد فشار الف: در گره شیر و ب: در گره میانی در لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش)



شکل ۵-۱۲ تاریخچه جابه‌جایی دیواره لوله الف: در گره شیر و ب: در گره میانی در لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش)



شکل ۵-۱۳ تاریخچه تنش (الف) در دیواره لوله در گره شیر، (ب) در گره میانی در لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش)



شکل ۵-۱۴ نتایج تاریخچه تنش در محل تکیه‌گاه‌ها، (الف) در محل شیر، (ب) $z_2 = 110.8$ (ج) $z_3 = 166.2$ (د) $z_4 = 221.6$ در لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن و روش full MOC بر اساس شبکه مش‌بندی موج فشار: با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل محوری (خط چین آبی تیره)، با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (خط بنفش)

همانطور که در بخش قبل مربوط به لوله‌های الاستیک نیز بحث شد، تبدیل مکانیزم تغییر شکل محوری تکیه‌گاه به مکانیزم تغییر شکل برشی در لوله‌های ویسکوالاستیک نیز تغییر محسوسی در نتایج ایجاد نمی‌کند که دلیل آن نیز استفاده از همان تعداد تکیه‌گاه در همان محل و با همان مصالح ویسکوالاستیک می‌باشد و با توجه به فرض ثابت بودن نسبت پواسن مصالح تکیه‌گاه، تنها تفاوت آن، در سطح مقطع، کرنش برشی و ضرایب به کار رفته می‌باشد

$$\left(\frac{1}{L_s} * dG^s(t)\right) \times A_s \neq \left(\frac{1}{h_s} * dG^s(t)\right) \times A_{sv}$$

که باعث تغییر در سختی و تنش‌ها ایجاد شده در تکیه‌گاه (شکل ۵-۱۴) و در نتیجه تغییر در روند تنش در دیواره لوله (شکل ۵-۱۳) می‌شود. در اینجا به دلیل افزایش سختی، جابه‌جایی به میزان کمی کاهش می‌یابد (شکل ۵-۱۲)، در نتیجه هد فشاری (شکل ۵-۱۱) به مقدار کمی افزایش می‌یابد.

۵-۲-۳- نتایج تاثیر تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک اصطکاکی (لغزشی) با به

کارگیری روش (full MOC)

این مرحله قسمت اصلی تحقیق حاضر را در برمی‌گیرد، همانطور که در بخش (۳-۶-۳-۲-۳-۳) -۳-۶-۲-۳-۶- به صورت کامل توضیح داده شده است، عملکرد این تکیه‌گاه در دو فاز انجام می‌شود، فاز چسبندگی و فاز لغزش، در نتیجه در هر گام زمانی عکس‌العمل تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (عکس‌العمل افقی) به صورت ساده (با مکانیزم تغییر شکل برشی) با توجه به شرایط مرزی بخش ۳-۶-۳-۲-۳- محاسبه می‌شود، اگر عکس‌العمل به دست آمده از نیروی اصطکاکی بین دو سطح زیرین تکیه‌گاه کمتر باشد، تکیه‌گاه در فاز چسبندگی می‌باشد و مانند یک تکیه‌گاه ساده ویسکوالاستیک با مکانیزم تغییر شکل برشی عمل می‌کند در غیر این صورت وارد فاز لغزش شده و شرایط مرزی مربوط به بخش ۳-۶-۳-۲- اعمال می‌شود. بنابراین ابتدا باید نیروی اصطکاکی بین دو سطح زیرین تکیه‌گاه محاسبه شود، که با توجه به معادله (۳-۴۴) و (۳-۴۵)، برای محاسبه آن باید ضریب اصطکاکی بین دو سطح

لغزش و نیروی عمود بر سطح مشخص باشد. در این تحقیق ضریب اصطکاک از مقاله [Bakre et.al,2007] ، 0.15 در نظر گرفته شده است (همچنین فرض شده است که ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی باهم برابر باشد).

نیروی عمود بر سطح تکیه‌گاه که همان عکس‌العمل قائم تکیه‌گاه می‌باشد ناشی از وزن لوله در نظر گرفته می‌شود که با توجه به محل تکیه‌گاه‌ها و نسبت فواصل آن‌ها به دست می‌آید. وزن کل سیستم (شامل وزن خود سازه لوله و آب داخل آن) با توجه به مشخصات جدول ۵-۱ برابر با 20765.4N می‌باشد، که به نسبت محل تکیه‌گاه‌ها، عکس‌العمل قائم تکیه‌گاه‌های میانی 4153.1N و تکیه‌گاه مرزی 2076.5N به دست می‌آید، در نتیجه نیروی اصطکاک با توجه به ضریب اصطکاک 0.15، در تکیه‌گاه‌های میانی 622.9N و در تکیه‌گاه مرزی 311.4N می‌باشد مقدار بدست آمده نیروی اصطکاک در تکیه‌گاه‌ها از مقادیر عکس‌العمل تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک ساده با در نظر گرفتن مکانیزم تغییر شکل برشی (عکس‌العمل افقی (Rx)) خیلی بیشتر می‌باشد $((F_{sv} \gg Rx_{sv})$ و $((F_{sm} \gg Rx_{sm})$). بنابراین بعد از بسته شدن شیر و به وجود آمدن ضربه‌قوچ، هیچ کدام از تکیه‌گاه‌ها عملکرد لغزشی نخواهند داشت و وارد فاز لغزش نخواهند شد، بنابراین برای رفع این مشکل باید نیروی اصطکاک کاهش پیدا کند، برای اینکار می‌توان مانند مرجع [Tijsseling and Vardy, 1996] و [Ferras et.al,2017] ضرایب اصطکاک مختلفی و یا وزن‌های مختلف را امتحان کرد.

جدول ۵-۵ محاسبه نیروی اصطکاک ناشی از وزن لوله با درصدهای مختلف (مقادیر مختلف نیروی اصطکاک)

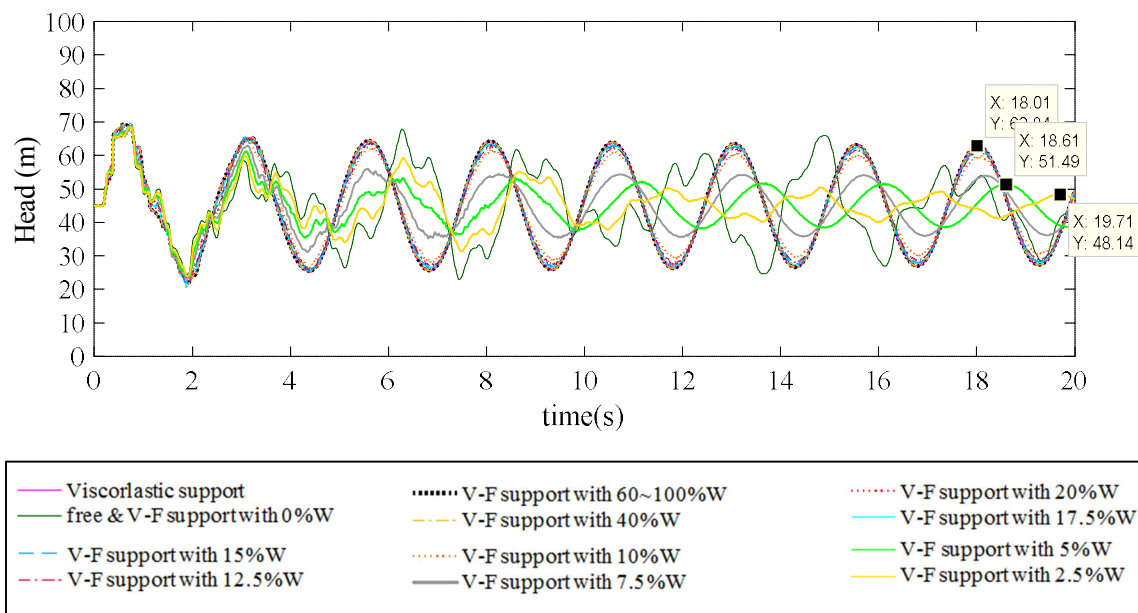
۱	$W_{total}(N)$	$\mu_s = \mu_k$	$Ry_{sm}(N)$	$Ry_{sv}(N)$	$F_{sm}(N)$	$F_{sv}(N)$
	20765.4	0.15	4153.1	2076.5	622.9	311.4
۲	60% of $W_{total}(N)$	$\mu_s = \mu_k$	$Ry_{sm}(N)$	$Ry_{sv}(N)$	$F_{sm}(N)$	$F_{sv}(N)$
	12459.24	0.15	2491.8	1245.9	373.74	186.84
۳	40% of $W_{total}(N)$	$\mu_s = \mu_k$	$Ry_{sm}(N)$	$Ry_{sv}(N)$	$F_{sm}(N)$	$F_{sv}(N)$
	8306.16	0.15	1661.24	830.6	249.16	124.56
۴	20% of $W_{total}(N)$	$\mu_s = \mu_k$	$Ry_{sm}(N)$	$Ry_{sv}(N)$	$F_{sm}(N)$	$F_{sv}(N)$
	4153.08	0.15	830.62	415.3	124.58	62.28
۵	17.5% of $W_{total}(N)$	$\mu_s = \mu_k$	$Ry_{sm}(N)$	$Ry_{sv}(N)$	$F_{sm}(N)$	$F_{sv}(N)$
	3633.9	0.15	726.8	363.4	109	54.5
۶	15% of $W_{total}(N)$	$\mu_s = \mu_k$	$Ry_{sm}(N)$	$Ry_{sv}(N)$	$F_{sm}(N)$	$F_{sv}(N)$
	3114.8	0.15	622.9	311.4	93.4	46.7
۷	12.5% of $W_{total}(N)$	$\mu_s = \mu_k$	$Ry_{sm}(N)$	$Ry_{sv}(N)$	$F_{sm}(N)$	$F_{sv}(N)$
	2595.6	0.15	519.1	259.5	77.8	38.9
۸	10% of $W_{total}(N)$	$\mu_s = \mu_k$	$Ry_{sm}(N)$	$Ry_{sv}(N)$	$F_{sm}(N)$	$F_{sv}(N)$
	2076.54	0.15	415.31	207.65	62.29	31.14
۹	7.5% of $W_{total}(N)$	$\mu_s = \mu_k$	$Ry_{sm}(N)$	$Ry_{sv}(N)$	$F_{sm}(N)$	$F_{sv}(N)$
	1557.4	0.15	311.4	155.7	46.7	23.3
۱۰	5% of $W_{total}(N)$	$\mu_s = \mu_k$	$Ry_{sm}(N)$	$Ry_{sv}(N)$	$F_{sm}(N)$	$F_{sv}(N)$
	1038.2	0.15	207.6	103.83	31.1	15.5
۱۱	2.5% of $W_{total}(N)$	$\mu_s = \mu_k$	$Ry_{sm}(N)$	$Ry_{sv}(N)$	$F_{sm}(N)$	$F_{sv}(N)$
	519.135	0.15	103.8275	51.9125	15.5725	7.785

با توجه به جدول ۵-۵، برای نشان دادن مقادیر مختلف نیرو اصطکاک، درصدهایی مختلفی از وزن لوله در نظر گرفته شده است تا با در نظر گرفتن مقادیر مختلف نیروی اصطکاک رفتار و تاثیر این نوع تکیه‌گاه‌ها در پدیده ضربه‌قوچ به صورت کامل‌تری مورد بحث و مطالعه قرار گیرد. در ادامه به نتایج مربوط به هریک از مقادیر نیروی اصطکاک در نظر گرفته شده در جدول ۵-۵، و همچنین مقایسه آن با حالت ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (با مکانیزم تغییر شکل برشی) و حالت آزاد که به روش (full MOC) حل شده است، پرداخته می‌شود.

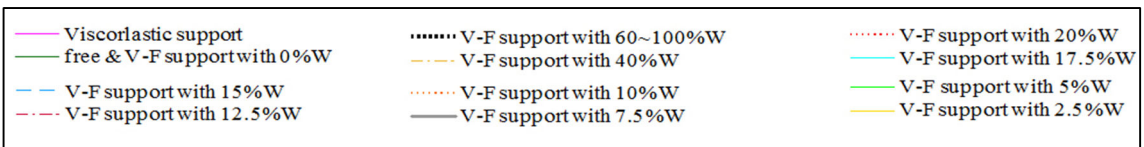
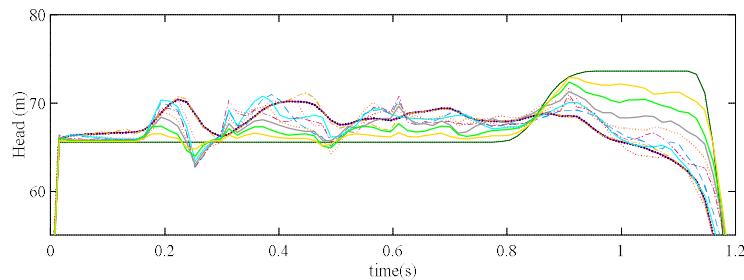
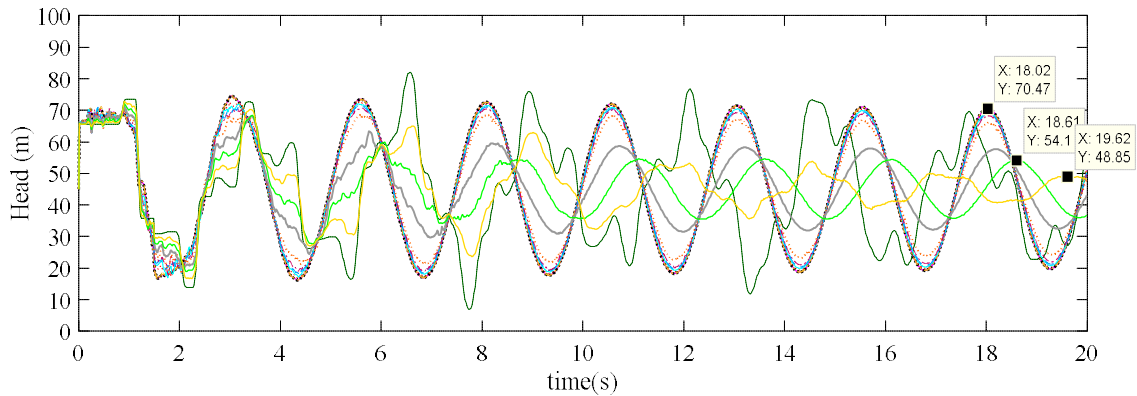
۵-۲-۳-۱- لوله الاستیک با تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی

شکل ۵-۱۵، شکل ۵-۱۶ و شکل ۵-۱۷ به ترتیب نتایج هد فشار در گره شیر، گره میانی و نتایج جابجایی لوله الاستیک با در نظر گرفتن هر دو کوپله اتصال و پواسن با در نظر گرفتن هر دو کوپله

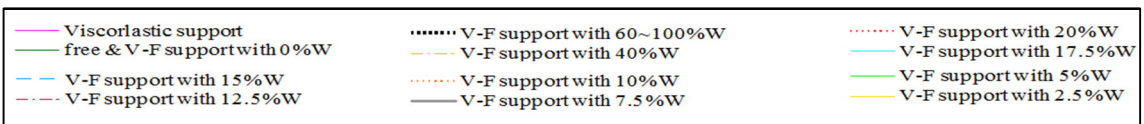
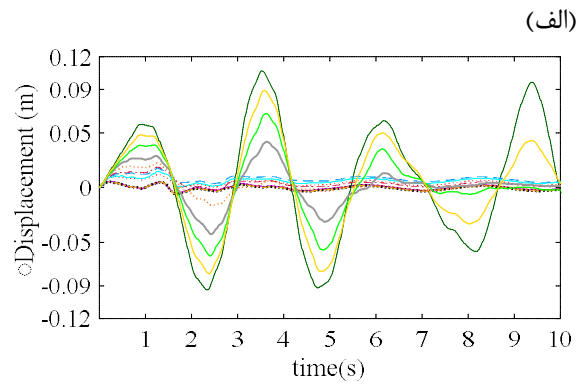
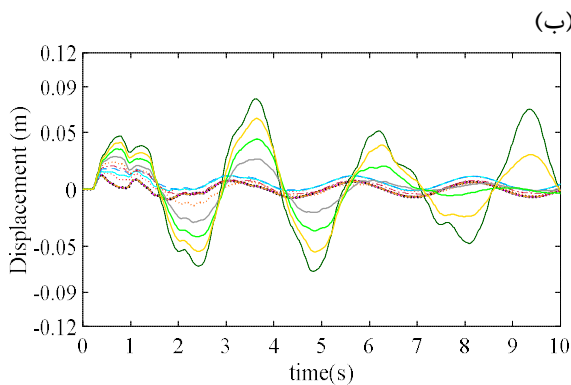
اتصال و پواسن و بکارگیری روش حل (full MOC)، در حالتی که از تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی (V-F) استفاده شود برای دوازده مقادیر مختلف نیروی اصطکاک جدول ۵-۵، حالت ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل برشی) و حالت آزاد نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۵: تاریخچه هد فشار در گره میانی لوله الاستیک با دو کوپله اتصال و پواسن و با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشاری: برای حالت تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی (V-F) با مقادیر مختلف نیروی اصطکاک، حالت ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل برشی)، حالت آزاد



شکل ۵-۱۶: تاریخچه هد فشار در گره شیر در لوله الاستیک با دو کوپله اتصال و پواسن و با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشاری: برای حالت تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی (V-F) با مقادیر مختلف نیروی اصطکاک، حالت ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل برشی)، حالت آزاد



شکل ۵-۱۷: تاریخچه جابه‌جایی دیواره لوله الاستیک (الف) در گره شیر و (ب) در گره میانی با دو کوپله اتصال و پواسن و با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشاری: برای حالت تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی (V-F) با مقادیر مختلف نیروی اصطکاک، حالت ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل برشی)، حالت آزاد

به طور کلی همانطور که نتایج هد فشاری به دست آمده در شکل ۵-۱۵ و شکل ۵-۱۶ نشان می‌دهد، نیروی اصطکاک با وزن در نظر گرفته شده ($60\% \sim 100\% W_{total}$) کاملاً به نتایج مربوط به حالت تکیه‌گاه ساده ویسکوالاستیک با مکانیزم تغییر شکل برشی منطبق می‌باشد و دلیل این امر زیاد بودن نیروی اصطکاک ناشی از وزن لوله است، که عکس العمل (افقی) به وجود آمده در تکیه‌گاه ویسکوالاستیک ناشی از نیروهای FSI نمی‌تواند بر نیروی اصطکاک ایجاد شده غلبه کند و وارد فاز لغزش شود، که همان عملکرد ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک با مکانیزم تغییر برشی می‌باشد، در نتیجه نتایج کاملاً یکسان است.

با کم‌تر شدن نیروی اصطکاک، ($0\% \sim 40\% W_{total}$) همانطور که نتایج نشان می‌دهد به دلیل غلبه عکس‌العمل (افقی) تکیه‌گاه ویسکوالاستیک ناشی از نیروهای FSI به نیروی اصطکاک، تکیه‌گاه وارد فاز لغزش می‌شود، و عملکرد تکیه‌گاه دارای دو فاز می‌باشد، فاز لغزش که نیروی اصطکاک (جنبشی) بین تکیه‌گاه و سطح زیرین آن جاری می‌شود و فاز چسبندگی که مانند تکیه‌گاه ساده ویسکوالاستیک با مکانیزم تغییر شکل برشی عمل می‌کند، در نتیجه در این حالات نتایج نسبت به حالت تکیه‌گاه ساده ویسکوالاستیک با مکانیزم تغییر شکل برشی تغییر می‌کند.

همچنین نتایج مربوط به تاریخچه هد فشاری نشان می‌دهد، هرچه نیروی اصطکاک ناشی از وزن لوله بیشتر شود، کمتر وارد فاز لغزش شده و بیشتر در فاز چسبندگی می‌ماند در نتیجه نتایج آن نزدیک به حالت

تکیه‌گاه ویسکوالاستیک ساده (با مکانیزم تغییر شکل برشی) می‌باشد، همانطور که در نمودارهای موبوط به هد فشار (شکل ۵-۱۵، شکل ۵-۱۶) نیز مشاهده می‌شود، در نتایج نیروی اصطکاک با درصد وزن ($10 \sim 100$) تغییر محسوسی ایجاد نمی‌شود، و با توجه به نتایج تاریخچه جابه‌جایی آن (شکل ۵-۱۷) و نیروی اصطکاک با درصد وزن ($10 \sim 100$)، جابه‌جایی دیواره لوله به دلیل غلبه بر نیروی اصطکاک و حرکت تکیه‌گاه زمانیکه وارد فاز لغزش می‌شود کمی افزایش پیدا می‌کند که هر چه مقدار نیروی اصطکاک کمتر باشد جابه‌جایی افزایش می‌یابد (به دلیل لغزش و حرکت تکیه‌گاه). بنابراین با

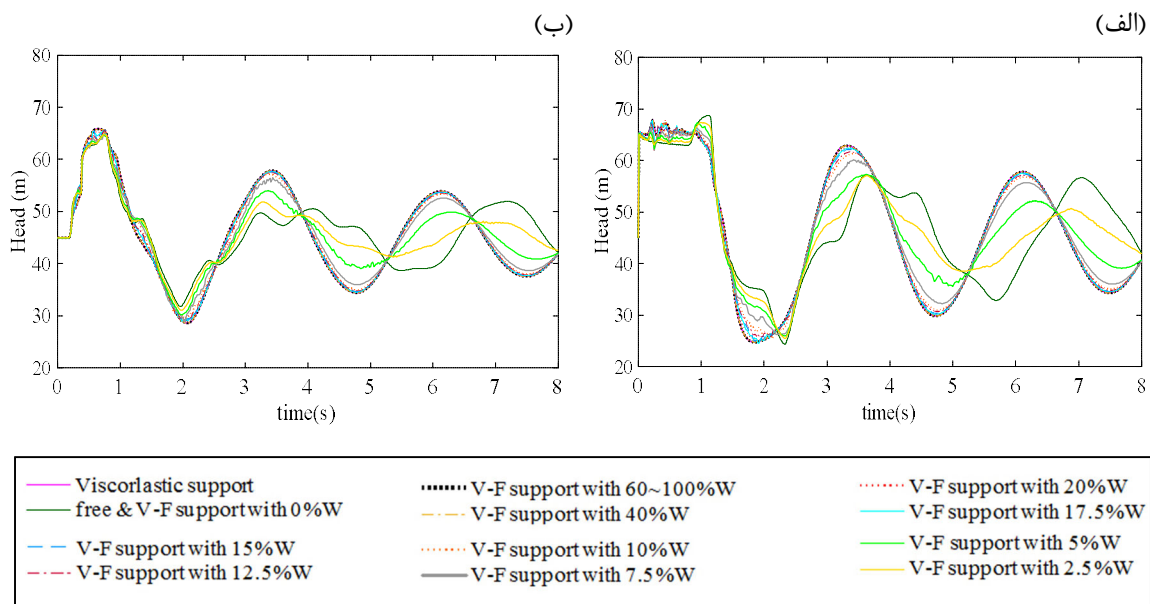
کاهش نیروی اصطکاک ($0\% \sim 10\% W_{total}$) سختی سیستم کاهش پیدا می‌کند، به خصوص در درصد وزن‌های (2.5، 5 و 7.5)، جابه‌جایی در سیکل‌های ابتدایی به شدت افزایش می‌یابد، اما به دلیل اتلاف انرژی سیستم ناشی از بسیج شدن اصطکاک بین تکیه‌گاه و سطح زیرین آن، بعد از گذشت ۷ ثانیه، دیگر نیروی‌های ناشی از FSI نمی‌تواند به نیروی اصطکاک غلبه کند و تکیه‌گاه وارد فاز چسبندگی (حالت ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک با مکانیزم تغییر شکل برشی) می‌شود و جابه‌جایی کاهش پیدا می‌کند

نتایج هد فشار (شکل ۵-۱۵ و شکل ۵-۱۶) در تقابل با نتایج جابه‌جایی (شکل ۵-۱۷)، عملکرد همزمان ویسکوالاستیسته تکیه‌گاه به همراه نیروی اصطکاک را نشان می‌دهد، که هر چه مقدار نیروی اصطکاک با توجه به وزن لوله بیشتر شود، جابه‌جایی کاهش یافته و هد فشاری نیز به دلیل افزایش سختی سیستم افزایش می‌یابد، اما با کاهش نیروی اصطکاک و ایجاد لغزش، سبب می‌شود درحالی‌که جابه‌جایی افزایش و سختی سیستم کاهش می‌یابد، بدلیل جاری شدن نیروی اصطکاک در تکیه‌گاه‌ها، انرژی سیستم تلف شود و بعد زمان کوتاهی نیروهای FSI نتواند به نیروی اصطکاک غلبه کند، در نتیجه وارد فاز چسبندگی شده و عملکرد تکیه‌گاه‌های ساده ویسکوالاستیک با مکانیزم تغییر شکل برشی را دارد، بنابراین تاثیر ویسکوالاستیسته تکیه‌گاه باعث کاهش جابه‌جایی به دلیل افزایش سختی سیستم و تاثیر همزمان ویسکوالاستیسته و اصطکاک (لغزش) در تکیه‌گاه بدلیل کاهش سختی سیستم باعث کاهش هد فشاری می‌شود. همانطور که در نتایج مربوط به هد فشار مشخص است با کاهش نیروی اصطکاک (2.5%، 5% و 7.5%) هد فشاری کاهش می‌یابد، البته در ابتدا به دلیل کاهش اثر ویسکوالاستیسته و افزایش اثر اصطکاک در فاز لغزش، ارتعاشات هد فشاری نسبت به حالت ساده تکیه‌گاه بیشتر می‌باشد، بعنوان مثال در $5\% W_{total}$ بعد از گذشت ۱۰ ثانیه نوسانات هد فشاری میرا می‌شود، بعلاوه مقادیر آن بعد از گذشت ۲۰ ثانیه حدود ۳۰٪ نسبت به حالت تکیه‌گاه ساده، کاهش می‌یابد، با کاهش بیشتر اصطکاک (درصد وزن 2.5) ممکن است به دلیل کاهش شدید سختی و اتلاف انرژی در سیستم هد فشاری کاهش بیشتری پیدا کند، اما با کم شدن اثر ویسکوالاستیسته

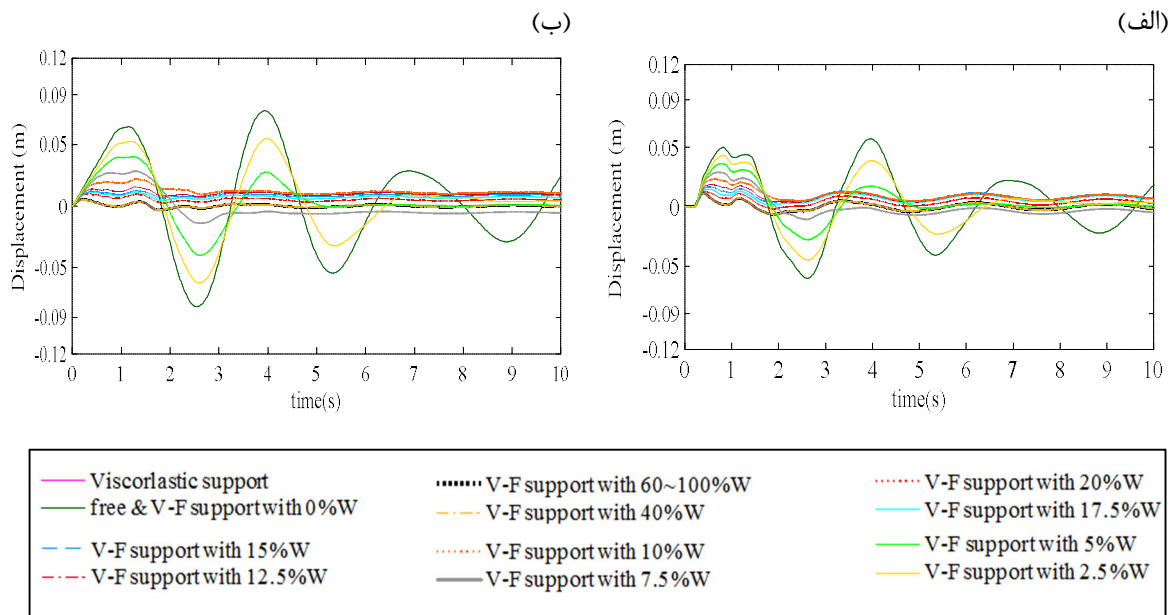
تکیه‌گاه، ارتعاشات هد فشار و جابه‌جایی لوله افزایش پیدا می‌کند که ممکن است باعث پارگی خط لوله گردد. با کاهش بیشتر نیروی اصطکاک ($0\% \sim 2.5\% W_{total}$) نتایج به حالت آزاد (بدون تکیه‌گاه) نزدیک می‌شود، و اگر نیروی اصطکاک صفر در نظر گرفته شود نتایج کاملاً به حالت بدون تکیه‌گاه‌ها (آزاد) منطبق می‌باشد.

۵-۲-۳-۲- لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی

اگر از مصالح ویسکوالاستیک در دیواره لوله استفاده شود، نتایج بخش (۵-۳-۱-) مربوط به هد فشار و جابه‌جایی لوله ویسکوالاستیک به ترتیب در (شکل ۵-۱۸) و (شکل ۵-۱۹) با در نظر گرفتن هر دو کوپله اتصال و پواسن و بکارگیری روش حل (full MOC)، در حالتی که از تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی (V-F) استفاده شود برای دوازده مقادیر مختلف نیروی اصطکاک جدول ۵-۵، حالت ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل برشی) و حالت آزاد نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۸ تاریخچه هد فشار (الف) در گره شیر و (ب) در گره میانی لوله الاستیک با دو کوپله اتصال و پواسن و با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشاری: برای حالت تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی (V-F) با مقادیر مختلف نیروی اصطکاک، حالت ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل برشی)، حالت آزاد



شکل ۵-۱۹ تاریخچه جابه‌جایی دیواره لوله ویسکوالاستیک (الف) در گره شیر و (ب) در گره میانی با دو کوپله اتصال و پواسن و با روش full MOC و شبکه مش بر اساس موج فشاری: برای حالت تکیه‌گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک لغزشی (V-F) با مقادیر مختلف نیروی اصطکاک، حالت ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک (مکانیزم تغییر شکل برشی)، حالت آزاد

همانطور که در بخش (۵-۲-۳-۱-) مربوط به لوله الاستیک نیز شرح داده شده است، نتایج به دست آمده هد فشار و جابجایی برای لوله ویسکوالاستیک، (شکل ۵-۱۸ و شکل ۵-۱۹) نشان می‌دهد، نیروی اصطکاک با وزن در نظر گرفته شده ($60\% \sim 100\% W_{total}$) کاملاً به نتایج مربوط به حالت تکیه‌گاه‌های ساده ویسکوالاستیک با مکانیزم تغییر شکل برشی منطبق می‌باشد. با کم شدن نیروی اصطکاک ($0\% \sim 40\% W_{total}$)، نتایج نسبت به حالت تکیه‌گاه ساده ویسکوالاستیک (با مکانیزم تغییر شکل برشی) تغییر می‌کند، و با توجه به نتایج تاریخچه هد فشاری در لوله ویسکوالاستیک (شکل ۵-۱۸)، هرچه نیروی اصطکاک ناشی از وزن لوله بیشتر شود، کمتر وارد فاز لغزش شده و نتایج به حالت تکیه‌گاه ویسکوالاستیک ساده با مکانیزم تغییر شکل برشی نزدیک می‌شود.

با توجه به تاریخچه جابه‌جایی لوله ویسکوالاستیک (شکل ۵-۱۹) در نتایج نیروی اصطکاک با درصد وزن (10~100)، به دلیل غلبه بر نیروی اصطکاک و وارد شدن به فاز لغزش، جابه‌جایی افزایش پیدا می‌کند، که هر چه مقدار نیروی اصطکاک کمتر شود جابه‌جایی افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش

بیشتر نیروی اصطکاک ($0\% \sim 10\% W_{total}$)، سختی سیستم کاهش زیادی پیدا کرده و جابجایی در زمان‌های ابتدایی به شدت افزایش می‌یابد (شکل ۵-۱۹)، اما به دلیل بسیج شدن اصطکاک در تکیه‌گاه و اتلاف انرژی سیستم که در بخش قبل نیز توضیح داده شده است، جابه‌جایی بعد از گذشت زمان کاهش می‌یابد.

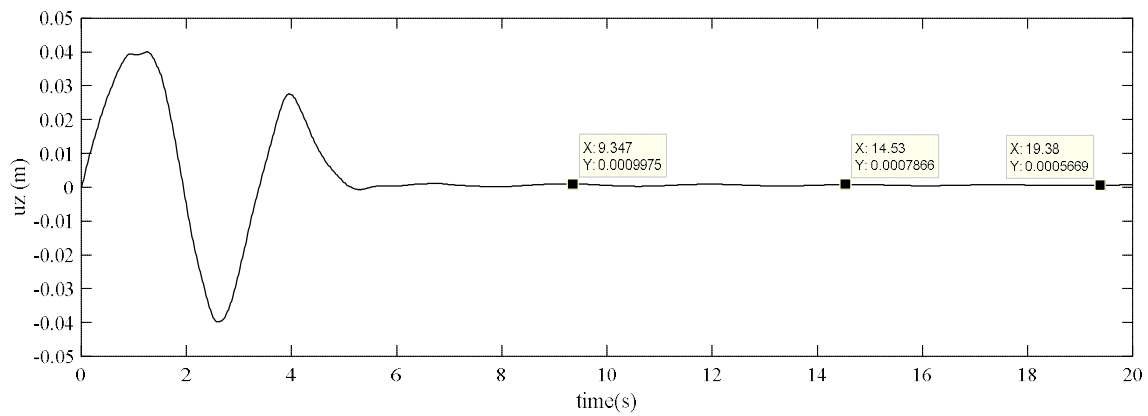
نتایج هد فشاری (شکل ۵-۱۸) و جابه‌جایی (شکل ۵-۱۹) در لوله ویسکوالاستیک در تقابل با یکدیگر که در بخش (۵-۲-۳-۱-) نیز به طور کامل توضیح داده شده است نشان می‌دهد، بسیج شدن اصطکاک در تکیه‌گاه به دلیل غلبه نیروی اندرکنش به نیروی اصطکاک، سبب می‌شود درحالی‌که سختی سیستم کاهش می‌یابد، انرژی سیستم تلف شود و بعد مدت زمان کوتاهی نیروهای FSI دیگر نمی‌تواند به اصطکاک غلبه کند، در نتیجه افزایش تاثیر ویسکوالاستیسته (افزایش سختی) بدلیل ورود به فاز چسبندگی باعث کاهش جابه‌جایی می‌شود. همانطور که در شکل مربوط به نتایج هد فشار مشخص است با کاهش نیروی اصطکاک (2.5% ، 5% و 7.5%) هد فشاری کاهش می‌یابد، البته در ابتدا به دلیل کاهش اثر ویسکوالاستیسته تکیه‌گاه و افزایش اثر اصطکاک (لغزش)، ارتعاشات هد فشاری نسبت به حالت ساده تکیه‌گاه بیشتر می‌شود، بعنوان مثال در وزن $5\% W_{total}$ بعد از گذشت ۶ ثانیه نوسانات هد فشاری میرا می‌شود.

با کاهش بیشتر نیروی اصطکاک ($0\% \sim 2.5\% W_{total}$) نتایج به حالت آزاد (بدون تکیه‌گاه) نزدیک می‌شود، بطوریکه اگر نیروی اصطکاک صفر در نظر گرفته شود نتایج کاملاً به حالت آزاد منطبق می‌باشد.

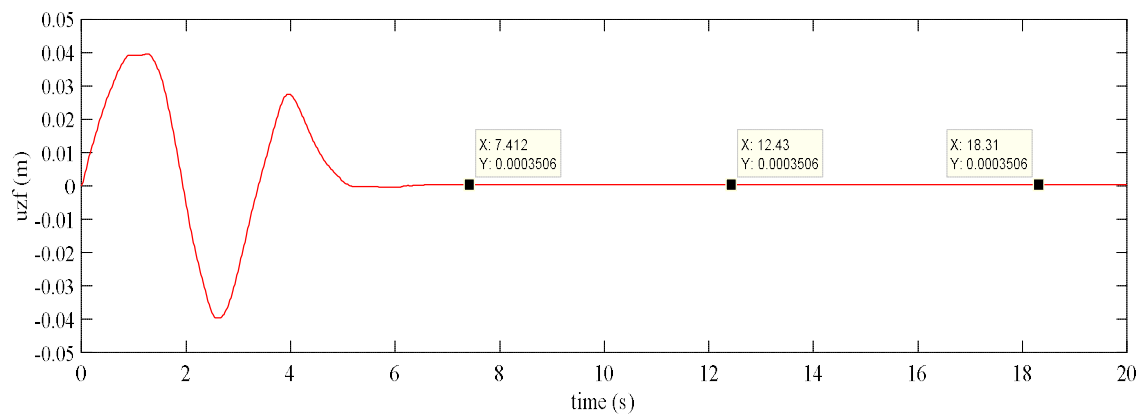
به طور کلی از آنجایی که از خود مصالح ویسکوالاستیک در سازه اصلی (لوله) استفاده شده است کاهش هد فشار و ارتعاشات با گذشت زمان نسبت به لوله با مصالح الاستیک کمتر بوده و چشمگیر نمی‌باشد، زیرا مواد ویسکوالاستیک که بعنوان یک میراگر عمل می‌کنند، در کل سازه لوله به کار گرفته شده است و تاثیر بیشتری نسبت به تکیه‌گاه‌ها دارد، با این حال وجود اصطکاک باعث کاهش هد فشاری با گذشت می‌شود.

برای درک بهتر عملکرد تکیه‌گاه‌های لغزشی ویسکوالاستیک، اینکه چه زمانی وارد فاز لغزش و چه زمانی وارد فاز چسبندگی می‌شود با توجه به آنچه که در بخش (۳-۶-۳-۲-) بیان شده است، اگر در هر گام زمانی عکس‌العمل (افقی) تکیه‌گاه کمتر از نیروی اصطکاک (ایستایی) باشد، نیروی اصطکاکی بسیج نشده (حالت اصطکاک ایستایی) و تکیه‌گاه در حالت چسبندگی می‌باشد یا به معنایی دیگر حرکتی نخواهد داشت و شرط مرزی جابه‌جایی آن، $u_z(t) = u_{z_s}(t) + u_{z_f}(t) = u_{z_f}(t - \Delta t)$ و $u_z(t) = u_{z_s}(t) + u_{z_f}(t)$ می‌باشد، اما اگر در هر گام زمانی عکس‌العمل (افقی) تکیه‌گاه بیشتر از نیروی اصطکاک (ایستایی) باشد، نیروی اصطکاکی جنبشی در تکیه‌گاه بسیج شده (حالت اصطکاک جنبشی) و تکیه‌گاه در حالت لغزش می‌باشد یا به معنای دیگر حرکت می‌کند و طبق معادله شرط مرزی $u_z(t) = u_{z_s}(t) + u_{z_f}(t)$ ، می‌توان جابه‌جایی کل را به جابه‌جایی ناشی از لغزش (u_{z_f}) و تغییر شکل برشی تکیه‌گاه (u_{z_s}) تفکیک کرد و زمانیکه تکیه‌گاه وارد فاز لغزش و چسبندگی می‌شود را مشخص کرد. برای اینکار نتایج جابه‌جایی لوله ویسکوالاستیک در گره شیر (گره تکیه‌گاه مرزی) با تکیه‌گاه لغزشی ویسکوالاستیک و نیروی اصطکاک ($5\%W_{total}$)، در شکل ۵-۲۰ نشان داده شده است. با توجه اینکه جابه‌جایی کل (u_z) از جمع جابه‌جایی ناشی از لغزش (u_{z_f}) و تغییر شکل برشی تکیه‌گاه (u_{z_s}) به دست می‌آید ($u_z(t) = u_{z_s}(t) + u_{z_f}(t)$)، (شکل ۵-۲۰-الف) از جمع دو نمودار (شکل ۵-۲۰-ب) و (شکل ۵-۲۰-ج) به دست آمده است. در شکل (شکل ۵-۲۰-ب) مربوط به نتایج جابه‌جایی ناشی از لغزش، همانطور که مشخص است از ثانیه ۷ ام به بعد، مقدار جابه‌جایی (u_{z_f}) ثابت مانده و تغییراتی ندارد، این بدان معناست که تا زمان حدود ۷ ثانیه، تغییرات نمودار نشان دهنده حرکت تکیه‌گاه (فاز لغزش) می‌باشد، اما بعد از حدود ۷ ثانیه، تغییرات نمودار صفر است و مکان تکیه‌گاه با گذشت حدود ۷ ثانیه به اندازه 0.0003 m جابه‌جا شده است (لغزش تکیه‌گاه) و بعد از آن به دلیل اتلاف انرژی در سیستم دیگر نیروهای ناشی از اندرکنش نمی‌تواند به نیروی اصطکاک غلبه کند و تکیه‌گاه در همان مکان ثابت باقی می‌ماند، که همان فاز چسبندگی است و جابه‌جایی گره شیر بعد از حدود ۷ ثانیه، تنها ناشی از تغییر شکل تکیه‌گاه ویسکوالاستیک می‌باشد.

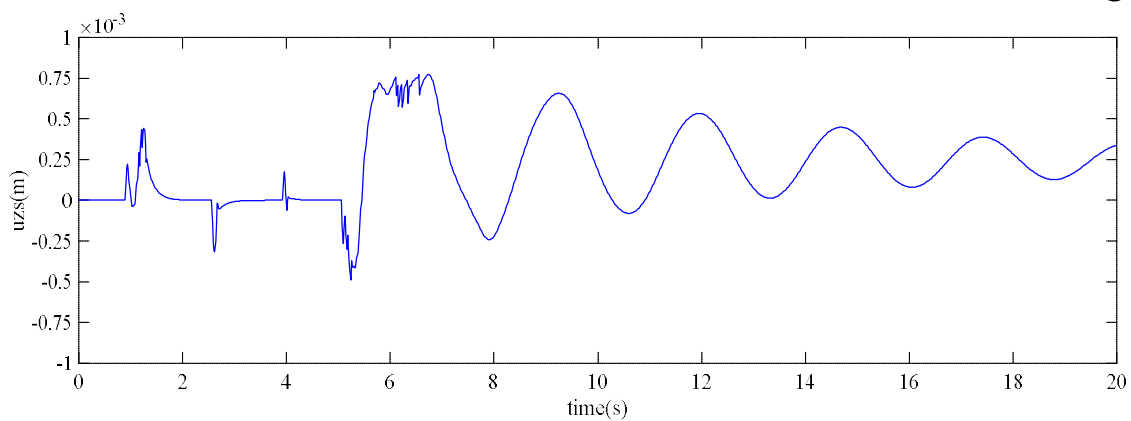
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۵-۲۰ الف) تاریخچه جابه‌جایی کل (u_z) گره شیر (تکیه‌گاه مرزی) ، ب) جابه‌جایی ناشی از لغزش تکیه‌گاه (u_{z_f}) ، ج) جابه‌جایی ناشی از تغییر شکل تکیه‌گاه (u_{z_s}) در لوله ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه لغزشی و نیروی اصطکاک ($5\%W_{total}$)

۶- فصل ششم: خلاصه، نتیجه‌گیری و ارائه
پیشنهادات

۶-۱- خلاصه

در این پایان‌نامه ابتدا مسائل کلی مرتبط با این تحقیق مانند ضربه قوچ، اندرکنش سیال-سازه در لوله‌ها، مواد ویسکوالاستیک و اصطکاک معرفی گردید. سپس با توجه به هدف این پایان‌نامه که بررسی اثرات تکیه‌گاه‌های مختلف (ساده (مکانیزم تغییر شکل محوری و برشی) و اثر اصطکاک در تکیه‌گاه (لغزشی)) ویسکوالاستیک بر اندرکنش سیال-سازه در هنگام وقوع ضربه‌قوچ در یک سیستم مخزن-لوله-شیر می‌باشد، معادلات و روابط مورد نیاز ارائه شده است. برای این منظور معادلات حاکم بر حرکت سیال در جریان غیرماندگار، معادله ارتعاش محوری سازه لوله با در نظر گرفتن اثرات تداخلی پواسن و اتصال و بارگذاری‌های هیدرولیکی وارد بر آن، شرایط اولیه و روابط شرایط مرزی به ویژه تکیه‌گاه‌های مختلف ویسکوالاستیک با استفاده از روش (full MOC) استخراج گردید. مواد ویسکوالاستیک در این تحقیق با استفاده از مدل مکانیکی کلین-ویت تعمیم یافته توصیف و روابط ساختاری حاکم بر آن مدل (روابط تنش و کرنش) و توابع خزش تطابقی و رهاسازی تنش (محوری و برشی) که رفتار خزشی و رهاسازی این مواد را توصیف می‌کنند معرفی شدند. برآ حل عددی انتگرال کانولوشن ناشی از رفتار مواد ویسکوالاستیک، از تقریبی که این انتگرال را به صورت روابط بازگشتی بر حسب مجهولاتی از گام زمانی فعلی و مقادیری از گام زمانی قبلی ارائه می‌نماید، استفاده شد. اثرات اصطکاک در تکیه‌گاه از طریق انتقال بین دو وضعیت چسبندگی و لغزش مدل شده است. در اینجا دو اثر تداخلی اتصال و پواسن در آنالیز پدیده ضربه‌قوچ در نظر گرفته شده است. در واقع به دلیل استفاده از تکیه‌گاه مختلف ویسکوالاستیک در محل شیر و در طول لوله و قابلیت ارتجاعی این نوع تکیه‌گاه‌ها و حرکت ناشی از لغزش تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک لغزشی به دلیل وقوع جابه‌جایی در محل شیر و تکیه‌گاه‌ها، کوپله اتصال اتفاق خواهد افتاد که در شرایط مرزی وارد می‌شود. اثر تداخلی پواسن توسط نسبت پواسن بر اساس پارمترهای سازه‌ای و هیدرولیکی در معادلات حاکم وارد می‌شود. از آنجایی که

اثر تکیه‌گاه ویسکوالاستیک هم در لوله الاستیک و هم در لوله ویسکوالاستیک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، معادلات هیدرولیکی و سازه‌ای برای هر دو نوع لوله با در نظر گرفتن اثرات تداخلی اتصال و پواسن، به نحوی که بتوان شرط مرزی خاص تکیه‌گاه‌های مختلف ویسکوالاستیک را در معادلات پیاده نمود ارائه شدند.

۶-۲- نتیجه گیری

پس از بررسی‌ها که در زمینه اثرات تکیه‌گاه مختلف ویسکوالاستیک انجام شد نتایج کلی زیر حاصل گردید که در سه بخش ارائه می‌شود. جهت مشاهده نتایج جزئی‌تر می‌توان به تفسیرهای ارائه شده در فصل پنجم مراجعه نمود.

۶-۲-۱- اثرات محوری تکیه‌گاه ویسکوالاستیک در پدیده ضربه قوچ با به

کارگیری روش (full MOC)

۱- نتایج نشان می‌دهد که روش کاملاً مشخصه با شرط مرزی ارائه شده به خوبی می‌تواند این نوع تکیه‌گاه‌ها را مدلسازی نماید و نتایج کاملاً بر هم منطبق و صحت سنجی انجام شده است.

۲- استفاده از تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک در لوله الاستیک به تعداد و مشخصات مناسب، باعث می‌شود با گذشت زمان، هدهای فشار و ارتعاشات ناشی از FSI نسبت به حالت بدون تکیه‌گاه (آزاد) میرا شود. البته در این حالت، ماکزیمم هد فشار اتفاق افتاده در بین کل سیکل‌های جریان غیرماندگار که مقدار آن بسته به مشخصات خط لوله و جریان دارد، تغییر چندانی نخواهد کرد.

۳- در لوله‌های ویسکوالاستیک اثر تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک بر میرایی هد فشار با گذشت زمان در مقابل اثر میرایی مواد ویسکوالاستیک دیواره لوله در حالت آزاد، بسیار ناچیز خواهد بود، اما در زمان‌ها و سیکل‌های اولیه می‌تواند به میرایی ارتعاشات هد فشار ناشی از FSI کمک نماید.

۴- حرکت اتصالات مانند شیر باعث می‌شود فشارهای ماکزیمم قدری کاهش پیدا کنند، در مقابل این کاهش فشارها، جابجایی‌های قابل ملاحظه‌ای در سازه اتصال و به طور کلی در شبکه اتفاق می‌افتد که می‌تواند، باعث تخریب شبکه گردد. بنابراین علاوه بر خواص قابل توجه مواد ویسکوالاستیک در میرایی، استفاده از تکیه-گاه‌های ویسکوالاستیک منجر به افزایش سختی کل سیستم و کاهش بیشتر جابه‌جایی‌های محوری لوله خواهد شد.

۶-۲-۲- اثرات برشی تکیه‌گاه ویسکوالاستیک در پدیده ضربه قوچ با به

کارگیری روش (full MOC)

۱- تبدیل مکانیزم تغییر شکل محوری تکیه‌گاه به مکانیزم تغییر شکل برشی، تغییر محسوسی در نتایج مربوط به لوله‌های الاستیک و ویسکوالاستیک ایجاد نمی‌کند. در اینجا بسته به مشخصات تکیه‌گاه به دلیل افزایش سختی سیستم در حالتی که مکانیزم تغییر شکل برشی تکیه‌گاه در نظر گرفته شود، جابه‌جایی به میزان کمی کاهش و هد فشاری به میزان کمی افزایش یافته است.

۶-۲-۳- اثرات تکیه‌گاه ویسکوالاستیک لغزشی (اصطکاک) در پدیده

ضربه قوچ با به کارگیری روش (full MOC)

۱- این نوع تکیه‌گاه، از جنس مصالح ویسکوالاستیک با مکانیزم تغییر شکل برشی فرض شده است، با این تفاوت که تکیه‌گاه به پایین (پی یا زمین) متصل نمی‌باشد و آزادانه روی سطحی می‌لغزد. رفتار تکیه‌گاه لغزشی دارای دو فاز می‌باشد (فاز لغزش و فاز چسبندگی)، به طور خلاصه می‌توان گفت اگر عکس العمل افقی ایجاد شده در تکیه‌گاه ناشی از FSI از نیروی اصطکاک ایستایی کمتر باشد، لغزشی صورت نمی‌گیرد و تکیه‌گاه مانند حالت ساده با مکانیزم تغییر شکل برشی (خاصیت ویسکوالاستیسته به تنهایی) عمل می‌کند در غیر این صورت، لغزش صورت گرفته و هر دو خاصیت اصطکاک و ویسکوالاستیسته باهم عمل می‌کند.

۲- بطور کلی نتایج به کارگیری این نوع تکیه‌گاه‌ها برای لوله‌های الاستیک و ویسکوالاستیک وابسته به مقدار نیروی اصطکاک تکیه‌گاه می‌باشد، بطوریکه هر چه مقدار نیروی اصطکاک بیشتر باشد، عکس العمل افقی به وجود آمده ناشی از FSI در تکیه‌گاه نمی‌تواند بر آن غلبه کند و تکیه‌گاه در فاز چسبندگی می‌ماند، و نتایج آن (هد فشار و جابه‌جایی) به نتایج تکیه‌گاه‌های ساده با مکانیزم تغییر شکل برشی نزدیک می‌شود، با کم شدن نیروی اصطکاک و ورود به فاز لغزش، نتایج از حالت ساده تکیه‌گاه ویسکوالاستیک کمی فاصله می‌گیرد.

با کاهش بیشتر مقدار نیروی اصطکاک، نتایج در لوله‌های الاستیک و ویسکوالاستیک از حالت ساده (مکانیزم تغییر شکل برشی) فاصله بیشتری خواهد گرفت، بطوریکه در سیکل‌های ابتدایی نتایج، ارتعاشات هد فشار و جابه‌جایی افزایش می‌یابد، و نتایج (فشار و جابه‌جایی) به حالت خط آزاد لوله نزدیک می‌شود، که با گذشت زمان، ارتعاشات میرا و

مقادیر جابه‌جایی و هد فشار کاهش پیدا می‌کند، بخصوص در لوله‌های الاستیک بسته به مقدار نیروی اصطکاک قابل ملاحظه می‌باشد.

۶-۲-۴- پیسنهادات برای ادامه کار

بدیهی است که مباحث مربوط به تحقیق پیرامون FSI در لوله‌ها، هنوز دارای زمینه‌های زیادی برای تکمیل کردن و بهبود شرایط و روش‌ها می‌باشد. برخی از مطالعات و تحقیقاتی که می‌تواند منجر به بهبود و پیشرفت کار شود در زیر به طور خلاصه بیان می‌شود.

- انجام تحقیقات آزمایشگاهی برای بررسی صحت نتایج مدل‌های عددی.
- بررسی اثرات انواع مختلف تکیه‌گاه ویسکوالاستیک در نظر گرفته شده بر اثرات تداخلی به هنگام وقوع ضربه قوچ در سایر سیستم‌های لوله مانند پمپ‌ها، انشعاب‌ها، زانویی‌ها و موارد کاربردی دیگر.
- مطالعه روی تحلیل تکیه‌گاه ویسکوالاستیک در سیستم لوله و شبکه توزیع سیال با رویکرد طراحی. همچنین می‌توان در زمینه بهینه‌سازی در طراحی این تکیه‌گاه‌ها در شبکه‌های توزیع، با در نظر گرفتن اثرات چکش آبی، مطالعاتی انجام داد (انتخاب بهینه برای طول، سطح مقطع تکیه‌گاه، تعداد تکیه‌گاه‌های میانی، فواصل بهینه آنها و غیره).
- یکی از این محدودیت‌ها روش full MOC، نسبت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ است که باید همواره برابر با سرعت موج در لوله باشد. در یک خط لوله تنها، می‌توان Δx را طوری انتخاب کرد که کل لوله به قطعات مساوی تقسیم شود و مقدار Δt را بر طبق آن تعیین نمود. ولی یک شبکه لوله که از لوله‌های با جنس و قطر متفاوت تشکیل شده است، مقدار سرعت موج فشاری در هر کدام از لوله‌ها می‌تواند متفاوت باشد. از طرفی چون کل شبکه در یک پروسه حل واحد تحلیل می‌گردد،

- طول بازه زمانی برای کل مسأله باید مقداری ثابت باشد. بنابراین ارائه روش‌های مختلف برای رفع مشکل ذکر شده، می‌تواند بعنوان یک کار تکمیلی برای این پایان نامه قلمداد شود.
- استفاده از مدل‌های ویسکوالاستیک بر اساس مشتقات کسری. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان با به کارگیری تعداد ثابت‌های کمتری مشخصات رفتاری ماده ویسکوالاستیک را توصیف نمود.
 - در این پایان نامه برای سادگی کار نسبت پواسن مصالح ویسکوالاستیک به کار رفته در تکیه‌گاه‌ها و دیواره لوله ثابت فرض شده است، اما نسبت پواسن در مصالح ویسکوالاستیک متغیر نسبت به زمان می‌باشد که بعنوان یک کار تکمیلی می‌توان نسبت پواسن مصالح ویسکوالاستیک با توجه آنچه دقیق‌تر می‌باشد، نظر گرفت.
 - در این تحقیق سیستم مورد مطالعه تنها در جهت محوری در نظر گرفته شده است در نتیجه میتوان آنالیز اثرات تکیه‌گاه ویسکوالاستیک و اندرکنش سیال-سازه را با در نظر گرفتن معادلات خمشی و پیچشی سازه لوله (سه بعدی) تکمیل نمود و همچنین اثرات مربوط به اصطکاک، در دو جهت عمود برهم در نظر گرفته شود.
 - می‌توان پدیده ضربه قوچ در لوله‌های الاستیک و ویسکوالاستیک با تکیه‌گاه‌های ویسکو-الاستیک را در حوزه فرکانس مورد بررسی قرار داد.

٧- مراجع

منابع فارسی

جزایری مقدس س م، (۱۳۸۳)، پایان نامه ارشد: "تحلیل همزمان جریان غیر ماندگار و دینامیک سازه خط لوله". دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

زنگانه ر، (۱۳۹۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "تاثیر تکیه گاه ویسکو الاستیک بر اندرکنش سیال-سازه در پدیده ضربه قوچ" دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود

کرامت ع، (۱۳۸۹)، رساله دکتری: "بررسی اندرکنش سیال-سازه در سیستم های لوله ویسکو الاستیک با در نظر گرفتن جدایی ستون مایع" دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود

کرامت ع، (۱۳۸۴)، پایان نامه ارشد: "تحلیل دینامیکی شبکه های لوله تحت فشار با روش اجزای محدود". دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

منابع لاتین

Achouyab ,E.H.,Bahrar,B., (2011), "Numerical modeling of phenomena of water hammer using a model of fluid-structure interaction", Comptes Rendus Mécanique 339, 262–269

Ahmadi, A.,Keramat,A., (2010), "Investigation of fluid–structure interaction with various types of junction coupling", Journal of Fluids and Structures 26, 1123–1141

Adamkowski, A., Henclik, S., Janicki, W., Lewandowski, M., (2017), "The influence of pipeline support stiffness onto the water hammer run", European Journal of Mechanics-B/Fluids 61(2), 297–303

Anderson, J.C., Singh, A.K., (1976), "Seismic response of pipelines on friction supports", J. Eng. Mechanics Division ASCE 102(EM2), 275–291.

Bakre, S.V., Jangid, R.S., Reddy, G.R., (2004), "Seismic response of piping system with isolation devices", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper no. 2676.

Bakre, S.V., Jangid, R.S., Reddy, G.R., (2007), "Response of piping system on friction support to bi-directional excitation", Nuclear Engineering and Design 237(2), 124–136

Capone, G., D'Agostino, V., della Valle, S., Guida, D., (1993), "Influence of the variation between static and kinetic friction on stick-slip instability", Wear 161 (1), 121–126.

Chazal C.F , Moutou pitti R., 2009. An incremental constitutive law for ageing visco-elastic materials: a three-dimensional approach., C R Mecanique 337(1):30-33

Chiba, T., Kobayashi, H., Yokoi, R., Suzuki, K., Mitsumori, T., Shimizu, N., Ogawa, N., Minowa, C., (1992), “An experimental study of seismic response of piping system with friction: Part 2 - Simplified method focused on the reduction effect of the friction”, *Seismic Eng., ASME PVP 237 (2)*, 243–248.

Covas, D., Stoianov, I., Mano, J., Ramos, H., Graham, N., Maksimovic, C., (2005), “The dynamic effect of pipe–wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part II – model development, calibration and verification”, *IAHR Journal of Hydraulic Research* 43, 56–70.

Covas, D., Stoianov, I., Mano, J., Ramos, H., Graham, N., Maksimovic, C., (2004a), “The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity on hydraulic transients, Part I— experimental analysis and creep characterization”, *IAHR Journal of Hydraulic Research* 42, 516–530.

Covas, D., Stoianov, I., Ramos, H., Graham, N., and Maksimovic, C., Butler, D., (2004b), “Water hammer in pressurized polyethylene pipes: conceptual model and experimental analysis”, *Urban Water Journal*, 1(2), 177-197.

Ferras, D., Manso, P., Scheliess, A., Covas, D., (2017) “Fluid-structure interaction in straight pipelines with different anchoring conditions”, *Journal of Sound and Vibration* 394, 348-365

Friswell M.I, Sawicki J.T, Inman D.J, Lees AW., (2006), “The response of rotating machines on viscoelastic supports”, *ISMA*

Gray, C.A.M., (1953), “The analysis of the Dissipation of Energy in waterhammer”, *Proc ASCE*, 119:1176-1194

Heinsbroek, A.G.T.J., (1997), “Fluid–structure interaction in non-rigid pipeline systems”, *Nuclear Engineering and Design*, 172, 123-135.

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*, BHR Group, Edinburgh, UK, 1994, 17-30.

Henlik, S., (2018), “Numerical modeling of water hammer with fluid–structure interaction in a pipeline with viscoelastic supports”, *Journal of fluids and structures* 76, 469-487.

Keramat, A., Tijsseling, A.S., Ahmadi, A., (2010), “Investigation of transient cavitating flow in viscoelastic pipes”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 12 (1), 012081

Keramat,A., ., Ahmadi,A, (2012), “Axial wave propagation in viscoelastic bars using a new finite element-based method”, *J Eng Math*, DOI 10.1007/s 10665-012-9556-y.

Keramat,A.,Tijsseling,A.S., Hou,Q., Ahmadi,A., (2012), “Fluid–structure interaction with pipe–wall viscoelasticity during waterhammer”, *Journal of Fluids and Structures*28,434–455.

Kobayashi, H., Yoshida, M., Ochi, Y., (1989), “Dynamic response of piping system on rack and structure with gaps and frictions”, *Nuclear Eng. Design* 111 (3), 341–350.

Kwon , Young W. , Bang , Hyochoong , (2000), “The Finite Element Method Using MATLAB”, SecondEdition, CRC Press , Boca Raton , Florida

Li, Q.S., Yang Ke, Zhang, L., (2003), “Analytical solution for fluid-structure interaction in liquid-filled pipes subjected to impact-induced water hammer”, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 129, 1408- 1417.

Mikhailenko B.G, Mikhailov A.A, Reshetova G.V., (2003),. “Numerical Viscoelastic modeling by the spectral laguerre method”, *Geophys Prospect.* 51(1):37-48

Park, Y.J., Wen, Y.K., Ang, A.H.S., (1986), “Random vibration of hysteretic system under bi-directional motions”, *Earthquake Eng. Struct. Dynamics* 14 (4), 543–560.

Ruus, E., (1996), “Optimum rate of closure of Hydraulic Turbine Gates”, Presented at Amer . Soc. Mech. Engrs. Engineering Inst. Of Canada conference ,Denver, Colorado

Shimuzu, N., Suzuki, K.,Watanabe, T., Ogawa, N., Kobayashi, H., (1996), “Large scale shaking table test on modal responses of 3D piping system with friction support”, *Seismic Eng.*, ASME PVP 340, 269–275.

Soares, A.K., Covas, D.I.C., Ramos, H.M., Reis, L.F.R., (2009), “Unsteady Flow with Cavitation in Viscoelastic Pipes”, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 2, No. 4, 269-277

Sreejith, B., Jayaraj, K., Ganesan. N. , Padmanabhan , C. , Chellapandi , P. , Selvaraj , P., (2004), “Finite element analysis of fluid-structure interaction in pipeline systems”, *Nuclear engineering and design*, 227 313-322.

Stoessel JC, Keowen RS, and Ibanez P, (1988), “Viscoelastic pipe support effect on water hammer induced loads”, *Proceedings of the ASME Pressure Vessle and Piping Conference*, New York, USA, ASME-PVP 144:279-281

Streeter, V.L, and Lai, C., (1963), “Waterhammer Analysis Including fluid friction”, *Trans Amer Soc, Civ. Engrs*, 128: 1491-1524 (see also discussion by Gray.C.A.M), pp.1530-1533 and by painter, H.M.,pp. 1533-1538

Suzuki, K., Watanabe, T., Ogawa, N., Kobayashi, H., Yokoi, R., Ogawa, N., Minowa, C., (1992), “An experimental study of seismic responses of piping systems with the friction: Part 1- Vibration test by usinglarge scale shaking table”, *Seismic Eng.*, ASME PVP 237 (2), 237– 241

Tijsseling A.S. and Vardy AE., (2008), “Time scales and FSI in oscillatory liquid-filled pipe flow”, BHR Group, Proc. of the 10th Int. Conf. on Pressure Surges (Editor S Hunt), Edinburgh, United Kingdom, ,pp. 553-568.

Tijsseling, A.S., (1993), “Fluid-structure interaction in case of water hammer with cavitation”, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands

Tijsseling, A.S., (1996), “Fluid-structure interaction in liquid-filled pipe systems: a review”, Journal of Fluids and Structures, 10, 109-146

Tijsseling, A.S., (2003), “Exact solution of linear hyperbolic four-equation system in axial liquid-pipe vibration” Journal of Fluids and Structures , Vol 18, Issue 2, 179-196.

Tijsseling, A.S., and Lavooij, C.S., (1989), “Fluid-Structure Interaction and Column Separation in a Straight Elastic Pipe”. Proc. of the 6th Int. Conf. on Pressure Surges, BHRA, Cambridge, UK, 27-41

Tijsseling, AS., Vardy, AE., (1996), “Axial modelling and testing of a pipe rack”, in: Proceedings of the BHR group conference series publication, Mechanical engineering publications limited, vol. 19 , pp. 363–384

Tillema H.G., (2003), “Noise reduction of rotating machinery by viscoelastic bearing supports”, PhD thesis, University of Twente, ISBN: 90-36518776

Vostroukhov A.V, Metrikine A.V, (2003), “Periodically supported beam on a visco-elastic layer as a model for dynamic analysis of a high-speed railway track”, International Journal of Solids and Structures 40: 5723–5752

Wiggert, D.C., Otwell R.S., Hatfield, F.J.,(1985), “The effect of elbow restraint on pressure transients”, ASME Journal of Fluids Eng. 107, 402–406. Discussed by Schwirian, R.E. and Walker, J.S., 108, 121–122

Wiggert, D.C, Tijsseling, A.S., (2001), “Fluid transients and fluid-structure interaction in flexible liquid-filled piping”, ASME Applied Mechanics Reviews 54, 455-481.

Wineman, A.S., Rajagopal, K.R., (2000), “Mechanical Response of Polymers: An Introduction”, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, ISBN: 9780521644099.

Wylie E. B, Streeter, V.L, (1978), “Fluid transient”, McGraw Hill, United state of the American, pp 379.ISBN 0-07-072187-4

Yang, K., Li, Q., Zhang, L., (2004), “Longitudinal vibration analysis of multi-span liquid-filled pipelines with rigid constraints”, *Journal of Sound and Vibration* 273(1), 125–147.

Yokoi, R., Kobayashi, H., Chiba, T., Suzuki, K., Shimuzu, N., Ogawa, N., (1993), “Evaluation of the seismic response reduction of piping systems by support friction”, *Seismic Eng., ASME PVP* 256 (1), 155–160.

Zanganeh ,R. , Ahmadi,A , Keramat, A., (2015), “Fluid–structure interaction with viscoelastic supports during waterhammer in a pipeline”, *Journal of fluids and Structures* 54,215-234.

Abstract

The fluid-structure interactions in water hammer phenomenon on pipe systems have always been considered. Because these effects are observed as vibration and an increase in the pressure and displacement of the pipe wall. . Regarding the properties of viscoelastic materials in damping and the effects of friction on energy depletion, the purpose of this study was to model the viscoelastic supports with axial and shear deformation mechanisms due to the (horizontal) forces applied to the supports and also the effect of friction on the supports during the water hammer phenomenon in straight pipe systems (elastic and viscoelastic) with the viscoelastic sliding support approach to investigate their effects on FSI.

In this thesis, poisson and junction coupling of FSI mechanisms are considered. Viscoelasticity behavior of the pipe wall and the supports is described with the generalized Kelvin-voigt mechanical model. Friction supports are modeled through the transition between stick and slip condition. By providing boundary conditions for modeling different types of viscoelastic supports at the valve and along the pipe, the governing equations are solved by the full MOC method in the time domain.

Investigations showed that the use of simple viscoelastic supports (axial and shear deformation mechanism) with the appropriate specifications and number, in damping of the pressure and displacement of the pipe wall due to FSI, is effective. and the effects of friction due to slip support (in the viscoelastic sliding supports) depend on the amount of frictional force, so that in the initial cycles, by decreasing frictional force, the results (pressure and displacement) are close to free mode (without support) and by increasing that, the results (pressure and displacement) are close to the pipeline with the simple viscoelastic support (shear mechanism) mode. By increasing the amount of friction force in the viscoelastic support, over time, Decreasing and damping in the vibration of the pressure head and displacement of the pipe wall and the damping in the pressure head values, compared to the use of simple viscoelastic supports were observed, especially in the elastic pipe.

Key words: fluid-structure interaction, viscoelastic supports, water hammer, friction support



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Water Engineering and Hydraulic Structures

**The effects of different performance of
viscoelastic supports on fluid-structure
interaction during water hammer using full
MOC method**

By: Rahil sadat Hosseini

**Supervisors
Dr. Ahmad Ahmadi**

**Advisor
Roohollah Zanganeh**

September 2018