



تاثیر تکیهگاه ویسکوالاستیک بر اندرکنش سیال- سازه در پدیده ضربه قوچ

دانشجو: روح اله زنگانه

اساتيد راهنما:

دکتر احمد احمدی، دکتر علیرضا کرامت

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهريور 1392

نىمارە .	d h
تولى	، پېښې د
تولى	مالا ما يخصنان کېسکې يې د د ۹
، تحصیلی دوره کارشناسی ارشد	فرم شماره (۶) فرم صور تجلسه دفاع از پایان نامه
، از حضرت ولی عصر (عیج) ارزیابی جلسه -	با تأییدات خداوند متعال و با استعانت
- اندنتگانیه شیته عمرانگیات سانده ای	دفراه از رابان نام ه کارشناسی ارشد راق ای رو
ع مدروی می روست مسری مربع می رود می می	میدرولیک تحت عنوان: تباثیر تکیمه کناه ویسا
کوالاستیک بـر انـدر کـنش سـیال – سـازه در	هیدرولیک تحت عنوان: تباثیر تکیمه گناه ویسا

	:00	صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گر
مردود 🗌	دفاع مجدد 🗌	قبول (با درجه : علی ـــــــــــــــــــــــــــــــــــ

۲_ بسیار خوب (۱۸/۹۹ ـ ۱۸) ۳_ خوب (۱۷/۹۹ ـ ۱۶) ۱_عالی (۲۰ _ ۱۹)

۴_ قابل قبول (۱۵/۹۹ _ ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هيأت داوران	نام ونام خانوادگی	مر تبة علمي	امضاء
۱ ـ استاد راهنما اول	دکتر احمد احمدی	استاد يار	in e in rye
۲- استاد راهتما دوم	دكتر عليرضا كرامت	استاد يار	میں ہے۔ اور سے فرقی اور اور
۲ـ نماينده شورای تحصيلات نکميلی	دکتر مهدی کلی	استاد یار	
۲_استاد ممتحن	دکتر مهدی عجمی	استاد يار	C.I.J.
۵ ـ استاد ممتحن	دکتــر وحيدرضــا کــلات جارى	استاد يار	·

تشكر و قدرداني

هر نفسی که فرو میرود ممدّ حیات است و چون برون میآید مفرّح 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 آروم.

سپس قبل از هر چیز، بر خود لازم می دانم تا از اساتید راهنمای ارجمندم، جناب آقای **دکتر احمد احمدی** و جناب آقای **دکتر علیرضا کرامت،** به خاطر حمایتهای پیوسته، آموزش ها و رهنمودهای ارزشمند، تشویقها و دلگرمیهایشان در تمام مدت انجام این پژوهش، تقدیر و تشکر ویژهای نمایم.

همچنین، از پدر، مادر، خواهر و برادرم، که همواره حامی و مشوق بنده بودند، تشکر مینمایم.

تعهد نامه

اینجانب روح اله زنگانه دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - گرایش سازههای هیدرولیکی دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تاثیر تکیهگاه ویسکوالاستیک بر اندرکنش سیال-سازه در پدیده ضربه قوچ تحت راهنمائی دکتر احمد احمدی و دکتر علیرضا کرامت متعهد می شوم:

- تحقيقات در اين پايان نامه توسط اينجانب انجام شده 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 تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیج نوع مدر کی یا امتیازی در هیج 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 افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج
 از پایان نامه رعایت شده است.
- 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 اخلاقی انسانی رعایت شده است.

مالکیت نتایج و حق و 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 نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
 استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیدہ

مباحث تداخلی سیال-سازه (FSI)، مانند کوپله پواسن و اتصال و اثرات آنها بر نتایج پدیده ضربه قوچ، به ویژه در سیستمهای لوله با درجه اهمیت بالا، همواره مورد توجه بوده است. چراکه این اثرات به صورت یک افزایش و ایجاد ارتعاش در هدهای فشار و همچنین جابهجاییهای دیواره لوله مشاهده میشود. با توجه به رفتار مواد ویسکوالاستیک در میرایی و استهلاک انرژی، آنالیز ضربه قوچ در یک خط لوله (از جنس الاستیک و همچنین ویسکوالاستیک) با تکیهگاههای ویسکوالاستیک به همراه مدلسازی اثرات تداخلی سیال-سازه در آن، هدف اصلی این تحقیق میباشد.

در این پایاننامه جهت توصیف رفتار مواد ویسکوالاستیک از مدل مکانیکی جامع کلوین-ویت و فرم انتگرالی روابط ساختاری آن استفاده شده است. برای حل عددی انتگرال کانولوشن ناشی از رفتار مواد ویسکوالاستیک، از تقریب عددیای که این انتگرال را به صورت روابط بازگشتی بر حسب مجهولاتی از گام زمانی فعلی و مقادیری از گام زمانی قبل ارائه مینماید، استفاده میشود. معادلات هیدرولیکی با استفاده از روش خطوط مشخصه (MOC) و معادله سازهای که به نحوی مناسب جهت پیادهسازی شرط مرزی تکیهگاه ویسکوالاستیک استخراج شدهاند با استفاده از روش اجزای محدود (FEM) و در حوزه زمان حل میشوند.

بررسیهای انجام شده نشان داد که استفاده از تکیه گاههای ویسکوالاستیک با مشخصات و تعداد مناسب (متناسب با شرایط خط لوله)، در میرایی و کاهش جابه جاییهای 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. همچنین میتواند موجب کاهش تنش و تغییرات آن با گذشت زمان در میله و تکیه-گاهها و بهبود عملکرد سازه لوله در برابر پدیده خستگی گردد. به علاوه میتوان ماکزیمم هد فشار در لولههای ویسکوالاستیک که بر خلاف لوله الاستیک در سیکل اول اتفاق میافتد را نیز کاهش داد.

كلمات كليدى: اندركنش سيال- سازه، تكيه گاههاى ويسكوالاستيك، ضربه قوچ، لوله ويسكوالاستيك.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

مقالات مجلات علمى

- زنگانه، روح اله، و احمدی، احمد، (1392)، "بررسی ارتعاش محوری میله با تکیهگاه ویسکو الاستیک". مجله علمی پژوهشی مکانیک سازهها و شارهها، دوره 3، شماره 1، صفحه 67-79.
- زنگانه، روح اله، کرامت، علیرضا، و احمدی، احمد، (1392)، "تاثیر مشخصات تکیهگاه ویسکو-الاستیک مدلسازی شده با مدل جامع کلوین -ویت بر ارتعاش محوری میله". ارسال شده به مجله علمی - پژوهشی مدلسازی در مهندسی (در مرحله داوری)،

فهرست مطالب

صفح	عنوان
1	فصل 1: مقدمه
3	1-1- پديده ضربه قوچ (چکش آبی)
5	2-1- اندر كنش سيال-سازه در لولهها
6	1-2-1- انواع معادلات مدلسازي كوپله
7	2-2-1- انواع مکانیزمهای اثرات کوپله
7	1-2-2-1- اثرتداخلى پواسن
8	2-2-2-1 اثر تداخلی تقاطع (اتصال)
9	-2-2-2-1 اثر تداخلی اصطکاک
10	2-2-4- تفاوت اثر تداخلي پواسن و اتصال
11	3-1- مواد ويسكوالاستيك
14	4-1- اهداف و فرضيات پايان نامه
15	5-1- فصل بندى پايان نامە
17	فصل 2: تاریخچه و مطالعات پیشین
18	- 1-2- هيدروليک جريان ميرا در لوله
20	2-2- اثر تداخلی سیال و سازه در لوله
25	3-2- كاربرد مواد ويسكوالاستيك در سيستم لوله
30	فصل 3: مدل ریاضی
31	1-3- معادلات حاكم
31	1-1-3- مدلهای مکانیکی مواد ویسکوالاستیک
34	3-1-1-1 روابط ساختاري مواد ويسكوالاستيك
ابط بين آن دو تابع.41	3-1-1-2- پارامترهای توابع خزش تطابقی و رهاسازی تنش و رو
فتن نسبت پواسن .44	3-1-1-3- روابط تنش_کرنش مواد ویسکوالاستیک با در نظر گر
ل_سازە45	3-1-1-4- اثر مواد ویسکوالاستیک لوله و تکیهگاه بر تداخل سیا
46	-2-1-3 معادلات جریان گذرا در لوله الاستیک و ویسکوالاستیک
47	1-2-1-3 معادله پیوستگی
50	بیر 2-2-1-3- معادله مومنتوم
51	

56	3-3- شرايط مرزى
57	3-3-1- شير در انتهاى لوله
58	2-3-3 تكيه كاه ويسكوالاستيك
60	فصل 4:روشهای حل عددی
61	1-4- مقدمه
62	2-4- تقریب عددی ترمهای انتگرال کانولوشن
64	4-3- حل معادلات هيدروليک جريان به روش خطوط مشخصه
68	4-4- حل معادله ارتعاش محوری سازه لوله به روش اجزای محدود
72	4-5- پیادہ سازی شرایط مرزی
73	4-5-1- شير در انتهاى لوله
76	2-5-4- تكيه گاه ويسكوالاستيك
78	6-4- الگوريتم كلى در حل عددى
81	فصل 5: صحت سنجي و ارائه نتايج
82	1-5- مقدمه
83	2-5- ارتعاش محوري ميله با تكيه گاه ويسكوالاستيك
83	1-2-5- معادلات حاكم
86	5-2-2- ارتعاش تحت نيروي محرك ثابت
90	5-2-2-1- تغییرات تنش در میانه میله
92	2-2-2-5- تغييرات تنش در تكيهگاهها
93	-2-2-5 صحت سنحي
100	2-2-2-5- تاثیر مشخصات تکیهگاه ویسکوالاستیک بر ارتعاش محوری میله
108	5-2-5- ارتعاش تحت نیروی محرک سینوسی
108	5-2-5- ارتعاش میله الاستیک و ویسکوالاستیک با تکیهگاه گیردار
110	5-2-3-2-1 ارتعاش میله الاستیک با تکیه گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک
112	5-2-3-1 اثر فركانس نيرو بر ارتعاش ميله الاستيك با تكيه گاه ويسكوالاستيك
113	3-5- اثر تکیهگاه ویسکوالاستیک بر پدیده ضربه قوچ در سیستم لوله
115	2-3-5- لوله الاستيك با اثر كويله يواسن و اتصال (بدون تكيه گاه VE)
117	5-3-3-4 لوله الاستیک با تکیه گاه مرزی (در محل شیر) ویسکوالاستیک
120	5-3-4- لوله الاستیک با تکیهگاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک
124	5-3-5- لوله ويسكوالاستيك با اثر كويله يواسن و اتصال (بدون تكيهگاه VE)
126	5-3-6-4 لوله ويسكوالاستيک با تكيه گاه مرزى (در محل شير) ويسكوالاستيک
128	5-3-7- لوله ویسکوالاستیک با تکیه گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک

130	فصل 6: خلاصه، نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات
131	6-1- خلاصه
133	2-6- نتيجەگىرى
ارتعاش محوري ميله	6-2-1- اثرات تکیهگاه ویسکوالاستیک در بررسی ا
سربه قوچ در لوله	6-2-2- اثرات تکیه گاه ویسکوالاستیک در پدیده ض
137	3-6- پیشنهادات برای ادامه کار

144

139

منابع

فهرست اشكال

شکل (1-1) اثرات ناشی از پدیده ضربه قوچ در لوله، در یک سیکل بعد از بسته شدن ناگهانی شیر
شکل (1-2) تغییرات فشار با زمان در پشت شیر، الف) بدون اصطکاک، ب) با در نظر گرفتن اصطکاک
شکل (1-3) پاسخ مکانیکی ماده ویسکوالاستیک در، الف) تست خزش و ب) تست رهاسازی
شكل (1-3) مدل مكانيكي ،الف) كلوين – ويت، ب) مكسول
شكل (3-2) مدل مكانيكي، الف)كلوين-ويت تعميم يافته، ب)مكسول تعميم يافته
شکل (3-3) طرح نشاندهنده متغیرهای تعریف شده در توصیف تنش بر دیواره لوله، الف)نمای مقطع لوله
53 ($z-r$)، ب)نمای جانبی لوله (صفحه) جانبی اوله (صفحه) ($z-r$
شکل (3-4) سیستم مخزن- لوله-شیر، به همراه تکیه گاه ویسکوالاستیک در محل شیر و در طول لوله
شکل (1-4) خطوط مشخصه در مختصات <i>z</i> و <i>t</i>
شکل (2-4) شکل شماتیک تکیه <i>گ</i> اه ویسکوالاستیک متصل به لوله در گره z
85 شکل (1-5) میله در معرض نیروی محوری $F(t)$ و تکیه گاههای مرزی و میانی ویسکوالاستیک
شکل (2-5) تاریخچه جابهجایی محوری میله الاستیک با شرایط مختلف تکیه گاهی، در گره x=4 m
شكل (3-5) تاريخچه جابهجايي محوري ميله الاستيك با شرايط مختلف تكيه گاهي، در گره x=1.95 m
شکل (4-5) تاریخچه جابهجایی محوری میله ویسکوالاستیک با شرایط مختلف تکیه گاهی در گره 89.x=4 m
شکل (5-5) تاریخچه جابهجایی محوری میله ویسکوالاستیک با شرایط مختلف تکیهگاهی در گره
90 <i>x</i> =1.95 m
شکل (6-5) تاریخچه تنش در میانه میله الاستیک مرتعش. الف) مقایسه بین دو حالت میله با تکیهگاه
گیردار (رنگ آبی) و میله با تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک (رنگ قرمز)، ب) مقایسه بین دو حالت میله با
تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک (رنگ قرمز) و میله با تکیه گاه مرزی و دو تکیه گاه میانی ویسکوالاستیک (رنگ
مشكى)
شکل (5-7) تاریخچه تنش در تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک (رنگ آبی)، تکیهگاه میانی ویسکوالاستیک واقع
در x=1.3 m (رنگ قرمز) و تکیهگاه میانی ویسکوالاستیک واقع در x=2.6 m (رنگ مشکی)
شکل (5-8) مقایسه نتایج ارتعاش میله ویسکوالاستیک (آبی) و میله الاستیک (قرمز) با تکیهگاه گیردار.
راست: نتايج [Keramat & Ahmadi, 2012]، چپ: نتايج تحقيق حاضر
96 شکل (7-5) میله با تکیه گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک تحت نیروی ثابت F_0
شکل (5-10) تاریخچه جابهجایی محوری سه گره انتهایی (رنگ قرمز) و گره میانی (رنگ آبی) و گره ابتدای
(رنگ مشکی) میله الاستیک با تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک
شکل (5-11) تاریخچه جابهجایی محوری سه گره انتهایی (رنگ قرمز)، گره میانی (رنگ آبی) و ابتدایی (رنگ
مشکی) میله ویسکوالاستیک با تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک
شکل (5-12) تاریخچه جابهجایی محوری گره انتهایی میله الاستیک با تکیهگاه مرزی و یک تکیهگاه میانی
ويسكوالاستيك.

فهرست جداول

ساخت لولهها8	جدول (1-1) مقادیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسن برای مصالح مورد استفاده د
67	جدول (4-1) تعريف ضرايب استفاده شده در معادلات (4-7) الی (4-10)
87	جدول (5-1) مشخصات مصالح ويسكوالاستيك بكار رفته در ميله و تكيه گاهها
94	جدول (5-2) مشخصات مواد ویسکوالاستیک بکار رفته در میله
ﻪ ﻗﻮﭺ114	جدول (5-3) دادههای ورودی مورد نیاز در آزمایش ایمپریال کالج جهت بررسی ضر
$_{0}$ و Q_{0} =1.01 l/s و	جدول (5-4) ضرایب کالیبره شده توابع کرنش خزشی در آزمایش ایمپریال کالج برا
114	با صرفنظر از اصطکاک غیرماندگار
117	جدول (5-5) مشخصات تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک بکار رفته در محل شیر
121	جدول (6-5) مشخصات تکیهگاههای میانی ویسکوالاستیک بکار رفته در طول لوله .
ر آزمایش ایمپریال کالج	جدول (5-7) پارامترهای تابع رهاسازی تنش معادل ماده ویسکوالاستیک بکار رفته
124	لندن با پارامترهای تابع خزش تطابقی جدول (5-4)

فصل اول



ضربه قوچ یا چکش آبی^۱ در لوله ها به طور عمده به دلیل بسته شدن شیر و یا توقف ناگهانی پمپ ایجاد میشود. زمانی که این پدیده اتفاق میافتد در خصوصیات جربان (دبی، فشار و ...) تغییراتی ایجاد خواهد شد. به طوری که دبی جریان صفر و فشار نسبت به حالت پایدار قبل، به طور نوسانی به مقدار زیادی افزایش و کاهش می یابد. این تغییرات گاها موجب تغییر شکلهای شعاعی و محوری و بروز جابهجاییهای قابل توجهی در سازه لوله می شود. بنابراین در این وضعیت دائما بین سیال و سازه اندرکنشی وجود خواهد داشت که بر یکدیگر اثر میگذارند. این موضوع میتواند باعث بروز خرابیهای مختلفی در سیستم لوله مانند پارگی در لوله، جدا شدن لوله از اتصالات جانبی و همچنین ایجاد تنشهای زیادی در تکیهگاهها و ... شود.

حال این سوال مطرح می شود که آیا روشهایی جهت کاهش اثرات ضربه قوچ و اندر کنش سیال – سازه^۱ وجود دارد؟ آیا می توان با بکار گیری موادی، چه در خود سازه اصلی (لوله) و چه در سیستم های مرتبط با سازه اصلی مانند تکیه گاهها این اثرات را کاهش داد؟ آیا می توان از تکیه گاههایی

استفاده کرد که هم تنش وارده و هم جابهجاییهای سازه لوله را تا حد زیادی کاهش دهد؟ تا کنون روشهای مختلفی جهت کنترل ضربه قوچ و تعدیل فشارها و کاهش جابهجاییها تا حد مقادیر قابل قبول، بکارگرفته شده است. از جمله میتوان به استفاده از چرخ طیار، لوله کنار گذر، شیر یکطرفه، نصب شیر هوا، مخازن موج گیر و ... اشاره کرد. یکی دیگر از روشهای کارآمد استفاده از لوله-های انعطاف پذیر ساخته شده از مواد ویسکوالاستیک^۳ (پلیمری) می باشد[کرامت 1389]. این مواد به دلیل خاصیت میراکنندگیای که دارند بسیار مفید هستند. حال سوال این است که اگر از این مواد در تکیهگاهها استفاده شود نتایج و اثرات بر اندرکنش سیال - سازه و پدیده ضربه قوچ چگونه خواهد بود؟

¹ water hammer

² Fluid-Structure Interaction (FSI)

³ Viscoelastic (VE)

1-1- پدیده ضربه قوچ (چکش آبی)

در سیستم های آبرسانی مانند لوله ها، جریان سیال می تواند ماندگار یا غیر ماندگار باشد. جریان غیر ماندگار، جریانی است که خصوصیات آن (دبی، فشار و ...) با گذشت زمان تغییر می کند. جریان غیر ماندگاری که بین دو جریان ماندگار رخ می دهد، جریان میرا یا گذرا^۳ نامیده می شود. ضربه قوچ نیز جریان گذرایی است که در اثر تغییر ناگهانی در سرعت سیال مانند بستن سریع شیر یا توفق ناگهانی پمپ یا توربین رخ می دهد. توقف ناگهانی جریان، موجب افزایش قابل توجه فشار در سیستم لوله می شود. لذا ضربه قوچ شامل تغییرات زیاد و گذرای فشار می باشد که می تواند به سیستم لوله و اتصالات جانبی خسارت های زیادی را وارد نماید.

برای توضیح و درک بهتر پدیده ضربه قوچ، این مکانیزم در سیستم مخزن– لوله– شیر بررسی می-شود. شکل (1-1) را در نظر بگیرید. اگر سیال در لوله به طول L با سرعت v_0 در حالت ماندگار در جریان باشد و ناگهان در لحظه 0=t، شیر واقع در پایین دست بسته شود، سرعت در پشت شیر برابر صفر خواهد شد. بر اساس رابطه برنولی، در این لحظه فشار در پشت شیر به اندازه H افزایش می یابد و موجب انبساط لوله خواهد شد. 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 2 به سمت بالا دست منتقل و در لحظه 1-L به مخزن خواهد رسید به طوری که تمام سیال موجود در لوله تحت هد اضافی H قرار می گیرد (شکل(1-1-الف)). در این لحظه به دلیل عدم توانایی موج فشار در تغییر هد مخزن، شرایط نامتوازنی رخ خواهد داد، این امر باعث می شود تا جریان معکوسی در لوله با سرعت v_0 شکل گیرد تا وضعیت جریان را به حالت قبل بازگرداند. موج کاهش فشار در لحظه z_0

¹ steady

² unsteady

³ Transient fluid



شکل (۱-۱) اثرات ناشی از پدیده ضربه قوچ در لوله، در یک سیکل بعد از بسته شدن ناگهانی شیر

به شیر خواهد رسید (شکل 1-1-ب). پس از رسیدن موج کاهش فشار به شیر، از آنجایی که شیر بسته است و جریانی در آن شکل نمی گیرد، فشار در این لحظه دراین محل به (H-) خواهد رسید و موجب انقباض لوله خواهدشد. این موج فشار منفی با سرعت c به سمت بالادست حرکت خواهد کرد و در لحظه کرا اقباض لوله خواهدشد. این موج فشار منفی با سرعت c به سمت بالادست حرکت خواهد از و در لحظه کرد موجب انقباض لوله خواهد داد. این موج فشار منفی با سرعت c به سمت بالادست حرکت خواهد از موجب از موجب انقباض لوله خواهد داد. این موج فشار منفی با سرعت c به سمت بالادست حرکت خواهد از موجب از موجب انقباض لوله خواهد این موج فشار منفی با سرعت c به سمت بالادست حرکت خواهد از موجب از موجب از موجب از مواه از و در لحظه کرد محاوله خواهد رسید (شکل 1-1-ج). در این حالت چنانچه فشار درون لوله از فشار بخار کمتر شود، سیال تبخیر، پدیده کاویتاسیون و جدایی ستون مایع رخ خواهد داد. پس از رسیدن موج فشار منفی به مخزن دوباره شرایط نامتوازنی ایجاد خواهد شد و سیال در درون لوله با

¹Cavitation

² Column separation

سرعت V به سمت جلو جاری می شود. در نتیجه همزمان با انتشار موج به طرف پایین دست با سرعت c، لوله و جریان سیال به شرایط عادی بر می گردند. در زمانی که موج به شیر می رسد t=4L/c، شرایط دقیقا همانند زمان بسته شدن شیر است. این فرایند در هر 4L/c ثانیه تکرار می شود (می و ایند (پر ایند در مان بسته می است. این فرایند در هر 4L/c ثانیه تکرار می شود (مواد [978]]. در صورت وجود اصطکاک و سایر عوامل کاهنده مانند استفاده از مواد ویسکوالاستیک، با هر تکرار مقداری از فشار کاسته می شود تا به حالت ماند گار و ساکن برسد (شکل (2-1) را ببینید).



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

2-1- اندرکنش سیال-سازه در لوله ها

تغییرات فشار ناشی از پدیده ضربه قوچ می تواند در سیستم لوله نیروهایی به وجود بیاورد که منجر به تغییر شکل ها و ارتعاشات دینامیکی قابل توجه ای در سازه لوله و تکیهگاهها شود. جابهجاییهای به وجود آمده هم میتوانند در جهت جانبی و هم در جهت طولی ٔ رخ دهند. همچنین این تغییر شکلها نیز بر امواج فشاری درون لوله تاثیر می گذارند، لذا هم تغییرات سیال بر روی سازه و هم تغییرات سازه بر سیال تاثیرگذار میباشد. در این حالت به دلیل تداخلی که بین سیال و سازه برقرار است، نمی توان رفتار آنها را به طور جداگانه بررسی نمود. بنابراین بایستی معادلات حاکم بر حرکت سیال و

¹Longitudinal displacements

ارتعاشات سازه را به طور همزمان (کوپله)، با استفاده از روشهای مناسب حل نمود. یکی از مواردی که علاوه بر جداره لوله بر اندکنش سیال - سازه تاثیر می گذارد، تکیهگاههای سیستم لوله می باشند. تخمین زدن نیروهای وارده بر تکیهگاهها در اثر ضربه قوچ و بررسی پاسخ متقابل آنها بر سیستم، یکی از مسائل مهم در طراحی خطوط لوله میباشد. چراکه میتواند به طرح بهینه و کنترل خسارات ناشی از آن کمک شایانی نماید. میتوان آنالیز کوپله را بر اساس دو دیدگاه مورد بررسی قرار داد. 1-براساس تعداد معادلات به کار

رفته، جهت مدلسازی کوپلهی حل مسائل اندرکنش سیال- سازه در لولهها. 2- بر اساس مکانیزمهای اثرات رفتار سیال و سازه در آنالیز کوپله در لولهها.

1-2-1- انواع معادلات مدلسازی کوپله

در این دیدگاه تایسلینگ [Tijsseling 1996] روشهای کوپله حل مسایل FSI لولهها را با توجه به معادلات دیفرانسیلی که برای هر روش استفاده می شود به چهار دستهی: مدل دو معادله دیفرانسیل، مدل چهار معادله دیفرانسیل مرتبه اول، مدل شش معادله دیفرانسیل مرتبه اول و مدل چهارده معادله دیفرانسیل مرتبه اول تقسیم می کند.

در تمامی این مدلها، دو معادله مربوط به، روابط حاکم بر حرکت سیال (پیوستگی و مومنتوم) می-باشد. سایر معادلات نیز با توجه به اینکه در فضای دو بعدی یا سه بعدی در حال بررسی است، شامل معادلات ارتعاش محوری، پیچشی و خمشی سازه لوله میباشد. معادلات ارتعاش محوری و پیچشی که خود معادلات مرتبه دوم هستند، به دو معادله دیفرانسیل مرتبه اول و معادله خمشی سازه که از مرتبه چهار است، به چهار معادله دیفرانسیل مرتبه اول قابل تبدیل می باشند.

مدل دو معادله دیفرانسیل به نوعی یک روش نیمه کوپله محسوب می شود چراکه فقط دو معادله دیفرانسیل هیدرولیک حل می شوند و سپس مقادیر به دست آمده (فشارها و سرعتهای سیال)، برای معادلات سازهای مانند یک بارگذاری خارجی تلقی می گردند. این روش تحلیل به نام روش حل ضربه قوچ کلاسیک نیز معروف میباشد.

1-2-2- انواع مكانيزمهاي اثرات كوپله

در این دیدگاه، مکانیزمها با توجه به اثراتی که رفتار سیال بر سازهی لوله و اتصالات جانبی و برعکس می گذارد مطالعه می شود. در واقع، از این نظر که چگونه و چه مکانیزمهایی می تواند این اثرات تداخلی و کوپله را ایجاد نماید، مورد بررسی قرار می گیرد.

در بررسی های انجام شده بر روی پدیده تداخل سیال – سازه در لولهها، تاکنون سه مکانیزم عمده شناخته شده است[Wiggert & Tijsseling 2001]. 1-مکانیزم کوپله پواسن'، 2- مکانیزم کوپله اصطکاک'، 3- مکانیزم کوپله تقاطع (اتصال).

۱-۲-۲-۱ اثر تداخلی پواسن

اثر تداخلی پواسن به دلیل وجود نسبت پواسن مصالح لوله می باشد. در این حالت تغییر شکلهای شعاعی، با توجه به نسبت پواسن به تغییر شکلها و جابهجاییهای محوری تبدیل میشوند. در واقع این اثر در معادلات هیدرولیکی و سازهای با ترمهایی بر حسب نسبت پواسون ظاهر میشود، به نحوی که پارامترهای سازهای را در معادلات هیدرولیکی و پارامترهای هیدرولیکی را در معادلات سازهای وارد مینماید. بدیهی است مقدار اثر این کوپله، بستگی زیادی به نسبت پواسن مصالح بکار رفته در لوله (جدول (1-1)) دارد و در صورتی که این نسبت در این ترمها برابر صفر در نظر گرفته شود، این اثر تداخلی در نظر گرفته نمیشود. باید توجه نمود که این اثر میتواند در فشارها و تنشهای حاصله،

¹ Poisson coupling

² Friction coupling

³ Junction coupling

در بررسیهای سه بعدی، اگر برای یک شبکه لوله بخواهیم فقط کوپله پواسون را در نظر بگیریم، به طوری که تمام تقاطع ها، شیرها و اتصالات کاملا گیردار و اجازه حرکت از آنها گرفته شده باشد، کافی است معادله ارتعاش محوری با معادلات هیدرولیکی به صورت کوپله حل شود. سپس می توان با مقادیر همگرا شده سرعت و فشار و جابجاییهای محوری، هر یک از معادلات دیفرانسیلی ارتعاش خمشی یا پیچشی را به صورت مستقل حل کرد.

ضريب پواسن (۷)	مدول الاستيسيته (E)، N/m²	جنس لوله
0.30	(2.3-2.4)×10 ¹⁰	آزبست سيمان
0.15	$(4.73 \times 10^6) \sqrt{f_c'}$	بتن
0.25	(3-6)×10 ¹⁰	بتن پیش تنیده
0.46	8.0×10 ⁸	پلی اتیلن
0.34	1.03×10^{11}	برنج
0.28	(0.90-1.03) ×10 ¹¹	چدن
0.25	5.00×10 ¹¹	فايبر گلاس
0.30	2.07×10^{11}	فولاد
0.36	1.10×10 ¹¹	مس
0.45	(2.70-3.30) ×10 ⁹	PVC

جدول (۱-۱) مقادیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسن برای مصالح مورد استفاده در ساخت لولهها[کلانتری، 1390]

۱-۲-۲-۲ اثر تداخلی تقاطع (اتصال)

اگر سیستم لوله در محلهایی که سیال تغییر مومنتوم می دهد، مانند محل شیرها، تقاطعها، زانوییها، اریفیس ها، محل هایی که لوله تغییر قطر می دهد (ونتوری ها) و ...، به نحوی به زمین متصل شده باشند که امکان جابه جایی و حرکت آنها وجود داشته باشد، می تواند در اثر نوسانات فشار و سرعت ناشی از یک تحریک مکانیکی در سیستم، اثر تداخلی تقاطع (اتصال) ایجاد شود. در بعضی موارد این اثر کوپله بسیار جدی ر از اثر کوپله پواسن بوده و می تواند باعث تشدید تنشها و تخریب سازه گردد. اگر از تکیهگاههای گیردار در محل اتصلات و سیستم های جانبی استفاده شود، بدیهی است به دلیل عدم حرکت این محل ها، کوپله اتصالی به وجود نخواهد آمد. اما تنش های بسیار زیادی به تکیهگاه وارد خواهد شد و احتمال بروز خسارت های شدید وجود دارد. چنانچه از تکیهگاههای غلطکی، به نحوی که در مقابل حرکت محوری لوله هیچ نوع مقاومتی را از خود نشان ندهند استفاده شود، به دلیل جابهجاییهای محوری به وجود آمده ناشی از کوپله پواسن و نیروهای مرزی، می تواند به سیستم اوله و اتصالات، خسارات بسیاری را وارد نماید. چنانچه از تکیهگاههای الاستیک با سختی مناسب ام ماه به دلیل جابهجاییهای محوری به وجود آمده ناشی از کوپله پواسن و نیروهای مرزی، می تواند به سیستم اوله و اتصالات، خسارات بسیاری را وارد نماید. چنانچه از تکیهگاههای الاستیک با سختی مناسب ام به دلیل عدم خاصیت میراکنندگی این مواد، این قابلیت را ندارد که به میرایی سیستم کمک نماید. اما به دلیل عدم خاصیت میراکنندگی این مواد، این قابلیت را ندارد که به میرایی سیستم کمک نماید. بنابراین نیاز به تکیهگاهها و اتصلاتی از جنس موادی مانند ویسکوالاستیک احساس می شود تا بتوانند

۱-۲-۲-۳ اثر تداخلی اصطکاک

مکانیزم کوپله اصطکاکی، ناشی از اصطکاک سیال با جداره ی داخلی لوله میباشد. این اثر تداخلی نیز مانند کوپله پواسنی در شکل معادلات دیفرانسیلی هیدرولیکی و سازهای که استفاده میشود وجود دارد. عملکرد این اثر به نحوی است که موجب کاهش فشارها و تنشها در لوله میگردد (میرایی). به همین دلیل اکثر محققین، این اثر را در جهت اطمینان طراحی در نظر نمی گیرند. برای بررسی دقیق آن باید از یک مدل اصطکاک غیر ماندگار استفاده شود که در اینجا مورد نظر ما نیست. ۱-۲-۲-۴- تفاوت اثر تداخلی پواسن و اتصال

از دو منظر می توان تفاوت اثر تداخلی پواسن و اتصال را بررسی کرد. یکی از لحاظ علل ایجاد این اثرات، که در بخشهای (1-2-2-1-) و (1-2-2-2-) کاملا توضیح داده شد، و دیگری نحوهی به کار گیری و اعمال این اثرات تداخلی برای حل معادلات هیدرولیکی و سازهای است.

در مباحث تداخلی سیال-سازه، بایستی اثرات تداخلی در هر یک از معادلات دیفرانسیلی حاکم، شرایط مرزی و نیز شرایط اولیه بررسی شود. چراکه در حل یک پدیده و مدلسازی ریاضی آن، رسیدن به جواب درست مسأله، نیازمند شناخت درست روابط حاکم و شرایط مرزی و شرایط اولیه می باشد. اثر تداخلی پواسن، اثری است که خود را در معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیال و سازه ارایه شده، به صورت جملاتی که شامل نسبت پواسن هستند، نشان می دهد و به این طریق رفتار سیال و سازه را با یکدیگر مرتبط می سازد.

در حالی که اثر تداخلی اتصال، در شرایط مرزیای که برای تحلیل سازه یا سیال مورد استفاده قرار می گیرد ظاهر می شود. یعنی در شرایط مرزیای که برای تحلیل هیدرولیکی استفاده می شود باید از مقادیر سازهای مانند جابجایی ها، سرعت ها و شتاب های سازهای که در این نقاط اتفاق می افتد، با توجه به نوع شرط مرزی، استفاده شود و هم در شرایط مرزیای که برای تحلیل سازه مورد استفاده قرار می گیرد (بار گذاری ها)، از مقادیر پارامترهای هیدرولیکی استفاده شود. این بار گذاری های مرزی، ناشی از حاصل فشار سیال در سطح مقطع جریان، در مقاطع ورودی و خروجی حجم کنترل نظیر اتصالات می باشد که می تواند به صورت یک بار گذاری متمرکز بر سازه در نظر گرفته شود. این نیروهای متمرکز در فشارهای بالایی که غالباً در آغاز یک جریان غیرماند گار به وجود می آید مقادیر قابل توجهی خواهند داشت.

بنابراین برای یک تحلیل عددی، هم برای مدلسازی اثر کوپله پواسن و هم برای مدلسازی اثر کوپله اتصال، باید از یک الگوریتم تکرار برای همگرایی مقادیر در معادلات و مرزها استفاده شود.

3-1- مواد ويسكوالاستيك

پاسخ پلیمرها (مواد ویسکوالاستیک) که منظور، واکنش کرنش این مواد در قبال اعمال تنش میباشد، ناشی از ویژگی های ساختاری آنهاست. در این ساختار مخصوص، هر کدام از مولکولها مانند رشتههای انعطاف پذیری هستند که شکل آنها به طور پیوسته با تغییر انرژی عوض میشود. چنین ساختار پیچیده ای اثرات ویسکوالاستیک را تعیین می کند، در نتیجه، واکنش پلیمرها به نیروی اعمال شده، به طور کلی متفاوت از رفتار مواد الاستیک مانند استیل میباشد[1965, Ferry].

رفتار ویسکوالاستیک هم شامل خصوصیاتی از رفتار جامد الاستیک و هم مایع ویسکوز می باشد که بسته به ساختار مولکولی و ماهیت میکروساختار این مواد، می تواند مقدار هر یک از این رفتارها متفاوت باشد. پاسخ ویسکوالاستیک در انواع مصالح مانند: خاکها، بتن، غضروف، بافتهای زیستی و پلیمرها اتفاق می افتد[Wineman & Rajagopal, 2000].

برای درک بهتر پاسخ مواد ویسکوالاستیک خطی، رفتار این مواد تحت تنش پله ای σ_0 تا زمان 1^{h} وسپس حذف آن، در شکل (1-3-الف) نشان داده شده است (این تنش به گونه ای است که ارتعاشی در جسم ایجاد نمی شود). همانطوری که در این شکل مشاهده می شود پس از اعمال تنش در لحظه σ_0 *د*ر جسم ایجاد نمی شود). همانطوری که در این شکل مشاهده می شود پس از اعمال تنش در لحظه σ_0 *c جسم ایجاد نمی شود). همانطوری که در این شکل مشاهده می شود پس از آن نیز کرنش به طور \sigma_0 <i>c جسم ایجاد نمی شود*) مانند مواد جامد الاستیک رخ خواهد داد و پس از آن نیز کرنش به طور پیوسته، مانند مایع ویسکوز افزایش می یابد (ABC) که به آن کرنش تاخیری یا خزش نیز گفته می-

11





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

کرنش به طور آنی برگشته (CD) و مابقی در مواد جامد ویسکوالاستیک به طور کامل حذف خواهد شد در حالی که در مواد مایع ویسکوالاستیک علاوه بر حذف بخشی از کرنش، مقدار دیگری از کرنش در جسم باقی خواهد ماند.

همچنین می توان در شکل (1-3-ب) پاسخ ماده جامد و مایع ویسکوالاستیک را تحت اعمال کرنش پله ای $arepsilon_0$ (تست رهاسازی) مشاهده نمود.

این مواد به دلیل خصوصیات خاص فیزیکی و مکانیکی که از خود نشان می دهند می توانند در استهلاک انرژی و میرایی موثر و کارآمد باشند. برای بالا بردن میرایی در سازه ها، همیشه امکان استفاده از میراگر در خود سازه مرتعش نیست لذا روش دیگری که میتوان برای کنترل ارتعاش بکار برد، استفاده از مصالح میراکننده در تکیهگاهها می باشد. استهلاک انرژی ارتعاش سازه توسط تکیهگاه

ویسکوالاستیک یکی از روشهای کارآمد برای کاهش مقدار نیروهای ضربه ای شدید، صداهای حاصله و مشکلات مرتبط با خستگی می باشد. سختی تکیهگاه نقش مهمی در رفتار سیستم از جهت ایجاد صدا و قابلیت آن در استهلاک انرژی مخصوصاً در فرکانس های پایین دارد[Park, 2007]. جهت مدلسازی پاسخ این مواد، تا کنون مدلهای مکانیکی مختلفی ارائه شده است. در این مدلها رفتار الاستیک مصالح توسط فنر و رفتار ویسکوز، توسط میراگر مدل می شود. بنابراین می توان با ترکیب مناسبی از فنرها و میراگر ها، به مدلهای مکانیکی مناسبی جهت مدلسازی رفتار این مواد دست یافت. از جمه این مدلها می توان به مدل تعمیم یافته کلوین – ویت و ماکسول ٔ اشاره نمود. پس از قیاس ماده ویسکوالاستیک با مدل مکانیکی، بایستی رابطه دیفرانسیلی حاکم بر آن آرایش خاص میراگر و فنر را به دست آورد. مطالعات انجام شده نشان دادهاند که روابط ساختاری (تنش-کرنش) حاکم، در صورتی که مدل از تعداد نامحدودی المان فنر و میراگر تشکیل شده باشد، شامل جملاتی از مشتقات زمانی تنش و کرنش از مرتبه صفر تا تعداد المانها خواهد بود. به همین دلیل گرچه از دقت خوبی از نظر ریاضی برخوردارند، نمیتوانند به منظور استفادههای مهندسی ابزار مناسبی باشند. برای حل این مشکل، با استفاده از اصل روی هم گذاری بولتزمن و یا به کار گیری یک سری محاسبات طولانی شامل استفاده از تبدیل لایلاس، یک فرم انتگرالی معادل برای ارایه رابطه حاکم بین تنش و کرنش استخراج گردیده است که به تدریج مبنای اصلی بسیاری از روشهای عددی قرار گرفته است.

تحقیقات اخیر در رابطه با مطالعه کارایی این مدلها در مدلسازی رفتار مواد ویسکوالاستیک و شناسایی مدلهای جدید، منجر به ارایه مدلهایی مجازی (چون نمی توان ادعا کرد که معادل آرایش خاصی از فنرها و میراگرها هستند) گردیده است که شامل جملات با مشتقات کسری هستند. با

¹ Generalized Kelvin-Voigt Model

² Maxwell Model

³ Mechanical analog

استفاده از این مدلها میتوان با به کارگیری تعداد ثابتهای کمتری نسبت به مدلهای با درجات مشتق اعداد طبیعی، رفتار یک ماده ویسکوالاستیک را شبیه سازی نمود. در این پایاننامه برای توصیف رفتار مواد ویسکوالاستیک، از مدل جامع کلوین– ویت و از فرم انتگرالی روابط ساختاری حاکم استفاده میشود. سپس جهت حل عددی این انتگرالها، از روش تقریبی سازگار با روش اجزای محدود و خطوط مشخصه ارائه شده در مرجع [کرامت، 1389] استفاده خواهد شد.

4-1- اهداف و فرضيات پايان نامه

در این پایان نامه تاثیر بکار گیری تکیه گاههای ساخته شده از مواد ویسکوالاستیک در سیستم مخزن-لوله-شیر، که در آن پدیده ضربه قوچ به دلیل بستن شیر رخ می دهد مورد بررسی قرار می گیرد. از این تکیه گاه ها هم در محل شیر (تکیه گاه ویسکوالاستیک مرزی) و هم در طول لوله (تکیه گاه های ویسکوالاستیک میانی) استفاده می شود.

رابطه تنش تکیه گاه های ویسکوالاستیک مدلسازی شده با مدل جامع کلوین- ویت، به نحوی مناسب جهت اعمال در شرایط مرزی استخراج گردید.

معادلات حاکم بر حرکت سیال (پیوستگی و مونتوم) با استفاده از روش خطوط مشخصه (MOC) حل می شوند. معادله مرتبه دوم ارتعاش محوری، به نحوی که بتوان شرایط مرزی را بر حسب تنش اعمال کرد، برای لوله الاستیک و همچنین ویسکوالاستیک استخراج و سپس با استفاده از روش اجزای محدود (FEM) و در حوزه زمان حل گردید.

در واقع در این مطالعه نحوه پیاده سازی تکیه گاه های ویسکوالاستیک به عنوان شرط مرزی، در حل عددی معادله ارتعاش محوری به روش اجزای محدود و نتایج 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 می شود. چراکه

کوپله پواسن با توجه به نسبت پواسن مصالح لوله، تنش ها و تغییر شکلهای محوری در لوله ایجاد خواهد نمود که می تواند بر تکیهگاهها اثر بگذارد. کوپله اتصال نیز باید به دلیل استفاده از تکیهگاههای ویسکوالاستیک در مرز، که قابلیت ارتجاعی و جابه جایی دارند، در نظر گرفته شود.

در این پایان نامه تنها تنشها، تغییر شکلها و جابه جایی های محوری ناشی از تغیرات فشار مد نظر می باشد و فرض شده است تکیه گاه های میانی به نحوی طراحی شده اند که از لوله، نیروهای محوری به تکیه گاه و بالعکس اعمال می شود. از اثرات سختی خمشی، اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی عرضی صرفنظر می گردد. این فرضیات به عنوان فرضیات امواج با طول موجهای بلند خوانده می شوند. همچنین فرض شده است دمای محیط ثابت می باشد.

در استخراج معادلات دیفرانسیلی حاکم، لوله به صورت جدار نازک، سیال درون لوله نیز به صورت تراکم ناپذیر، نیوتنی و الاستیک خطی فرض می شود. کرنشهای ایجاد شده در اثر تداخل سیال – سازه، کوچک بوده و با استفاده از تئوری کرنشهای بسیار کوچک محاسبه می شوند.

5-1- فصل بندى پايان نامه

پس از بیان مقدماتی در رابطه با ضربه قوچ و علل به وجود آمدن آن، اندرکنش سیال – سازه و مکانیزمهای آن، خصوصیات رفتار مواد ویسکوالاستیک و بیان اهداف تحقیق حاضر در این فصل، در فصلهای آتی به مباحث زیر پرداخته می شود.

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 زمانیکه در خود سازه اصلی و چه زمانیکه در سازههای مرتبط با سازه اصلی مانند تکیهگاهها مورد استفاده قرار می گیرند بررسی میشود تا در نهایت جایگاه تحقیق حاضر دراین بین مشخص شود.

¹ Infinitesimal strain theory

در فصل سوم مدلهای مکانیکی مواد ویسکوالاستیک معرفی و روابط ساختاری آنها بر حسب تابع خزش و تابع رهاسازی ارائه می شود و مطالبی پیرامون پارامترهای توابع خزش و رهاسازی و نحوه بدست آوردن آنها بیان خواهد شد. سپس معادلات حاکم هیدرولیکی و سازه ای با در نظر گرفتن اثر تداخلی سیال – سازه و متناسب با اهداف این تحقیق استخراج می گردد. سپس شرایط اولیه و شرایط مرزی مورد نیاز این پایان نامه به عنوان بخش تکمیلی مدل ریاضی توضیح داده می شود.

در فصل چهارم روش حل عددی روابط انتگرالی ایجاد شده در معادلات به دلیل رفتار مواد ویسکوالاستیک بیان می شود. سپس نحوه حل عددی معادلات حاکم به روش خطوط مشخصه-اجزای محدود (MOC-FEM) و نحوه پیاده سازی شرایط مرزی حاکم بر مسئله توضیح داده خواهد شد. در واقع در این پایان نامه معادلات هیدرولیکی به روش خطوط مشخصه و معادلات سازه ای به روش اجزای محدود حل می شوند. در پایان این فصل نیز الگوریتم کلی حل عددی تشریح می شود.

در فصل پنجم ابتدا با حل مثالی، روش ارائه شده جهت پیاده سازی شرط مرزی تکیهگاه ویسکوالاستیک مورد صحت سنجی قرار می گیرد و اثرات آن بر ارتعاشات و تنشها در میله و تکیهگاه بررسی می شود. سپس در مثالی دیگر تاثیر پارامترهای تابع رهاسازی مواد ویسکوالاستیک بر ارتعاش محوری میله تحت دو بار محرک پلهای ثابت و سینوسی مورد ارزیابی قرار می گیرد. در نهایت نتایج مربوط به اثرات تکیهگاه ویسکوالاستیک بکار رفته در سیستم لوله، بر اندرکنش سیال - سازه در پدیده ضربه قوچ ارائه می شود.

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

¹Creep function

² Relaxation function

فصل دوم



1-2- هيدروليک جريان ميرا در لوله[کلانتری 1390 و کرامت 1384]

به طور کل بر روی هیدرولیک جریانهای میرا برای اولین بار نیوتن و لاگرانژ در قرن 17، با تحقیق دربارهٔ نحـوهٔ انتشارامـواج صوتی در هوا و انتشار امواج در آبهای کم عمق، به مطالعه پرداختند. بعدها در سال 1866 وبر ابه مطالعه جریان سیال غیر قابل تراکم در لوله های کشسان پرداخت و آزمایشاتی جهت تعیین سرعت امواج فشاری انجام داد . همچنین او معادلات پیوستگی و اندازه حرکت که اساس مطالعات جریانهای غیرماندگار هستند را ارائه نمود. . ماری^¹ نیز آزمایشات متعددی جهت تعیین سرعت موج فشاری انجام داد و دریافت که اولاً سرعت موج مستقل از دامنهٔ امواج فشاری است و ثانیاً سرعت موج با ضريب الاستيسيته جدار لوله متناسب است. سه سال بعد در سال 1878، كورت برگ، سرعت موج را با توجه به کشسان بودن جدارهی لوله و کشسانی سیال ارائه داد. گرومیکا [Gromeka 1883] در بررسی سرعت انتشار امواج ضربه قوچ در لوله های الاستیک، برای اولین بار افتهای اصطکاکی را به هنگام تحلیل ضربه قوچ مد نظر قرار داد. او فرض کرد که سیال غیر قابل تراکم است و افتهای اصطکاکی با سرعت رابطه مستقیم دارند. در سال 1897 ژوکوفسکی بر اساس مطالعات نظری و آزمایشگاهی که انجام داد ، گزارشی درمورد تئوری اساسی ضربه قوچ منتشر نمود. او رابطه ای جهت سرعت انتشار موج فشاری بدست آورد که در آن کشسان بودن سیال و جدار لوله در نظر گرفته شده بود. همچنین او با استفاده از معادلات پیوستگی و اندازه حرکت، رابطه ای ما بین کاهش سرعت و افزایش فشار ناشی از آن بدست آورد. وی همچنین تحقیقاتی درباره اثرات سرعت بسته شدن یک شیر انجام داد و دریافت که افزایش فشار در لوله به زمان بسته شدن شیر ارتباط دارد.

¹ Newton

² lagrange

³Weber

⁴ Marey

⁵ Korteweg

⁶ Joukowsky

آلیوی در سال 1902 تئوری عمومی ضربه قوچ خود را منتشر کرد. معادله اندازه حرکتی که او بدست آورد از آنچه کورتوگ بدست آورده بود، دقت بیشتری داشت. گیبسون ۲۰ براساس تئوری ژوکوفسکی رسالهای ارائه کرد که برای اولین بار در تحلیل جریان، افتهای اصطکاکی بصورت غیرخطی در نظر گرفته شده بودند . وود ۲ روشی ترسیمی – تحلیلی جهت تحلیل جریان ضربه قوچ ارائه داد. لووی ۴ هم در سال 1928 روش ترسیمی مشابهی ارائه نمود و مسألهٔ تشدید حاصل از عملکرد تناوبی شیرها و همچنین کاهش فشار ناشی از باز شدن آهسته شیرها را مورد بررسی قرار داد. وی در تحلیل خود تلفات اصطکاکی را با اضافه کردن جملهٔ مربوط به اصطکاک در معادلات دیفرانسیل جزئی در نظر گرفت. برگرون[°] روش ترسیمی را برای تعیین شرایط در مقاطع میانی خط لوله بسط و گسترش داد. وی اولین کسی بود که در تحلیل ترسیمی خود تلفات اصطکاکی را در نظر گرفت. در سال 1933 کنفرانس مشتر کی توسط انجمن مهندسین راه و ساختمان آمریکا^۲ و انجمن مهندسین مکانیک آمریکا^۷ بر گزار شد که در آن رساله های متعددی در مورد تحلیل ضربهٔ قوچ در خطوط لولهٔ

از آن سال تا سال 1960 حاصل مطالعات بر روی پدیه ضربه قوچ و جریان میرا در قالب مقالات و کتابهای متعددی ارائه گردید تا اینکه در سال 1966، رویس [Ruus 1966] برای اولین بار روش بسته شدن بهینه شیر[^] را با مطالعه بر روی مراحل بسته شدن شیرهای توربین هیدرولیکی ارائه نمود. گری [Garey 1953] در بررسی افت انرژی در پدیده ضربه قوچ، روش مشخصه را در تحلیل

¹ Allievi

- ² Gibson
- ³ Wood
- ⁴ Lowy
- ⁵ Bergeron
- ⁶ ASCE
- ⁷ ASME

⁸ Optimum Valve Closure

کامپیوتری بکار برد. لای و استریتر [Streeter & Lai 1963] 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 می تواند نتایج ضربه قوچ کلاسیک را تغییر دهد. این چهار عامل عبارتند از: 1-اصطکاک غیر ماندگار (UF)، 2-جدایی ستون مایع (CS)، 3-اندرکنش سیال – سازه (FSI) و 4- ویسکوالاستیسیته (VE). دو مورد اول در این تحقیق مورد نظر نمی باشد اما اندرکنش سیال و سازه و اثر مواد ویسکوالاستیک زمانی که در دیواره لوله و تکیهگاه ها استفاده شوند مورد بررسی قرار می گیرد، لذا به طور مختصر مطالبی در رابطه با تاریخچه و مطالعات انجام شده در زمینه FSI و FSI و VE در سیستم لوله اشاره خواهد شد.

2-2- اثر تداخلي سيال و سازه در لوله [كلانترى 1390 و كرامت 1384]

بررسی اندرکنش بین سیال و سازه در سیستم های خط لوله تقریبا از نیمه دوم قرن نوزدهم آغاز و به دلیل ابعاد گسترده آن تا کنون نیز ادامه دارد. بررسی این مطالعات یک سیر تحول و پیشرفت از امواج محوری و حرکت یک بعدی لوله به معادلات چند بعدی موج و روش اجزا محدود⁴ را نشان می دهد. در بسیاری از منابع از جمله در کتاب جریانهای میرای وایلی و استریتر، به تاثیر جابجایی های طولی و محیطی لوله در کاهش سرعت موج فشاری اشاره شده است. این کاهش در تحلیل مسائل جریان گذرا در خط لوله به صورت سنتی و بدون در نظر گرفتن علت آن، یعنی حرکت لوله در نظر گرفته می شد. تداخل سیال- سازه در شبکه لولهها اولین بار توسط اسکالاک⁴ در سال 1956 با ارائه معادلات تداخلی

¹ Finite Elements Method

² Skalak

حاکم بر ضربه قوچ مطرح گردید. اسکالاک ، تورلی و ویلیامز ، معادلات امواج طولی را برای سیال و لوله بصورت کوپله در نظر گرفتند، تا بارهای ناشی از جریان میرای ایجاد شده در لوله های مستقیم را تعیین و بتوانند امواج کششی ایجاد شده در بدنهٔ 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.

ریگتز [D'souza & Oldenburger, 1964]، دسوزا و اولدنبورگر [Jones & Wood, 1972] و جونز و وود [Jones & Wood, 1972] اثرات ارتعاشات و حرکات محوری ناشی از یک جریان میرا در یک لوله تنها را بر ایجاد موج فشار، مورد مطالعه قرار دادند. وود [wood, 1968 and 1969] جریان غیرماندگار سیال را با یک مدل یک درجه آزادی جرم - فنر، بصورت کوپله در نظر گرفت و توانست مهمترین تداخل سیال و سازهٔ لوله را اثبات کند. این تحلیل همچنین برای ارتعاش سیستم های لوله یک درجه آزادی صحیح است. همچنین وی به این نتیجه رسید، زمانی که بخش های ضروری سیستم به طور کامل مهار نشده باشند، می تواند تفاوت های شدیدی (تغییرات دامنه و فرکانس) در نتایج، نسبت به تحلیل کلاسیک به وجود آورد.

ویلکینسون [Wilkinson, 1978] روشی برای تخمین پاسخ لرزه ای سیستم عمومی لوله ارائه کرد که در آن از یک ماتریس انتقال استفاده شده است. روابطی که وی مورد استفاده قرار داد شامل پنج خانواده کوپله (یکی در سیال و چهار رابطه در سازهٔ لوله) بودند.

اولسن^۳ روشی را ابداع نمود که در آن کل سیستم با یک الگوریتم اجزا محدود تحلیل می شود. وی لوله و سیال درون آن را بصورت المانهای جامد^ئ با ارتباطهای مناسب در نظر گرفت. هتفیلد و

¹ Thorely

² Williams

³Olson

⁴ Solid Elements

همکاران^۱، با توسعه روش سنتز اجزا^۲ به مطالعه امواج فشاری و پاسخ های سازه ای سیستم لوله پرداختند. در این روش در ابتدا فرکانس طبیعی و شکل مودهای سیستم لوله تعیین می شوند و سپس این مودها درتعدیل کردن تحلیل هیدرودینامیکی سیال مورد استفاده قرار می گیرند. از روش مشخصه برای جریان غیرماندگار و از روش مدال برای تحلیل سازهٔ لوله استفاده شده است. فایده این روش نسبت به روشهای قبلی، جداکردن تحلیل به گامهای مختلف است.

ویگرت و همکاران [Wiggert et.al, 1987] برای حل معادلات سیال و سازه به صورت همزمان، یک روش مشخصه ارائه نمودند. هرچند در این روش محدودیتهایی در معیارهای ریاضی و دینامیک سازه وجود داشت، اما فشار سیال و تنش محوری، برش و خمش لوله، همگی روی خطوط مشخصه قابل تعريف بودند. لوويج و تيسلينگ [Lavooij & Tijsseling, 1990] تداخل سيال و لوله را با بكار بردن تئوری ضربهٔ قوچ برای سیال و تئوری خمش تیموشنکو برای المان لوله، مدل کردند و یک پروسه مرکب از روش مشخصه (MOC) و اجزاء محدود (FEM) ارائه گردید. معادلات هیدرولیکی با MOC و معادلات لرزهای سازه با FEM تحلیل شدند. برگانت و تیسلینگ [Bergant & Tijsseling 2001] در مقالهای با استفاده از روش مشخصه (MOC) برای حل معادلات هیدرولیکی و سازه ای، تداخل سیال و سازه را بصورت کوپله در نظر گرفتند و پارامترهای مؤثر در میرایی موج ضربه قوچ را مورد بررسی قراردادند. در این مقاله اثرات اصطکاک غیر ماندگار ، کاویتاسیون و تداخل سیال و سازهٔ لوله ، مورد مطالعه قرار گرفته اند و تأثیر هر کدام بر کل سیستم با حل چند مثال نشان داده شده است. این روش بدلیل اینکه در پاره ای از مسائل نیاز به اینترپولاسیون عددی دارد، دارای خطا است. دو سال بعد، تیسلینگ در مقالهای دیگر [Tijsseling, 2003]، با ارائه حل دقیق برای سیستم چهار معادلهای ارتعاش محوري لوله-سيال، روشي جهت دقت بخشيدن به حل فوق الذكر ارائه كرده است. در اينجا هر دو اثر تداخلی پواسن و اتصال به دقت مورد بررسی قرار گرفته اند. حل دقیق ارائه شده نشان داد

¹ Hatfield et al.

² Component Synthesis
که استفاده از روش های عددی معمولاً دارای خطای قابل توجهی میباشد و برای کاهش خطاها باید المان ها بسیار کوچک انتخاب شوند که این زمان محاسبه را بسیار بالا می برد. راکید و ماتوس در مقالهٔ خود [Rachid & Mattos, 2002] تداخل سیال - سازه را در سیستم های لولهٔ غیر الاستیک مدلسازی کردند. در این مقاله یک روش عمومی و سیستماتیک برای درنظر گرفتن انواع مختلف رفتارهای مصالح لوله در تحلیل سیال -سازه ارائه شده است.

احمدی و کرامت با ارائه مقالهای [Ahmadi & 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 پمپ ها، شاخه ها و شیرهایی که امکان جابهجایی داشتند را برای حل معادلات هیدرولیکی و سازهای با استفاده از روش MOC-FEM، ارائه نمودند. نتایج این تحقیق به درک بهتر مهندسین در رابطه با اثرات کوپله اتصال کمک شاپانی می نماید.

هایسبروک و تایسلینگ در مقالهای [Heinsbroek & Tijsseling 1994]، اثرات سختی تکیه گاه الاستیک بر فشارهای سیال و تنشهای حاصله در سیستم لوله را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند به دلیل افزایش اثرات تداخلی بین سیال و سازه در سیستمهای با سختی کمتر تکیه گاهی، استفاده از معادلات کلاسیک ضربه قوچ و آنالیز غیر کوپله منجر به جوابهای غیرقابل قبول خواهد شد. بررسی نتایج استفاده از انواع سختیهای تکیه گاهی نشان داد که اگر سختی تکیه گاه کمتر از سختی یک متر لوله باشد بایستی از مدل آنالیز تداخلی استفاده شود و با انعطاف پذیرتر شدن سیستم، میزان تنشها در سیستم لوله افزوده شده ولی نیروهای وارده بر تکیه گاهها کاهش خواهد یافت. همچنین در این مقاله مباحث مهمی در زمینه رابطه سختی تکیه گاهی با فرکانس اصلی امواج فشاری، زمان آنالیز و واکنشهای تکیه گاهی ارائه شده است. تایسلینگ و واردی فشاری، زمان آنالیز و واکنشهای تکیه گاهی ارائه شده است. تایسلینگ و واردی فشاری، زمان آنالیز و واکنشهای تکیه گاهی ارائه شده است. تایسلینگ و واردی فشاری، زمان آنالیز می اله جامعی را انجام دادند که در آن اطلاعات مفیدی در زمینه فرکانس اصلی ضربه قوچ، فرکانس اصلی امواج تنش و اهمیت نوع تکیه گاهها در رفتار دینامیکی

سیستمهای لوله میباشد.

معادلات تداخل سیال – سازه به طور کل در دو حوزه زمان و فرکانس بررسی و حل می شوند که برای هر حالت می توان مزایای و معایبی را نام برد. حل در بازه زمان از آنجایی که این قابلیت را فراهم می نماید که به وسیله آن میتوان انواع مختلف سیستمهای لوله (شاخه ای، حلقوی با انواع شرایط مرزی) را تحلیل کرد، اهمیت دارد. حل عددی معادلات در این روش، نیازمند استفاده از میانیابی جهت انتقال داده های هیدرولیکی به معادلات سازه و بالعکس میباشد که این امر خود باعث کند شدن این مدلها میشود [Wiggert & Tijsseling, 2001]. حل در حوزه فرکانس برای شرایط سیستم لوله و شرایط مرزی بسیار ساده امکان پذیر است. در این روش معادلات حاکم با روش جداسازی متغیرها و سپس استفاده از سریهای فوریه جهت تعیین تابع مناسب که بتواند شرایط مرزی را ارضا کند امکان پذیر است. [Haberman, 2004].

مقاله هینسبروک [Heinsbroek, 1997] یکی از مقالات اساسی در زمینه آنالیز زمانی اثرات تداخلی سیال-سازه در شبکههای لوله میباشد. در این مقاله روش خطوط مشخصه جهت حل معادلات هیدرولیک و روش اجزای محدود برای حل معادلات سازه بکارگرفته شده است و مقایسهای بین استفاده از این روش و روش تمام خطوط مشخصه نیز صورت گرفته است.

در زمنیه آنالیز فرکانسی تداخل سیال- سازه کارهای مهمی انجام شده است، از جمله تایسلینگ [Tijsseling, 2003] که در آن 4 معادله دیفرانسیل حاکم بر پدیده FSI در یک لوله مستقیم به صورت تحلیلی حل شدهاند و لی و همکاران [Li et.al, 2003] که به جای استفاده از روش خطوط مشخصه از روشی بر پایه حل دالامبر در معادلات موج برای حل تحلیلی استفاده کردند. یانگ و همکاران نیز در تحقیق مشابهی [Yang et.al, 2004] با استفاده از روش ماتریس انتقال¹ حل تحلیلی برای معادلات تداخلی سیال- سازه در لوله ارائه دادند. در این تحقیق برای یک لوله به طول 20 متر

¹ Transform Matrix Method

نشان داده شده است که اثر تداخلی اتصال نسبت به اثر تداخلی پواسن بسیار مهمتر است. در سالهای اخیر توجه بیشتر محقیقین در زمینه ضربه قوچ به بررسی جداگانه و یا توام هریک از پارامترهای موثر در امواج فشاری چکش آبی مانند اصطکاک غیر ماندگار، کاویتاسیون، اندرکنش سیال-سازه، نشت و اثر رفتار ویسکوالاستیک در سیستم لوله، معطوف شده است که در این بین می-توان به مقاله [Bergant et.al, 2008] اشاره کرد.

3-2- كاربرد مواد ويسكوالاستيك در سيستم لوله

توصیف رفتار ویسکوالاستیک یک جسم، معمولا بر اساس دو روش صورت می گیرد. روش اول با قیاس مکانیکی مرتبط است. در مدلهای این گروه، رفتار مواد، با ترکیبی از المان های مکانیکی مانند فنرها و میراگرها مدل می شود، که بسته به نوع ترکیب های این المانها، می توانند به طور مناسب و یا ضعیف رفتار ویسکوالاستیک واقعی سیستم را نشان دهند. مدلهای روش دوم، بر اساس نظریه های مولکولی و کاهش حرکات ناشی از شکل مولکولها در محیط ویسکوز استوار است [Aklonis et.al, 1972]. از بین این دو روش، روش اول اغلب در کارهای مهندسی مورد استفاده قرار می گیرد.

فرانک و سیلر^۱ در 1983و لی شنگ و وایلی^۲ در سال 1990 از جمله کسانی بودند که نخستین بار به مطالعه اثرات بکار گیری مواد ویسکوالاستیک در دیواره لوله پرداختند. آنها در مقالات خود روابطی را برای سرعت موج فشار در حوزه زمان و فرکانس ارائه دادند. پزینا و ساندورا^۳ در سال 1995 در بررسی پدیده ضربه قوچ در خط لوله پلیمری، از مدل *N* المان کلوین –ویت که در آن رفتار ویسکوالاستیک به وسیله مجموعهای از فنرها و میراگرها شبیه سازی میشود، استفاده نمودند. در سال 2003،

¹ Franke G. and Seyler F

²Lisheng S. and Wylie E. B

³ Pezzinga G., Scandura P.

مایتسک و چرزلسکی'، آزمایشاتی را جهت تعیین اثرات ویسکوالاستیسیته بر سرعت موج فشار در لوله های پلی اتیلن MDPE انجام دادند.

کوواس و همکاران [Covas et.al, 2004 and 2005] ، تشریح روش مدلسازی رفتار ویسکوالاستیک دیواره لوله در معادلات ضربه قوچ، با استفاده از روش MOC را ارائه دادند. همچنین آنها در این تحقیق اثر توام اصطکاک غیر ماندگار و ویسکوالاستیک را هم بررسی نمودند. در این کارها اثر کرنشهای محیطی دیواره لوله با استفاده از المانهای کلوین - ویت مدلسازی شده است. معادلات ارایه شده در اینجا، دو معادله پیوستگی و مومنتم سیال میباشند که اثر رفتار ویسکوالاستیک همانند یک ترم چشمه ای' در معادله پیوستگی وارد می گردد. البته ضعف عمده این روش این است که در ان، توابع خزش تطابقی باید با انجام یک آزمایش روی شبکه لوله، کالیبره شوند. کاترین در مقالهای [Katarzyna, 2006] به بررسی سوالات و مشکلات مدل ویسکوالاستیک پدیده ضربه قوچ که تا آن سال ارائه شده بود پرداخت. دو سال بعد سوارس و همکاران با انجام تحقیقاتی [Soares et.al, 2008]، روش ارائه شده توسط کوواس و همکاران را تصحیح و تکمیل نمودند. نتیجه گیری نهایی آنها مبنی بر قابل صرف نظر بودن اثرات اصطکاک غیر ماندگار در مقابل اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله تا حدی توسط [Duan et.al, 2010] تایید شد. در تحقیقات کاملتری که توسط سوارس و همکاران [Soares et.al, 2009] و كرامت و همكاران [Keramat et.al, 2010] انجام شده است، اثر كاويتاسيون 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 تغییر شکلهای محوری که به علت وجود نسبت پواسن مواد، اجتناب ناپذیر هستند، به کلی صرفنظر شده است، بنابراین اثرات تداخلی در نظر گرفته نشده است.

آکایب و بهرار در مقالهای [Achouyab & Bahrar, 2011] به مطالعه عددی اثرات توام ویسکو-

¹ Mitosek M. and Chorzelski M

² Source term

الاستیسیته (VE) و تداخل سیال 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 بحث تداخل سیال-سازه صرف نظر نمودند. در تحقیقی کاملتر و برای اولین بار، کرامت و همکاران [2012 (keramat et.al, 2012) اثر تداخلی سیال – سازه را با در نظر گرفتن کوپله اتصال و پواسن در لوله های ویسکوالاستیک مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله رفتار ویسکوالاستیک مواد با مدل عمیم یافته کرفتن کوپله اتصال و پواسن در لوله های ویسکوالاستیک مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله رفتار ویسکوالاستیک مواد با مدل بعریم یافته کلوین – ویت قیاس و از فرم انتگرالی روابط ساختاری آن مدل، استفاده شده است. آنها روش از استخراج معادلات با در نظر گرفتن اثرات تغییرشکلهای محوری، به دو روش تماما MOC ورش روش آوش روش آوش روش تماما MOC وله روش تماما MOC و

در تمام تحقیقات ذکر شده اثر مواد ویسکوالاستیک در دیواره لوله مورد بررسی قرار گرفته است. اما همواره استفاده از مواد ویسکوالاستیک در خود سازه اصلی به دلایل فنی و اقتصادی امکان پذیر نمی-باشد. لذا می توان به عنوان روشی جایگزین از این مواد به دلیل خاصیتشان در استهلاک انرژی و ارتعاشات سازه ای، در تکیهگاههای سیستم لوله و سازههای جانبی آن مانند شیرها، پمپ ها، زانویی ها و ... استفاده نمود. در این خصوص مقالات بسیار اندکی تاکنون ارائه شده است. در این بین تنها میتوان به مقاله [Stoessel et.al, 1988] اشاره نمود که متاسفانه اطلاعات دقیق تری در مورد روش تحقیق و نتایج این مطالعه در دست نیست.

اما عملکرد تکیهگاه ویسکوالاستیک در بخش های دیگر مهندسی بررسی شده است. به عنوان مثال می توان در مهندسی راه آهن، به بررسی تاثیر تکیهگاههای ویسکوالاستیکی که به صورت پریودیک در زیر ریلهای راه آهن قرار گرفتهاند، بر تغییر شکلهای ناشی از عبور قطار ریلی پرسرعت [Vostroukhov & Metrikine, 2003] و در مهندسی مکانیک، به بررسی پاسخ ماشین آلات چرخشی با وجود تکیهگاههای غلطکی ویسکوالاستیک [Priswell et.al, 2006] اشاره نمود. همچنین در مهندسی پزشکی جهت بررسی فشار خون [Moireau et.al, 2012] عملکرد این مواد در تکیهگاه مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله به دلیل بروز رفتار ویسکوالاستیک، از دندههایی که شاهر گهای اصلی بدن بر آنها تکیه دارند، به صورت تکیه گاههای ویسکوالاستیک مدلسازی شدهاند و اندر کنش بین سیال (خون) و سازه (رگها و دندهها) مورد بررسی قرار گرفته است. در تمام این مطالعات تکیهگاه ويسكوالاستيك با استفاده از تك المان كلوين – ويت شبيه سازى شده است. در تحقيق كاملترى كه در بررسی اثرات تکیهگاه ویسکوالاستیک بر کاهش صدا و پاسخ ماشین آلات چرخشی ارائه گردید[Tillema, 2003]، از مدل ماکسول تعمیم یافته جهت مدلسازی رفتار تکیهگاه ویسکوالاستیک استفاده شد و روش اجزای محدود برای حل عددی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در این مقاله در زمینه مشخصات مکانیکی مواد ویسکوالاستیک، بررسی های آزمایشگاهیای نیز انجام شده است. در زمینه ارتعاش تیر با تکیه گاه ویسکوالاستیک، چندین محقق مطالعاتی را انجام دادهاند. در این میان میتوان به بررسی اثرات تکیهگاه ویسکوالاستیک بر انتشار صوت از صفحه مستطیلی با استفاده از روش انرژی کرنش مودال (MSE) توسط فان و کیم [Fan & kim, 1996]، بررسی ارتعاش اجباری در تیری با تكيه گاه ويسكوالاستيك با تحليل حالت مختلط نرمال توسط فان و همكاران [Fan et.al, 1997] اشاره نمود. در این دو مقاله، تکیه گاه توسط یک فنر خطی و یک فنر پیچشی مدل شده است. همچنین می توان به بررسی دینامیکی ارتعاش محوری تیر ویسکوالاستیک در معرض کشش محوری با استفاده از روش المان طيفي (SEM) توسط لي [Lee & Oh, 2005]، بررسي تاثير خصوصيات تكيه گاه ويسكوالاستيك بر انتشار موج در حوزه فركانس و ارائه روشهايي جهت تنظيم بهينه سختي تكيه كاه توسط [Park, 2007] و به مطالعه پايداري ديناميكي تير الاستيك با تكيه كاه ويسكوالاستيك توسط [Majorana & Pomaro, 2011] اشاره نمود. اما نكته قابل توجه اين است كه بررسي مواد ویسکوالاستیک و مشخصات آن در این مطالعات بیشتر در حوزه فرکانس و با استفاده از مدلهای مکانیکی ساده انجام شده است که غالبا قابلیت تعمیم به مسائل پیچیده تر را ندارند. در زمینه حل عددی مواد ویسکوالاستیک در حوزه زمان که بر پایه معادلات حاکم دیفرانسیلی-

۲٨

انتگرالی می باشد چندین کار از جمله، ارائه الگوریتمی کارآمد برای تقریب مشتقات زمانی و محاسبه انتگرال کانولوشن جهت ساده سازی محاسبات در مقاله [Mikhailenko et.al, 2003] و بسط سری دریشله تابع خزش (کرنش پیوسته) در مقاله [Chazal & Pitti, 2009] انجام شده است. همچنین توسط کرامت و احمدی [Chazal & Ahmadi, 2012] جهت محاسبه انتگرال کانولوشن ناشی از رفتار ویسکوالاستیک، تقریب عددیی کارآمد بر اساس مقادیری از گام زمانی فعلی و قبلی به منظور پیاده سازی آسان روش اجزای محدود در حوزه زمان ارائه شده است.

در پایان نامه حاضر برای اولین بار اثرات تکیه گاه ویسکوالاستیک مدلسازی شده با مدل جامع کلوین -ویت، بر اندرکنش سیال و سازه در سیستم لوله به صورت عددی مورد بررسی قرار می گیرد. در اینجا از فرم انتگرالی روابط ساختاری حاکم بر مدل مکانیکی کلوین-ویت تعمیم یافته استفاده شده است. در واقع در این مطالعه معادله شرط مرزی تکیه گاه ویسکوالاستیک استخراج و معادلات حاکم جهت پیاده سازی این شرط مرزی با در نظر گرفتن هر دو کوپله اتصال و پواسن اصلاح گردیدند. سپس معادلات هیدرولیکی به روش خطوط مشخصه (MOC) و معادلات سازه ای به روش اجزای محدود (FEM) در حوزه زمان حل می شوند و اثرات این نوع تکیه گاهها بر نتایج پدیده ضربه قوچ مورد بررسی قرار می گیرد.

فصل سوم



1-3- معادلات حاكم

برای بررسی رفتار یک سیستم ابتدا بایستی عناصر تاثیرگذار بر آن مجموعه را شناخت و سپس روابط حاکم بر آنها را بدست آورد. در اینجا، سیستم لوله با تکیهگاههای ویسکوالاستیک که در آن پدیده ضربه قوچ 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 می شود. بنابراین بایستی معادلات حاکم بر حرکت سیال (پیوستگی و مومنتوم)، ارتعاش سازه و شرایط مرزی، با در نظر گرفتن اثرات مواد ویسکوالاستیک بکار رفته در تکیهگاه و لوله و اثرات تداخلی استخراج گردد.

جهت مدلسازی تکیهگاه 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. در حالتی که بررسی اثر تداخلی اتصال در یک سیستم لوله 2 (3 بعدی) مورد نظر باشد، بررسی ارتعاشات خمشی (خمشی و پیچشی) نیز ضروری است. اما از آنجایی که در این پایان نامه، تنها بررسی اثرات اندرکنشی لولهها به صورت محوری مورد نظر است، از ارایه معادلات ارتعاش خمشی و پیچشی صرفنظر شده است.

3-1-1- مدلهای مکانیکی مواد ویسکوالاستیک

پاسخ مواد ویسکوالاستیک خطی هم شامل جنبههایی از پاسخ مکانیکی مواد جامد الاستیک خطی و هم مایعات ویسکوز خطی میباشد. این رفتار را میتوان در شکل (1-3) مشاهده نمود. رفتار الاستیک مصالح توسط فنرخطی و رفتار ویسکوز توسط میراگر مدل میشود. در فنر خطی رابطه نیرو-تغییرشکل به صورت $F_{\rm s} = k \, u_s$ می باشد. که در آن $F_{\rm s}$ نیرو در فنر، u_s جابه جایی و K ثابت فنر است. c میراگر ویسکوز رابطه نیرو - تغییر شکل به صورت $F_{\rm D}=c\dot{u}_D$ است که در آن $F_{\rm D}$ نیرو در میراگر، c پارامتری بر حسب ویسکوزیته میراگر و \dot{u} مشتق جابهجایی نسبت به زمان می باشد. بنابراین می توان با ترکیبی مناسب از فنرها و میراگرها به مدلسازی رفتار مواد ویسکوالاستیک پرداخت. دو ترکیب ساده از فنرها و میراگر، به مدلهای کلوین - ویت (شکل 3-1- الف) و مکسول (شکل3-1-ب) معروف می باشند.



شکل (۱-۳) مدل مکانیکی ،الف) کلوین – ویت، ب) مکسول

در مدل پایهای کلوین – ویت از یک فنر و یک میراگر به صورت موازی استفاده می شود. بدیهی است در این حالت نیرو در کل سیستم برابر است با $F_0(t)+F_0(t)+F_0(t)$ و جابهجایی کل با جابهجایی هر یک از اجزا مساوی می باشد $((t)=u_0(t))$. به طور کل جهت بررسی پاسخ این مدلها و مقایسه آن با رفتار واقعی مواد ویسکولاستیک دو تست انجام می شود. یکی بررسی پاسخ خزش تحت اعمال تنش پلهای σ_0 (تست خزش) و دیگری بررسی پاسخ رهاسازی تنش تحت اعمال کرنش پلهای σ_0 (تست رهاسازی). بر این اساس به هنگام انجام تست خزش در مدل کلوین-ویت، برای ایجاد تغییر شکل ناگهانی نیاز است تا میراگر به صورت ناگهانی تغییر شکل دهد، این امر نیازمند نیروی بی نهایت میباشد. بنابراین در این حالت پاسخ آنی رخ نخواهد داد. در تست رهاسازی، برای ثابت ماندن کرنش، جهت نگه داشتن میراگر ویسکوز در یک طول ثابت هیچ نیروای نیاز نیست ولی برای کشیده نگه

¹Creep response

² Stress relaxation response

داشتن فنر در کرنش مورد نظر باید نیروی متناسب، به سیستم اعمال شود. بنابراین در تست رهاسازی، جهت ثابت ماندن کرنش نیازمند وجود تنش ثابت در سیستم خواهیم بود و رهاسازی تنش رخ نخواهد داد. این دو پاسخ این مدل در تست خزش و تست رهاسازی برخلاف رفتار واقعی مواد ویسکوالاستیک میباشد.

مدل پایهای مکسول از اتصال یک فنر و یک میراگر به صورت سری حاصل میشود. در این مدل برخلاف مدل کلوین-ویت، نیرو در کل سیستم برابر است با $F_{\rm D}(t)=F_{\rm s}(t)=F_{\rm s}(t)=F_{\rm D}(t)$ و جابهجایی کل برابر جمع جابهجایی هر یک از اجزاست ((u(t)=u_{\rm s}(t)+u_{\rm D}(t)). تست رهاسازی در این مدل نشان می دهد، رهاسازی تنش وجود دارد اما به طور کامل به صفر میرسد که رفتاری مانند سیال ویسکوز را نشان می دهد. در تست خزش، پاسخ مدل برخلاف پاسخ مواد ویسکولاستیک واقعی که به صورت تدریجی به نرخ کرنش ثابت خواهد به نرخ کرنش یا کرنش ثابت می رسیدند، به سرعت پس از پاسخ آنی به نرخ کرنش ثابت خواهد به نرخ کرنش ثابت می باشد.

با توجه به مطالب گفته شده این دو مدل به خوبی نمی توانند رفتار واقعی مواد ویسکوالاستیک را مدل نمایند، لذا باید ترکیب بهتری از فنرها و میراگرها را جهت مدلسازی رفتار مواد ویسکوالاستیک بکاربرد. مانند مدل تعمیم یافته کلوین– ویت⁽ (شکل 3-2- الف) که شامل *N* المان کلوین – ویت و یک فنر که به صورت سری به یکدیگر متصل شدهاند، یا مدل تعمیم یافته مکسول^۲ (شکل3-2- ب) که شامل *N* المان مکسول به صورت موازی است 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 مدلسازی رفتار مایع ویسکوالاستیک و مدل جامع کلوین-ویت برای مدلسازی رفتار جامد ویسکوالاستیک مناسب تر می باشد[Wineman & Rajagopal, 2000].

با توجه به اینکه در این پایان نامه مواد ویسکوالاستیک در تکیه گاه و دیواره لوله مورد استفاده قرار

¹Generalized Kelvin-voigt model

² Generalized Maxwell model



شكل (٢-٣) مدل مكانيكي، الف)كلوين -ويت تعميم يافته، ب)مكسول تعميم يافته

می گیرند، از مدل جامع کلوین - ویت برای مدلسازی رفتار این مواد استفاده خواهدشد. صرف نظر از اینکه این مدلها تا چه اندازه قادر به مدلسازی رفتار واقعی مواد ویسکوالاستیک هستند، یافتن رابطه دیفرانسیلی حاکم بر آن آرایش فنر و میراگر نیز مهم می باشد. چراکه در این صورت این مدل کاربردی خواهد بود و می توان از آن در مدلسازی مورد نظر استفاده نمود.

3-1-1-1 روابط ساختاري مواد ويسكوالاستيك

منظور از روابط ساختاری، یافتن روابط تنش و کرنش حاکم بر این مواد که با مدلهای مکانیکی مناسب قیاس شدهاند میباشد. این کار را میتوان با نوشتن معادلات نیرو و تغییرشکل و سپس قیاس آن با تنش و کرنش در این مدلها بدست آورد. به عنوان مثال برای مدل پایهای کلوین-ویت همانطور که گفته شد، نیرو در کل سیستم برابر است با $F = ku_s + c\dot{u}_D$ ، چنانچه این رابطهی نیرو تغییرشکل بر حسب تنش و کرنش نوشته شود، به صورت زیر خواهد بود:

$$p_0 \sigma = q_0 \varepsilon + q_1 \dot{\varepsilon}, \quad p_0 = 1, \quad q_0 = E, \quad q_1 = \mu,$$
 (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 (3-1) انجام شد، اما با انجام مراحلی پیچیدهتر، میتوان ثابت کرد که رابطه ساختاری حاکم برای مدل تعمیم یافته کلوین- ویت به شکل زیر میباشد[Wineman & Rajagopal, 2000]:

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

که در آن N_{KV} تعدا المان های کلوین – ویت بکاررفته و ضرایب q و p توابعی از مدول الاستیسیته فنر و ویسکوزیته میراگر مربوط به هر المان میباشند. در اینجا رابطه (3-2) برای مدل تعمیم یافته کلوین- ویت با یک المان (1= N_{KV})، که به مدل سه پارامتری کلوین – ویت معروف است، اثبات خواهد شد. روش ارائه شده به راحتی قابل تعمیم برای تعداد المانهای بیشتر می باشد.

روابط اصلی که برای یک مدل سه پارامتری کلوین - ویت صادق هستند عبارتند از:

$$\sigma = \sigma_0 = \sigma_1 \tag{3-3}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \tag{4-3}$$

که در آن اندیس 0 نشان دهنده خصوصیات یک فنر تنها و اندیس 1 نشان دهنده ویژگیهای مربوط به یک المان کلوین - ویت است. متغیرهای بدون اندیس نشان دهنده خصوصیات کل سیستم متشکل از سه پارامتر میباشند. به این تریتب σ_0 و σ_1 به صورت زیر قابل بیان هستند.

$$\sigma = \sigma_0 = E_0 \varepsilon_0 \tag{5-3}$$

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

$$\frac{dx}{dt} = D x = \dot{x}, \qquad \frac{dx}{dt} = D^2 x = \ddot{x}$$
(7-3)
که در آن x یک تابع دلخواست.
چنانچه دو طرف معادله (3-6) در ضریب کرنش معادله (3-6), یعنی (1-4 µ), و دو طرف معادله
(5-3) در ضریب کرنش معادله (3-5), یعنی E_0 ضرب شود (اگر برای تعداد المانهای بیشتر اثبات
میشود در هر دو حالت باید ضریب کرنش مابقی معادلات نیز ضرب شود) و سپس معادلات جدید با

$$(E_1 + E_0 + \mathbf{D}\mu_1)\sigma = (E_0(E_1 + \mathbf{D}\mu_1))(\varepsilon_0 + \varepsilon_1)$$
(8-3)

که در آن $\varepsilon_0 + \varepsilon_1 = \varepsilon$ (کرنش کل سیستم) می باشد. با اعمال عملگر مشتق نسبت به زمان و ساده سازی معادله خواهیم داشت:

$$(E_1 + E_0)\sigma + \mu_1 \dot{\sigma} = (E_0 E_1)\varepsilon + (\mu_1 E_0)\dot{\varepsilon}$$
(9-3)

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

$$p_0\sigma + p_1\dot{\sigma} = q_0\varepsilon + q_1\dot{\varepsilon}, \quad p_0 = 1, \quad p_1 = \frac{\mu_1}{E_1 + E_0}, \quad q_0 = \frac{E_0E_1}{E_1 + E_0}, \quad q_1 = \frac{E_0\mu_1}{E_1 + E_0}$$
 (10-3)

این رابطه، معادل رابطه (3-2) در حالتی که $N_{KV}=1$ میباشد است. بنابراین رابطه بنیادی حاکم بر مدل جامع کلوین-ویت مواد ویسکوالاستیک، شامل مشتقات زمانیای از تنش و کرنش با مرتبه تعداد المانهای کلوین-ویت (N_{KV}) میباشد. در این حالت استفاده از این روابط در معادلات و روشهای حل دشوار خواهد شد. برای رفع این مشکل، می توان با گرفتن تبدیل لاپلاس و معکوس آن از معادله (2-3) [Wineman & Rajagopal, 2000] رابطه تنش و کرنش را به فرم انتگرالی زیر بدست آورد:

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^{t} \sigma(t-s) \frac{\mathrm{d}J}{\mathrm{d}s}(s) \mathrm{d}s = \sigma(t)J(0) + \int_{0}^{t} \sigma(t-s) \frac{\mathrm{d}J}{\mathrm{d}s}(s) \mathrm{d}s = (\sigma * \mathrm{d}J)(t)$$
(11-3)

$$X * dY(t) := X(t)Y(0) + \int_{0}^{t} X(t-s) \frac{dY(s)}{ds} ds$$
(12-3)

همچنین در معادله (3-11) تابع خزش تطابقی J(t) مطابق با مدل تعمیم یافته کلوین – ویت به صورت معادله (3-11) بدست خواهد آمد[Brinson, 2008]:

$$J(t) = J_0 + \sum_{k=1}^{N_{KV}} J_k \left(1 - e^{-t/\tau_k} \right)$$
(13-3)

که در آن $J_0 = 1/E_k$ نشان دهنده پاسخ آنی مصالح ویسکوالاستیک، $J_k = 1/E_k$ نشان دهنده خزش تطابقی فنر مربوط به المان k ام کلوین– ویت، E_k مدول الاستیسیته فنر k ام و τ_k زمان تاخیر خزش میراگر k ام میباشد. در اینجا $E_k = \mu_k / E_k$ که در آن μ_k ویسکوزیته میراگر k ام است (منظور از =: ، تساوی تعریف شده است).

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^{t} \varepsilon(t-s) \frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}s}(s) \mathrm{d}s = \varepsilon(t)G(0) + \int_{0}^{t} \varepsilon(t-s) \frac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}s}(s) \mathrm{d}s = (\varepsilon * \mathrm{d}G)(t)$$
(14-3)

که در آن، تابع رهاسازی تنش، G(t) به صورت زیرمی باشد:

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{k=1}^{N_{KV}} G_k e^{-t/\hat{\tau}_k}$$
(15-3)

در این رابطه \hat{x}_k ، زمان تاخیر رهاسازی المان k ام و $(\infty) = G_\infty$ است که بیانگر تنش نهایی تحت کرنش واحد می باشد. اما برای مشخصات تابع رهاسازی تنش $(a, G_k) = (a, \hat{x})$ نمی توان روابط ساده و مستقیمی بر حسب فنرها و میراگرها مانند آنچه برای مشخصات تابع خزش تطابقی ($a, I_k = (a, x)$) 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 I_I زیاد شود، E_1 یا مدول الاستیسیته فنر المان یکم زیاد شده است و زمان تاخیر آن المان کاهش یافته است.

$$L(f(t)) = \bar{f}(a) = \int_0^\infty f(t)e^{-st}dt.$$
 (16-3)

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

$$L\left(\frac{df(t)}{dt}\right) = aL(f(t)) - f(0) = a\overline{f}(a) - f(0).$$
(17-3)

همچنین تابع f_3 که به عنوان انتگرال کانولوشن (یا ریمان کانولوشن) دو تابع f_1 و f_2 در نظر گرفته میشود، به صورت زیر تعریف می گردد.

$$f_3(t) = f_1 * f_2 = \int_0^t f_1(t-s) f_2(s) ds,$$
(18-3)

بر این اساس، ویژگی مهم زیر در تبدیل لاپلاس برقرار است.

$$L(f_3(t)) = \bar{f}_3(a) = L(f_1(t) * f_2(t)) = L(f_1(t))L(f_2(t)) = \bar{f}_1(a) * \bar{f}_2(a).$$
(19-3)

اکنون چنانچه از رابطه (3-10) لاپلاس گیری شود خواهیم داشت.

$$p_0\overline{\sigma} + p_1(a\overline{\sigma} - \sigma(0)) = q_0\overline{\varepsilon} + q_1(a\overline{\varepsilon} - \varepsilon(0)), \qquad (20-3)$$

شرط اولیه ضروری برای توصیف کامل مدل سه پارامتری کلوین-ویت با استفاده از معادله دیفرانسیل (10-3) به صورت زیر می باشد [Wineman & Rajagopal, 2000]:

$$p_1 \sigma(0) = q_1 \varepsilon(0). \tag{21-3}$$

¹ convolution integral

با توجه به شرط اوليه (3-21)، معادله (3-20) به رابطه زير منجر خواهد شد:

$$\overline{\varepsilon}(a) = \frac{p_0 + p_1 a}{q_0 + q_1 a} \overline{\sigma}(a) \tag{22-3}$$

با فرض
$$0 < t$$
 و $\sigma_0 = \sigma_0$ ، میدانیم تبدیل لاپلاس آن برابر $\frac{1}{a} = \sigma_0 = \overline{\sigma}(a) = \sigma_0$ میباشد $L(\sigma(t)) = \overline{\sigma}(a) = \sigma_0$ با فرض $t > 0$ و $L(\sigma(t)) = 1$

$$\bar{\varepsilon}(a) = \sigma_0 \left[\frac{p_0}{q_0} \frac{1}{a} + \left(\frac{p_1}{q_1} - \frac{p_0}{q_0} \right) \frac{1}{a + \frac{q_0}{q_1}} \right]$$
(23-3)

با توجه به اینکه می دانیم
$$L(f(t) = e^{ct}) = rac{1}{a-c}$$
، تبدیل معکوس لاپلاس معادله (23-3) به صورت
زیر می باشد.

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{p_0}{q_0} + \left(\frac{p_1}{q_1} - \frac{p_0}{q_0} \right) e^{-\left(\frac{q_0}{q_1}\right)t} \right]$$
(24-3)

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

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{p_0}{q_0} + \left(\frac{p_1}{q_1} - \frac{p_0}{q_0}\right) e^{-\left(\frac{q_0}{q_1}\right)t},$$
(25-3)

چنانچه در این رابطه، پارامترهای p_0 ، p_0 و p_1 و q_1 با توجه به رابطه (3-10) جایگذاری و سپس ساده شود، معادله تابع خزش تطابقی (13-3) برای $N_{KV}=1$ اثبات می شود.

برای اثبات فرم انتگرالی رابطه ساختاری (3-11) برای مدل سه پارامتری، ابتدا از تابع خزش تطابقی (رابطه (3-23)) تبدیل لاپلاس گرفته (
$$\overline{J}(a) = \overline{\overline{\mathcal{E}}(a)} / \sigma_o$$
) و در فرم ساده رابطه (3-23) جایگذاری میشود، که خواهد بود:

$$\overline{J}(a) = \frac{1}{a} \frac{p_0 + p_1 a}{q_0 + q_1 a}.$$
(26-3)

سپس اگر رابطه (3-23) با رابطه (3-22) ترکیب شوند، می توان تبدیل لاپلاس رابطه ساختاری (3- $\overline{J}(a)$ را به طور مستقیم بر حسب $\overline{J}(a)$ نوشت:

$$\overline{\varepsilon}(a) = a \overline{J}(a) \overline{\sigma}(a). \tag{27-3}$$

معادله بالا را میتوان به فرم زیر نوشت.

(28-3)
$$\overline{\varepsilon}(a) = \overline{\sigma}(a) \left(a \overline{J}(a) - J(0) \right) + \overline{\sigma}(a) J(0) = \overline{\sigma}(a) \overline{J}(a) + \overline{\sigma}(a) J(0),$$
که این معادله با توجه به روابط (3-18) و (3-19)، بیانگر تبدیل لاپلاس معادله زیر می باشد:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t)J(0) + \int_0^t \sigma(t-s)\frac{\mathrm{d}J}{\mathrm{d}s}(s)\mathrm{d}s.$$
(29-3)

به همین ترتیب میتوان رابطه ساختاری تنش بر حسب کرنش (3-14) و رابطه تابع رهاسازی تنش (3-14) را برای یک مدل سه پارامتری با تغییر $\overline{\sigma}$ و \overline{z} به جای یک دیگر و تعویض q و p اثبات نمود.

3-1-1-2-پارامترهای توابع خزش تطابقی و رهاسازی تنش و رابطه ی بین آن دو تابع برای یافتن رفتار خزشی یا رهاسازی یک ماده ویسکوالاستیک راهی بجز انجام تستهایی که این ویژگیها را به صورت کمّی 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 (3-13) و تابع رهاسازی تنش به شکل فرمول (3-15) تعریف می گردد. علت نامگذاری "خزش تطابقی" ماهیت تغییر مکان تدریجی در زمان که از تطبیق آنها با مقادیر اندازه گیری شده آزمایشگاهی تعیین میشوند، می باشد.

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 (k و τ_k ها در فرمول (3-13)) 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 روابط ساده و مستقیم بین پارامترهای تابع خزش، و وجود انجام میشود.

در روش دیگر (روش غیر مستقیم) که بوسیله کواس و همکاران [Covas et.al, 2004] و سوارس و همکاران [Soares et.al, 2008] 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 میشود از دقت بیشتری در آنالیزهای ضربه قوچ و تداخل سیال – سازه برخوردار میباشد زیرا بدینوسیله اثرات تاریخچه بارگذاریهای قبلی برروی 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 میشوند.

می توان رابطهای ریاضی بین توابع خزش و رهاسازی بدست آورد. برای این منظور با توجه به معادله می توان رابطهای ریاضی بین توابع خزش و رهاسازی بدست آورد. برای این منظور با توجه به معادله (14-3)، (11-3)، برای تنش پله ای σ_0 ، کرنش برابر است با $J(t) = \sigma_0 J(t)$ ، که با جایگذاری در معادله (14-3)، خواهیم داشت:

$$\sigma_0 = \sigma_0 J(t) * dG(t) \implies J(t) * dG(t) = 1$$
 (30-3)
اگر در عبارت دوم رابطه (30-3)، $t=0$ باشد و با استفاده از اپراتور استیلیس کانولوشن بسط داده شود،
رابطه زیر بدست می آید:

$$J(0)G(0) = 1, (31-3)$$

$$G(0) = G(\infty) + \sum_{k=1}^{N_{KV}} G_k$$
 که در آن $G(0)$ برابر $G_k = G(\infty) + \sum_{k=1}^{N_{KV}} G_k$ که در آن می باشد. همچنین با قرار دادن $\infty = t$ در رابطه (30-3) و انجام یک سری علمیات ریاضی خواهیم
داشت:

$$J(\infty)G(\infty) = 1, \tag{32-3}$$

که در آن با توجه به تابع خزش تطابقی (رابطه (3-13))،
$$J_k = \int_{k=0}^{N_{KV}} J_k$$
 خواهد بود.

بنابراین با داشتن مشخصات تابع خزش تطابقی (τ_k , τ_k و J_b) می توان با استفاده از رابطه (3-30)، مشخصه های تابع رهاسازی ($\hat{\sigma}_k$, $\hat{\tau}_k$ و G_∞) و یا برعکس را بدست آورد. در حالت کلی بایستی پارامترهای توابع خزش تطابقی و یا توابع رهاسازی تنش به عنوان بخشی از دادههای ضروری ورودی جهت انجام آنالیز موجود باشند. در این صورت می توان توسط مدلهای ریاضی و روشهای حل عددی ارائه شده در این پایان نامه، پیش بینی دقیقی از پدیده تداخل سیال – سازه در سیستم لوله الاستیک و ویسکوالاستیک با تکیه گاههای ویسکوالاستیک داشت.

3-1-1-3- روابط تنش - كرنش مواد ويسكوالاستيك با در نظر گرفتن نسبت پواسن

روابط ساختاری ارائه شده برای مواد ویسکوالاستیک (3-11) و (3-14)، برای حالت بارگذاری یک بعدی و بدون در نظر گرفتن اثر نسبت پواسن (v)، می باشد. چنانچه بارگذاری در حالت سه بعدی مورد نظر باشد، این نسبت یکی از مشخصات مهم و اثر گذار بر رفتار مصالح است. بنابراین در مواد ویسکوالاستیک نیز این نسبت که تابعی از زمان است، باید در نظر گرفته شود. در واقع در نظر گرفتن نسبت پواسن باعث می شود تا اثرات نیروها و تنشهای غیر محوری که در سیستم لوله وجود دارند مانند تنش شعاعی و محیطی (در مختصات استوانهای) نیز بر تغییر شکلهای محوری در نظر گرفته شوند. بنابراین بر طبق نوتاسیون تعریف شده برای استیلیس کانولوشن (عبارت (3-11)) رابطه بنیادی بین تنش و کرنش در جهت محوری z در یک دستگاه مختصات استوانهای به صورت زیر خواهد بود[کرامت، 1389]:

$$\varepsilon_{z} = \sigma_{z} * dJ - (\varepsilon_{\phi} + \varepsilon_{r}) * d\upsilon = \sigma_{z} * dJ - (\sigma_{\phi} * dJ) * d\upsilon - (\sigma_{r} * dJ) * d\upsilon.$$
(33-3)

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

$$\varepsilon_{z} = \sigma_{z} * dJ - \upsilon \left(\sigma_{\phi} * dJ - \sigma_{r} * dJ \right).$$
(34-3)

دوم اینکه با توجه به ویژگیهای لولههای جدار نازک $(\sigma_r = \tilde{P}, \sigma_{\phi} = \tilde{P}D/2/e)$ که در آن \tilde{P} نشان دهنده فشار دینامیکی میباشد) از σ_r در مقایسه با σ_{ϕ} صرفنظر میشود. با توجه به این امر رابطه (34-3) به صورت زیر می شود.

$$\varepsilon_{z} = \sigma_{z} * dJ - \upsilon (\sigma_{\phi} * dJ). \tag{35-3}$$

این رابطه و رابطه مشابه زیر که در جهت ϕ برقرار میباشد:

$$\varepsilon_{\phi} = \sigma_{\phi} * dJ - \upsilon \left(\sigma_{z} * dJ\right) \tag{36-3}$$

در معادلات حاکم بر FSI در لولههای ویسکوالاستیک در بخشهای بعد استفاده خواهند شد.

3-1-1-4 اثرمواد ويسكوالاستيك لوله و تكيه گاه برتداخل سيال-سازه

بروز جریان غیرماندگار در سیستم لوله منجر به بروز فشارهای دینامیکی در سازه لوله و ایجاد تغییر شکل محیطی در آن خواهد شد. چنانچه لوله از جنس مواد ویسکوالاستیک باشد، این تغییر شکلها از دو بخش الاستیک(آنی) و ویسکوالاستیک(تاخیری) تشکیل میشود. این تغییرشکلهای تاخیری می-تواند بر رفتار جریان غیرماندگار تاثیر بگذارد و باعث تغییر فشارها و سرعت سیال گردد. در صورت در نظر گرفتن نسبت پواسن این کرنشهای محیطی به کرنشهای محوری تبدیل می شوند که این خود، از دو بخش الاستیک و ویسکوالاستیک تشکیل شده است. همچنین با در نظر گرفتن کوپله اتصال، تنش محوری که در محل شیر، ناشی از فشار سیال ایجاد می شود میتواند خود، در سازه لوله تغییر شکلهای الاستیک و ویسکوالاستیک ایجاد نماید.

اگر از تکیهگاههای ویسکوالاستیک استفاده شود، به دلیل قابلیت ارتجاعی این تکیهگاهها، ایجاد جابه-

جایی در آنها و بروز رفتارها و تغییر شکلهای تاخیری، می تواند بر جابهجایی های ایجاد شده در سازه لوله بر اثر نیروهای هیدرولیکی اثر بگذارد و آن نیز منجر به تغییر رفتار سیال در جریان غیر ماندگار شود و همچنین باعث کاهش تنشهای وارده بر تکیهگاه و سازه لوله گردد.

در عمل، جریان پایدار در سیستم لوله برای زمانی طولانی برقرار می شود بنابراین هد مربوط به جریان پایدار H_0 ، تنها باعث ایجاد پاسخ استاتیکی در سیستم می گردد که خود متشکل از بخش الاستیک و ویسکوالاستیک می باشد. با توجه به اینکه در بررسی تداخل سیال-سازه، پاسخ دینامیکی مورد نظر است، هد دینامیکی سیال $\tilde{H} = H - H_0$ باید در فرمول ها به عنوان عامل ایجاد تنش در سیستم در نظر گرفته شود.

بطور کل رفتار مواد ویسکوالاستیک در معادلات پیوستگی سیال، ارتعاش محوری سازه لوله ویسکو-الاستیک و شرط مرزی تکیه گاه ویسکوالاستیک، بر حسب اپراتور استیلیس کانولوشن ظاهر می شود که نحوهی پیاده سازی عددی آن در فصل چهارم (روشهای حل عددی) تشریح شده است.

3-1-2- معادلات جریان گذرا در لوله الاستیک و ویسکوالاستیک

بر رفتار سیال دو معادله پیوستگی و مومنتوم حاکم میباشد. برای بدست آوردن معادلات فوق برای r-z یک سیستم لوله، معادلات ناویر - استوکس در حالت دو بعدی در دستگاه مختصات استوانهای r-z نوشته می شود. 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 می کند.

در تحقیق حاضر، اثر تکیهگاه ویسکوالاستیک در پدیده ضربه قوچ با در نظر گرفتن تداخل سیال – سازه هم در لولههای الاستیک و هم در لولههای ویسکوالاستیک مورد بررسی قرار می گیرد. بنابراین بایستی معادلات پیوستگی و مومنتوم برای هر دو نوع لوله با اثرات تداخلی استخراج گردد. از آنجایی که تکیه گاه ویسکوالاستیک، شرط مرزی است که در معادلات سازهای لوله اعمال خواهد شد، بنابراین معادلات هیدرولیکی حاکم، نیاز به اصلاح و یا تغییر جهت اعمال شرط مرزی تکیه گاه ویسکوالاستیک نخواهند داشت. لذا می توان از معادلات هیدرولیکی ضربه قوچ در لوله های ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن اثرات تداخلی که در رساله دکتری [کرامت، 1389] ارائه شده است استفاده نمود.

3-1-2-1- معادله پيوستگى

در این معادله، هم اثر ویسکوالاستیک دیواره لوله و هم اثر تداخلی تاثیر می گذارد. در صورت در نظر گرفتن هر دو اثر، معادله پیوستگی به صورت زیر می باشد[کرامت 1389]:

$$\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{g}{c_f^2} \frac{\partial H}{\partial t} - 2\upsilon \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} = (\upsilon^2 - 1) \rho_f g \frac{D}{e} \frac{\partial I_{\bar{H}}}{\partial t}, \qquad (37-3)$$

در این رابطه z امتداد محور لوله، t زمان، g شتاب گرانش زمین، u_z سرعت محوری لوله، f ضریب اصطکاک دارسی - وایسباخ، D قطر داخلی لوله، v نسبت پواسن، ρ_f دانسیته سیال، e ضخامت دیواره لوله وV سرعت سیال می باشد که در قسمت های بعدی همین بخش معرفی خواهد شد. همچنین لوله و $I_{\bar{H}}$ ضریب کرنش محیطی تأخیری⁽ ناشی از رفتار مواد ویسکوالاستیک دیواره لوله است که با رابطه زیر معین میشود.

$$I_{\tilde{H}} \coloneqq \int_{0}^{t} \tilde{H}(t-s) \frac{dJ(s)}{ds} ds = \sum_{k=1}^{N_{kV}} \left(\frac{J_k}{\tau_k} \int_{0}^{t} \tilde{H}(t-s) e^{-\frac{s}{\tau_k}} ds \right) \coloneqq \sum_{k=1}^{N_{kV}} I_{\tilde{H}k},$$
(38-3)
So c, آن \tilde{H} as curved by the set of the set

نیز در معادله (3-37) سرعت موج فشاری است که با رابطه زیر محاسبه میگردد. $c_{\scriptscriptstyle f}$

¹ Retarded circumferential strain

$$c_f \coloneqq \left(\rho_f \left(\frac{1}{K} + \left(1 - \upsilon^2\right) \frac{D}{eE}\right)\right)^{-\frac{1}{2}},\tag{39-3}$$

در این معادله، E مدول الاستیک یانگ و K مدول بالک (الاستیسیته حجمی) سیال میباشد که مقدار متوسط آن برای آب تقریبا برابر 0 10×2.07 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 (3-37) مدلسازی می گردد در لولههای ویسکوالاستیک از اهمیت بیشتری برخوردار است. اگر در معادله (3-37)، طرف دوم تساوی حذف شود، معادله پیوستگی در لولههای الاستیک با در نظر گرفتن اثر کوپله پواسن بدست خواهد آمد.

جهت رسیدن به یک فرمول بندی یک بعدی سازگار با معادلات کلاسیک چکش آبی، معادلات ناویر -جهت رسیدن به یک فرمول بندی یک بعدی سازگار با معادلات کلاسیک چکش آبی، معادلات ناویر -استوکس مذکور در $\pi r 2$ ضرب شده و سپس از 0 تا شعاع لوله R انتگرال گیری می شوند و سپس نتیجه بر πR^2 تقسیم می شود. با این کار تمام جملات موجود در معادلات ناویر - استوکس از حالت دو بعدی بر حسب πR^2 به یک بعدی بر حسب t, z تبدیل می شوند [Tijsseling, 2007]. با این کار، معادله پیوستگی به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{1}{K} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{2}{R} \dot{u}_r \Big|_{r=R} = 0, \quad \dot{u}_r \Big|_{r=R} = V_r \Big|_{r=R}$$
(40-3)

که در آن سرعت V و فشار P به صورت زیر میباشند:

$$V = \frac{1}{\pi R^2} \int_{0}^{R} 2\pi r v_z dr$$
 (41-3)

$$P = \frac{1}{\pi R^2} \int_{0}^{R} 2\pi r p dr$$
 (42-3)

که در آن
$$v_z$$
 و p به ترتیب توابع توزیع سرعت و فشار در مقطع جریان و R شعاع داخلی لوله میباشند.
کرنش محیطی در دستگاه مختصات استوانهای به صورت $\frac{u_r}{r} = \frac{v_{\phi}}{r}$ تعریف میشود که با توجه به
محدود بودن امتداد شعاعی r به دیواره داخلی تا دیواره بیرونی لوله، میتوان نوشت:

$$\varepsilon_{\phi} = \frac{u_r}{r} \rightarrow u_r = r\varepsilon_{\phi}, \quad R \le r \le R + e \rightarrow r \approx R \rightarrow u_r = R\varepsilon_{\phi}$$
 (43-3)

در این صورت آخرین ترم در معادله پیوستگی (3-40)، به صورت زیر نوشته می شود.

$$\frac{2}{R}\dot{u}_{r}\big|_{r=R} = \frac{2}{R}\frac{\partial}{\partial t}\left(R\varepsilon_{\phi}\right)\big|_{r=R} = 2\frac{\partial\varepsilon_{\phi}}{\partial t}$$
(44-3)

بنابراین معادله پیوستگی (40-3) با فرض R >> e به صورت زیر خواهد بود.

$$\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{1}{K} \frac{\partial P}{\partial t} + 2 \frac{\partial \varepsilon_{\phi}}{\partial t} = 0$$
(45-3)

با توجه به رابطه سه بعدی تنش - کرنش در مواد ویسکوالاستیک در جهت ϕ و فرضیات لولههای جدار نازک به صورت $\frac{D\widetilde{P}}{2e} = DP_{\phi}$ ($\sigma_{\phi} = P - P_{0}$) میباشد که در آن P فشار دینامیکی سیال میباشد که در آن P فشار کل و P_{0} فشار جریان ماندگار میباشد) و با فرض ثابت بودن نسبت پواسن و کوچک بودن σ_{r} در مقایسه با ϕ میتوان نوشت.

$$\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{1}{K} \frac{\partial P}{\partial t} + 2 \frac{\partial \varepsilon_{\phi}}{\partial t} = 0, \qquad \varepsilon_{\phi} = \sigma_{\phi} * dJ - \upsilon \left(\sigma_{z} * dJ\right)$$

$$\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{1}{K} \frac{\partial P}{\partial t} + 2 \frac{\partial \left(\sigma_{\phi} * dJ\right)}{\partial t} - 2\upsilon \frac{\partial \left(\sigma_{z} * dJ\right)}{\partial t} = 0,$$

$$\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{1}{K} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{D}{e} \frac{\partial \left(\tilde{P} * dJ\right)}{\partial t} - 2\upsilon \frac{\partial \left(\sigma_{z} * dJ\right)}{\partial t} = 0.$$
(46-3)

در استخراج روابط فوق، تغییرات $arepsilon_z$ و σ_z در جهت r ناچیز در نظر گرفته می شود. جهت تعیین

آخرین ترم در روابط فوق، از معادله (3-35) نسبت به زمان مشتق گیری می نماییم. سپس با توجه به فرضیات لوله جدار نازک وتئوری کرنشهای کوچک¹ ($\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}$) میتوان نوشت:

$$\frac{\partial(\sigma_z * dJ)}{\partial t} = \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} + \frac{\upsilon D}{2e} \frac{\partial(\tilde{P} * dJ)}{\partial t}.$$
(47-3)

با جاگذاری این رابطه در معادله (3-46) و بسط اپراتور استیلیس کانولوشن (با استفاده از رابطه (3-12)) معادله پیوستگی به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{1}{K} \frac{\partial P}{\partial t} - 2\upsilon \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} + (1 - \upsilon^2) \frac{D}{e} \left(\frac{\partial P}{\partial t} J(0) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_0^t \tilde{P}(t - s) \frac{dJ(s)}{ds} ds \right) \right) = 0, \quad (48-3)$$

از جایگزینی
$$\widetilde{P}=
ho_f \ g \ \widetilde{H}$$
 (که در آن $H-H_0$ هد دینامیکی سیال میباشد) و توجه به $\widetilde{P}=
ho_f \ g \ \widetilde{H}$ هد دینامیکی در لولههای ویسکوالاستیک به $J(0)=J_0=1/E$
صورت رابطه (3-37) که در اول بخش ارائه شد بدست خواهد آمد.

3-1-2-2- معادله مومنتوم

رابطه مومنتوم بر اساس اثرات ویسکوالاستیک و تداخلی پواسن و اتصال تغییر نخواهد کرد [کرامت، 1389] و با انجام عملیات مشابهی که برای بدست آوردن معادله پیوستگی (3-40) صورت گرفت، این معادله درجهت محوری برابر خواهد بود با:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{2}{\rho_f R} \tau_0 + g \sin \theta$$
(49-3)

¹ infinitesimal strain theory

در این معادله چنانچه برای تنش برشی از مدل اصطکاک شبه ماندگار (تنش برشی au_0 برابر مقدار معادل آن در حالت جریان پایدار فرض می گردد) استفاده شود، خواهیم داشت:

$$\tau_0 = \rho_f f \frac{V_{\text{rel}} \left| V_{\text{rel}} \right|}{8} \tag{50-3}$$

که در آن V_{rel} سرعت نسبی سیال درون لوله نسبت به دیوار داخلی لوله میباشد که برابر با $_{z}$ u_{z} است. که در این V سرعت مطلق سیال، u_{z} سرعت مطلق دیواره لوله و f ضریب افت دارسی وایسباخ میباشد. که در این V سرعت مطلق سیال، μ_{z} u_{z} سرعت مطلق دیواره لوله و f ضریب افت دارسی وایسباخ میباشد. چنانچه P در رابطه مومنتم با $Z - \gamma H - Z$ ، که در آن H هد فشار سیال و γ وزن حجمی سیال و Z رقوم نقطه مورد بررسی است، جایگزین گردد رابطه مومنتم (4-40) با فرض $\theta = 0$ ، به صورت زیر خواهد بود.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{-fV|V|}{2D}$$
(51-3)

چنانچه از اصطکاک نیز صرف نظر شود، ترم سمت راست معادله (3-51) حذف خواهد شد.

3-1-3- معادله دیفرانسیل مرتبه دوم ارتعاش محوری سازه لوله

به علت وجود جمله کوپله پواسن در معادله پیوستگی و نیاز به محاسبه جابجایی 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 و شرط مرزی تکیهگاه ویسکوالاستیک خواهد بود. از آنجایی که معادله ارتعاش محوری با استفاده از روش اجزای محدود حل خواهد شد، بنابراین می توان از معادله مرتبه دوم آن استفاده کرد. در حالی که اگر حل این معادلات با استفاده از روش خطوط

¹ Qusi-steady friction model

مشخصه مد نظر باشد می بایست از دو معادله مرتبه اول آن استفاده شود.
در این تحقیق جهت پیاده سازی شرط مرزی تکیه گاه ویسکوالاستیک در معادله ارتعاش محوی لوله
ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن اثر تداخلی سیال- سازه، این معادله مرتبه دو، بر حسب تابع
رهاسازی تنش
$$(f(t))$$
 استخراج خواهد شد. علت این کار در قسمت مربوط به شرط مرزی تکیه گاه
ویسکوالاستیک به طور کامل توضیح داده شده است.
چنانچه دو طرف معادله (3-35) در (d) * ضرب شود، خواهیم داشت:

$$\varepsilon_z(t) * \mathrm{d}G(t) = \sigma_z(t) * \mathrm{d}J(t) * \mathrm{d}G(t) - \upsilon(\sigma_\phi(t) * \mathrm{d}J(t) * \mathrm{d}G(t))$$
(52-3)

اکنون با استفاده از خاصیت شرکت پذیری اپراتور استیلیس کانولوشن، رابطه
$$I(t) * \mathrm{d}G(t) = 1$$
 و رابطه $X(t) * \mathrm{d}G(t) = X(t)$ معادله فوق برابر خواهد بود با:

$$\varepsilon_{z}(t) * dG(t) = \sigma_{z}(t) - \upsilon \sigma_{\phi}(t)$$
(53-3)

حال اگر از دو طرف معادله (3-53) بر حسب z مشتق گرفته و از تئوری کرنشهای کوچک $\left(\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}\right)$

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} * dG = \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} - \upsilon \frac{\partial \sigma_{\phi}}{\partial z}$$
(54-3)

قابل ذکر است که در استخراج رابطه فوق، قانون انتگرال لایب نیتز در مشتق گیری از یک انتگرال استفاده شده است که با استفاده از آن میتوان مشتق نسبت به z از یک انتگرال را به صورت انتگرال مشتق تابع درون انتگرال، نسبت به z نوشت. در مساله حاضر این موضوع تنها در صورتی معتبر خواهد

¹ Leibnitz integral rule

بود که توابع z_z ، ε_z ، σ_z , σ_z و مشتقاتشان نسبت به z پیوسته باشند. برای کامل کردن معادله (3-3) باید $\frac{\partial \sigma_z}{\partial z}$ و $\frac{\partial \sigma_\phi}{\partial z}$ را نیز بدست آورد. در شکل (3-3) می توان تنش های وارده بر دیواره لوله را برای درک بهتر مشاهده نمود. برای بدست آوردن $\frac{\partial \sigma_z}{\partial z}$ ، از معادله



شکل (۳-۳) طرح نشاندهنده متغیرهای تعریف شده در توصیف تنش بر دیواره لوله، الف)نمای مقطع لوله (صفحه Tijsseling, 1993] (z-r

پایستاری مومنتوم که از معادله حرکت محوری لوله و با توجه به رفتار سیال و سازه در مرز تماس آنها در دیواره لوله حاصل گردیده است، استفاده می شود. معادله پایستاری مومنتوم با استفاده از مدل اصطکاک شبه ماندگار و فرضیات لولههای جدار نازک R < < R به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \rho_t \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial t} - \rho_f \frac{A_f}{A_t} \frac{fV|V|}{2D} - \rho_t g \sin \theta, \qquad (55-3)$$

که در آن $\rho_t = 0$ چگالی لوله، A_t و A_f به ترتیب سطح مقطع لوله وسطح مقطع جریان و θ ، زاویه بین محور لوله و یک صفحه افقی میباشند. اثبات این رابطه برای فهم بیشتر در پیوست الف آورده شده است. $\frac{\partial \sigma_{\phi}}{\partial z}$ نیز با برابر بودن $\widetilde{H} = \rho_f \ g \ H$ و در لوله های جدار نازک $\frac{\partial \overline{\sigma}_{\phi}}{\partial z}$ به صورت زیر خواهد بود:

¹Conservation of momentum

$$\frac{\partial \sigma_{\phi}}{\partial z} = \rho_f g \frac{D}{2e} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial z}$$
(56-3)

با جاگذاری روابط (3-55) و (3-56) در معادله (3-54)، معادله مرتبه دوم ارتعاش محوری لوله ویسکوالاستیک بر حسب تابع رهاسازی تنش برای یک سیستم بدون اصطکاک (f = 0) به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} * dG = \rho_t \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} - \rho_t g \sin \theta - \rho_f g \frac{\partial D}{2e} \frac{\partial \widetilde{H}}{\partial z}$$
(57-3)

قابل توجه است که معادله (3-57)، ارتعاش محوری دیواره یک لوله ویسکوالاستیک که به وسیله جریان غیرماندگار سیال در درون لوله بارگذاری می شود را مدلسازی می نماید. دراین رابطه چنانچه به جریان غیرماندگار سیال در درون لوله بارگذاری می شود را مدلسازی می نماید. دراین روبطه چنانچه به جای عبارت "dG"، مدول الاستیسیته میله الاستیک قرار داده شود، و سرعت انتشار موج کلاسیک در سازه لوله به صورت $c_t^2 = E/\rho_t$ تعریف شود، معادله ارتعاش محوری در لوله الاستیک با در نوله الاستیک به به با در نظر گرفتن اثر تداخلی به صورت زیر بدست خواهد آمد.

$$c_t^2 \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} - g \sin \theta - g \frac{\rho_f}{\rho_t} \frac{\upsilon D}{2e} \frac{\partial \widetilde{H}}{\partial z}.$$
(58-3)

ترم آخر سمت راست معادله (3-57) و (3-58)، اثر تداخلی سیال و سازه را نشان می دهد و اثرات تغییرات فشار را در معادله سازه وارد می سازد. همچنین چنانچه لوله افقی در نظر گرفته شود($\Theta=0$)، ترم $\rho_{rg}\sin\theta$ حذف خواهد شد.

2-3- شرايط اوليه

برای بیان مدل ریاضی و حل دقیق آن، دانستن شرایط اولیه علاوه بر معادلات حاکم بسیار مهم می-باشد. در این مطالعه پیش از بسته شدن شیر و وقوع جریان غیر ماندگار در سیستم لوله مورد نظر، و وقوع ارتعاش در سازه لوله، باید مقادیر سرعت و فشار برای معادلات هیدرولیکی و مقادیر جابهجایی و سرعت و تنشها در معادلات ارتعاش سازه در حالت جریان پایدار و ماندگار سیستم در لحظهای پیش از آغاز غیر ماندگاری جریان مشخص باشد. این مقادیر می تواند در نتایج اثر گذار باشند بنابراین باید سعی شود حدالامکان نزدیک به مقادیر واقعی فرض شوند.

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 می شود، باید جابهجایی معادل این نیرو را در لحظه 0=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 روش دیگر میتوان ابتدا تغییر شکل سازه را به علت بار استاتیکی وارده بر آن محاسبه نمود و سپس 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 در فرایند حل دینامیکی، تنها نیروی دینامیکی را بر سازه وارد نمود بنابراین شرط اولیه در محله بر بر بر بر وارد نمود بنابراین شرط اولیه در محله در فرایند حل دینامیکی، جابجایی برابر صفر خواهد بود. در این حالت جابجایی کل در هر نقطه سازه در هر لحظه برابر با جمع جابجایی دینامیکی و استاتیکی می باشد. البته هر دو روش مذکور در نهایت منجر به برابر با جمع جابجایی دینامیکی و استاتیکی می باشد. البته هر دو روش متاین میکور در نهایت منجر به نتایج یکسانی خواهند شد[کرامت، 1389] لذا با توجه به الگوریتم حل عددی یکی از دو روش می-

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 (3-37)) 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 (3-37) اثری از فشار جریان پایدار نیست (مشتقش نسبت به زمان صفر است).

3-3- شرايط مرزى

همواره شرایط مرزی حاکم بر سیستم به عنوان بخش تکمیلی برای مدل ریاضی و روشهای عددی مورد نیاز می باشد. این شرایط مرزی بر حسب مجهولات و یا معلوماتی که فقط در مرزه ها صادق هستند تعریف می شوند. در این تحقیق بدلیل استفاده از تکیهگاه ویسکوالاستیک 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 هیدرولیکی و هم برای معادلات سازهای ارائه شوند. در واقع برای مدلسازی اثر تداخلی اتصال، در شرایط مرزی هیدرولیکی پارامترهایی وابسته به سازه وارد می گردد و در شرایط مرزی سازهای مقادیری وابسته به هیدرولیک جریان.

وجود مخزن در یک سمت سیستم، یک شرط مرزی برای هر دو نوع معادلات محسوب می شود. این شرط مرزی برای معادلات سازهای مانند تکیهگاه گیردار مانع حرکت سازه لوله می شود. بنابراین شرط مرزی مخزن برای معادله ارتعاش سازه به صورت 0=(0,t) یا سختی بسیار زیاد خواهد بود. برای معادلات هیدرولیکی در محل مخزن، هد فشار همواره ثابت خواهد بود و نوسانات فشار در لوله بر آن تاثیری نخواهد داشت.

دو شرط مرزی دیگری که برای سیستم مورد نظر نیاز است، شرط مرزی شیر و تکیهگاه ویسکوالاستیک می باشد. 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. لذا می توان از همان روابط استفاده نمود. اما شرط مرزی تکیهگاه ویسکوالاستیک در سیستم لوله و نحوه پیاده سازی آن، نوآوری این تحقیق می باشد. در این قسمت

¹ Closed end

(10 2)

به طور مختصر روابط هر یک از شرایط مرزی تشریح خواهد شد. اما در فصل بعد به طور مفصل نحوه پیاده سازی این شرایط مرزی در روش حل عددی MOC-FEM مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

3-3-1- شير در انتهای لوله

روابط مرزی برای یک شیر با بستن تدریجی که امکان ارتعاش دارد به صورت زیر میباشند:

$$\frac{V_{p} - \dot{u}_{zP}}{V_{0}} = \tau \sqrt{\frac{H_{p}}{H_{0}}}$$
(59-3)

$$\sigma_{zP}A_t = \rho_f g A_f \tilde{H}_P, \quad \tilde{H}_P = H_P - H_{P,0}$$
(00-3)

که در آن اندیس P نشان دهنده مجهولات در محل شیر، 0 نشاندهنده شرایط جریان پایدار و پارامتر T درصد بازشدگی شیر میباشد. معادله (3-59) رابطهی مرزی ایست که در معادلات هیدرولیکی مورد استفاده قرار می گیرد و معادله (3-60) 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 می گردد که با امواج سازهای تولید شده به علت این تروی این تروی 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 این ترولیکی، خود باعث ایجاد یک موج تنشی در سازه می گردد که با امواج سازهای تولید شده به علت اثر تداخلی پواسن جمع می گردد. بنابراین این نیروی محوری به عنوان شرط مرزی، در معادلات سازه-

در صورتی که فقط مدلسازی اثر تداخلی پواسن مورد نظر باشد گرههای مرز به صورت کاملاً تثبیت شده در نظر گرفته می شوند تا اثر تداخلی اتصال ایجاد نگردد (البته به دلیل استفاده از تکیه گاههای ویسکوالاستیک و قابلیت ارتعاش این نوع تکیه گاهها این کار امکان پذیر نسیت). در این حالت وجود جابجایی صفر برای گره شیر، مورد انتظار است که با اعمال $0 = u_{zP}$ در رابطه (3-69) شرط مرزی مورد نظر حاصل می شود. قابل ذکراست در این حالت با توجه به بی حرکت بودن گره شیر، تمام نیروی مورد نظر حاصل می شود. قابل خواهد شد، در این حالت و موزی مورد نظر حاصل می شود. قابل ذکراست در این حالت با توجه به بی حرکت بودن گره شیر، تمام نیروی مورد نظر حاصل می شود. قابل ذکراست در این حالت با توجه به بی حرکت بودن گره شیر، تمام نیروی مورد نظر ولیکی اثر کننده در این نقطه که با رابطه (3-60) داده می شود به تکیه گاه منتقل خواهد شد.

3-3-2- تكيه گاه ويسكوالاستيک

در این مطالعه استفاده از این نوع تکیه گاه ها هم در محل شیر و هم در طول لوله مورد ارزیابی قرار می گیرد. این شرط مرزی تنها در معادلات سازهای وارد خواهد شد. با استفاده از این نوع تکیه گاهها جابه جایی ها، سرعت ها و شتابهای ارتعاش سازه ناشی از وقوع پدیده ضربه قوج تغییر خواهد کرد و این تغییرات بر سرعت و فشار سیال تاثیر خواهد گذاشت.

شکل (3-4) سیستم مخزن، لوله و شیر را به همراه تکیه گاه ویسکوالاستیک بکار رفته در محل شیر و در محلهایی از طول لوله نشان می دهد. برای مدلسازی رفتار ویسکوالاستیک این تکیه گاه ها همان طور که در شکل دیده می شود، از مدل جامع کلوین- ویت (شکل (3-2) که به نحوی مناسب رفتار واقعی مواد ویسکوالاستیک جامد را مدل می سازد استفاده می شود. بر این اساس، شرط مرزی تکیه-گاه ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن تئوری کرنش های کوچک به صورت زیر خواهد بود:

$$\sigma(z,t) = \frac{\partial u}{\partial z}(z,t) * dG^{s}(t) = \varepsilon(z,t) * dG^{s}(t)$$
(61-3)

که در آن (G^S(t) بیانگر تابع رهاسازی تنش مصالح ویسکوالاستیک تکیه گاه و علامت "d*"، عملگر استیلیس کانولوشن تعریف شده در معادله(G-21)میباشد. در واقع در محلهای قرار گیری تکیه گاههای



شکل (۴-۴) سیستم مخزن- لوله-شیر، به همراه تکیه گاه ویسکوالاستیک در محل شیر و در طول لوله.
ویسکوالاستیک (z های مورد نظر) این شرط مرزی جهت حل عددی معادلات سازهای به روش اجزای محدود اعمال می شود.

در محل قرارگیری تکیهگاه ویسکوالاستیک، هم تنش و هم جابهجایی مجهول میباشند. در حل معادله ارتعاش محوری سازه لوله (3-57)، هدف بدست آوردن تنها مجهول آن معادله یعنی جابه-جاییهای لوله ($_{x}$) در گرههای مختلف میباشد. بنابراین باید روابط را به نحوی استخراج نمود که بتوان شرایط مرزی را به گونهای اعمال کرد که همچنان جابهجایی به عنوان تنها مجهول باقی بماند و مجهول جدیدی مانند تنش در معادله اضافه نشود. در غیر این صورت حل معادله ارتعاش محوری مشکل خواهد شد. به همین علت معادله اضافه نشود. در غیر این صورت ما معادله ارتعاش محوری و رابطه تنش تکیهگاه ویسکوالاستیک به عنوان شرط مرزی در نظر گرفته شده است. این موضوع را در بخش روش حل معادله ارتعاش محوری سازه لوله بر حسب تابع رهاسازی نوشته سازی شرایط مرزی فصل بعد بهتر میتوان مشاهده نمود.

قابل توجه است در ادامه، از اصطلاح تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک برای تکیهگاه ویسکوالاستیک بکار رفته در محل شیر، و از تکیهگاههای میانی برای تکیهگاههای ویسکوالاستیک بکار رفته در طول لوله، استفاده می شود.

فصل چهارم



1-4- مقدمه

عموما برای حل مسائل تداخلی مرتبط با پدیده ضربه قوچ از دو روش کاملا خطوط مشخصه (full MOC) یا خطوط مشخصه-اجزای محدود (MOC-FEM) استفاده می شود. هر یک از این روشها معایب و مزایایی دارند. به عنوان مثال در روش MOC-FEM معادلات سازهای و هیدرولیکی به صورت مجزا حل می شوند و برای رسیدن به همگرایی در پارامترهای مشترک در معادلات هیدرولیکی و سازهای، نیازمند تکرار در هر گام زمانی است، لذا زمان حل نسبت به روش کاملا MOC که معادلات به صورت همزمان حل میشوند به مراتب بیشتر خواهد بود. از أنجایی که در روش MOC-FEM، معادلات به طور مجزا حل می شوند، تمامی پیشرفتهای موجود در بخش هیدرولیک و یا سازه در زیر برنامههای مربوط به هرکدام، همانند حالت بدون اثرات تداخلی قابل تحقق میباشند. بنابراین به راحتی می توان شرایط پیچیده تر سیستم مانند شرایط مرزی مختلف و مواردی از قبیل، اصطکاک غیرماندگار، جدایی ستون مایع، اثرات ویسکوالاستیک و یا ویسکوپلاستیک، تغییر شکلهای بزرگ و کمانش را مدلسازی نمود. در حالی که در روش کاملا MOC، شرایط پیچیده یا قابل پیاده سازی نمی باشند یا اینکه به راحتی نمی توان این کار را انجام داد. ضعف دیگر روش MOC-FEM در این است که روش عددی معمول اجزای محدود (FEM) نمی تواند ناپیوستگی هایی را که در حل دقیق مسایل FSI در چکش ابی وجود دارد، مدلسازی نماید. البته مورد اخیر نگرانی عمدهای ایجاد نمی کند زیرا در عمل، در مواردی که ضربه قوچ به دلیل خاموشی پمپ یا بسته شدن تدریجی شیر به وجود می اید، ناپیوستگی در جوابها (نوسانات انی فشار) رخ نمیدهد. بنابراین در این اینجا از روش MOC-FEM جهت حل معادلات و پیاده سازی شرط مرزی تکیه گاه ویسکوالاستیک استفاده می شود، به نحوی که معادلات هیدرولیکی با استفاده از روش خطوط مشخصه و معادلات سازهای به روش اجزای محدود حل خواهند شد.

همانطور که اشاره شد روش حلMOC-FEMدر مسائل تداخلی پدیده ضربه قوچ، در مطالعات پیشین

توسط محقیق مختلف مورد استفاده قرار گرفته است که در این بین میتوان در لولههای الاستیک به مطالعات [Tijsseling, 1989,1993]، [Heinsbroek, 1997]، [Tijsseling, 1989,1993] [جزایری، 1383] و [کرامت، 1384] و در لولههای ویسکوالاستیک به مطالعات [Soares et al, 2008] و [کرامت 1389] اشاره نمود. در هیچ یک از این مطالعات رویکردی برای پیاده سازی اثرات تکیهگاه ویسکوالاستیک در نظر گرفته نشده است. برای این منظور معادله ارتعاش محوری در لولههای ویسکوالاستیک، بر خلاف تحقیق [کرامت 1389] که بر حسب تابع خزش تطابقی نوشته شده و حل گردیده است، بر حسب تابع رهاسازی تنش نوشته و با استفاده از روش FEM حل میشود. معادلات هیدرولیکی حاکم بر حرکت سیال در جریان میرا در لولههای الاستیک و ویسکوالاستیک نیز به روش MOC حل خواهند 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.

2-4- تقریب عددی ترمهای انتگرال کانولوشن

همانطور که در تعریف عملگر استیلیس کانولوشن، رابطه (3-12) مشاهده میشود، پس از بسط این عملگر، ترم انتگرال کانولوشن در معادلات ظاهر خواهد شد. این ترم در معادله پیوستگی (3-37)، بر حسب تابع خزش تطابقی و در معادله مرتبه دوم ارتعاش محوری (3-57) و رابطه شرط مرزی تکیه-گاه ویسکوالاستیک (3-61)، برحسب تابع رهاسازی تنش می باشد. جهت انجام آنالیز در حوزه زمان، این عبارات بایستی به صورت عبارتهای 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 مقاله منظور از یک تقریب به راحتی می توان در حوزه زمان به مطالعه رفتار مواد ویسکوالاستیک پرداخت. این گیری این تقریب، به راحتی می توان در حوزه زمان به مطالعه رفتار مواد ویسکوالاستیک پرداخت. این

فصل چهارم

تقریب عددی در روش اجزای محدود، تنها ترم های اضافیای در ماتریس جرم (یا سختی) و بردار نیرو نسبت به مواد الاستیک ایجاد می نماید.

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

$$I_{hk}(t) = \int_{0}^{t} h(t-s) \frac{dJ}{ds}(s) ds = \frac{J_{k}}{\tau_{k}} \int_{0}^{t} h(t-s) e^{\frac{-s}{\tau_{k}}} ds$$

$$\approx h(t) \left(J_{k} + \frac{J_{k}\tau_{k}}{\Delta t} \left(e^{\frac{-\Delta t}{\tau_{k}}} - 1 \right) \right) + h(t-\Delta t) \left(-J_{k}e^{\frac{-\Delta t}{\tau_{k}}} - \frac{J_{k}\tau_{k}}{\Delta t} \left(e^{\frac{-\Delta t}{\tau_{k}}} - 1 \right) \right) + e^{\frac{-\Delta t}{\tau_{k}}} I_{hk}(t-\Delta t).$$

$$(1-4)$$

اثبات رابطه (1-4) را می توان در پیوست (ب) مشاهده نمود. همچنین این تقریب بر حسب تابع رهاسازی تنش و تابع دلخواه h(t) به صورت زیر می باشد:

$$\hat{I}_{hk}(t) = \int_{0}^{t} h(t-s) \frac{dG}{ds}(s) ds = \frac{-G_{k}}{\hat{\tau}_{k}} \int_{0}^{t} h(t-s) e^{-s/\hat{\tau}_{k}} ds$$

$$\approx h(t) \left(-G_{k} + \frac{G_{k}\hat{\tau}_{k}}{\Delta t} \left(1 - e^{-\Delta t/\hat{\tau}_{k}} \right) \right)$$

$$+ h(t-\Delta t) \left(+G_{k} e^{-\Delta t/\hat{\tau}_{k}} - \frac{G_{k}\hat{\tau}_{k}}{\Delta t} \left(1 - e^{-\Delta t/\hat{\tau}_{k}} \right) \right) + e^{-\Delta t/\hat{\tau}_{k}} \hat{I}_{hk}(t-\Delta t).$$
(2-4)

علاوه بر روابط بالا، بایستی رابطهی مشتق نسبت به زمان انتگرال کانولوشن مذکور نیز با توجه به

$$I_{hk}(t) = \frac{J_k}{\tau_k} \int_{0}^{t} h(t-s) e^{-s/\tau_k} ds \quad \text{(1.1)}$$

با انجام یک سری عملیات جبری می توان ثابت کرد[Covas et.al, 2005]:

$$\frac{dI_{hk}(t)}{dt} = -\frac{I_{hk}(t)}{\tau_k} + \frac{J_k}{\tau_k}h(t)$$
(3-4)

در این صورت با جاگذاری تقریب عددی ارائه شده برای ($I_{hk}(t)$ (معادله (1-4)) در معادله (3-4)، بدست خواهد آمد:

$$\frac{dI_{hk}(t)}{dt} \approx h(t) \left(\frac{J_k}{\Delta t} \left(1 - e^{-\Delta t/\tau_k} \right) \right) + h(t - \Delta t) \left(\frac{J_k}{\tau_k} e^{-\Delta t/\tau_k} - \frac{J_k}{\Delta t} \left(1 - e^{-\Delta t/\tau_k} \right) \right) - \frac{e^{-\Delta t/\tau_k}}{\tau_k} I_{hk}(t - \Delta t).$$
(4-4)

با انجام عملیاتی مشابه میتوان به همین صورت رابطه مشتق نسبت به زمان را برای $\hat{I}_{hk}(t)$ که بر حسب تابع رهاسازی تنش است بدست آورد. از روابط (4-2)، (4-4) و (4-4) در تقریب ترمهای شامل انتگرال کانولوشن یا تقریب مشتق آنها در فرایند حل عددی استفاده میشود.

قابل ذکر است که تقریب بکار رفته در استخراج رابطه تقریبی (4-1) و (4-2) از درجه اول میباشد، زیرا همان طور که در اثبات آن در پیوست (ب) مشاهده میشود، 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 است، در آنها نیز چنانچه نیاز به انجام محاسبات عددی تقریبی است، تقریب 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.

3-4- حل معادلات هيدروليک جريان به روش خطوط مشخصه

معادلات هیدرولیکی حاکم(پیوستگی (3-37) و مومنتوم (3-51)) با استفاده از روش خطوط مشخصه

(MOC) حل و دو مجهول این معادلات یعنی سرعت(V) و فشار (P) سیال بدست میآیند. در این روش چنانچه معادله مومنتوم را با L_1 ومعادله پیوستگی را با L_2 نمایش دهیم، می توان با ترکیب این دو معادله به صورت $L=L_1+\lambda L_2$ ، معادله جدیدی تشکیل داد. با این کار به ازای هر زوج L_1 عدد حقیقی متمایز برای λ ، دو معادله برای P و V بدست می آید که می توانند جانشین معادلات V و L_2 شوند[استریتر و وایلی، 1386]. چنانچه معادله L تشکیل و بر اساس مشتقات جزئی مجهولات L_2 و مرتب شود، می توان با در نظر گرفتن شروطی $\left(\frac{dx}{dt} = \lambda \rho_f c_f^2 = \frac{1}{\lambda \rho_s}\right)$ و یافتن دو مقدار Pحقیقی برای λ ($\lambda = \pm \frac{1}{\rho_f c_f}$) حقیقی برای λ (ر این معادلات که بر حسب علامت، به صورت $^+$ و $^-$ نمایش داده می شوند را می توان به فرم تفاضل محدود معمولی روی دو خط مشخصه، بر اساس مقادیر معلوم گام زمانی قبل و مقادیر مجهول در گام زمان فعلی نوشت. این کار در لولههای ویسکوالاستیک با مدلهای مختلف اصطکاک غیرماندگار، بدون در نظر گرفتن FSI توسط سوارس [Soares et al, 2008] و با در نظر گرفتن FSI توسط کرامت [Keramat et al, 2012] انجام شده است. در اینجا نیز برای ارائه فرم جامعی از روش حل MOC برای معادلات مذکور، از جداول ارائه شده در این دو مرجع استفاده می شود. قابل ذکر است هنگام در نظر گرفتن FSI، تنها اثر تداخلی پواسن در معادلات و حل، تغییراتی را ایجاد می کند و اثر تداخلی اتصال و اثر تکیه گاه ویسکوالاستیک تنها در شرایط مرزی پیاده سازی می شوند. بنابراین بر اساس آنچه که گفته شد فرم تفاضل محدود معمولی دو معادله حاکم بر روی دو خط مشخصه ⁺C و ⁻C به صورت زیر خواهد بود:

$$C^{+}: \quad Q_{P} = -C_{a+}H_{P} + C_{p}, \tag{5-4}$$

$$C^{-}: \quad Q_{P} = C_{a-}H_{P} + C_{n}. \tag{6-4}$$

 C_{a+} و C_p و C_p و مقادیر مجهول و مقادیر $Q = A_f V$ و $Q = A_f V$ و C_{a+} و $Q = A_f V$ و C_{a+} و $Q = A_f V$ و C_{a+} و $Q = A_f V$ و C_{a-} و $Q = A_f V$ پارامترهایی هستند که با استفاده از مقادیر محاسبه شده در گام زمانی قبل به صورت زیر محاسبه میشوند.

$$C_{p} = \frac{Q_{A_{1}} + BH_{A_{1}} + C'_{p1} + C''_{p1} + C'''_{p1}}{1 + C'_{p2} + C''_{p2}}, \quad B = \frac{gA_{f}}{c_{f}},$$
(7-4)

$$C_{n} = \frac{Q_{A_{2}} + BH_{A_{2}} + C_{n1}' + C_{n1}'' + C_{n1}'''}{1 + C_{n2}' + C_{n2}''},$$
(8-4)

$$C_{a+} = \frac{B + C_{p2}''}{1 + C_{p2}' + C_{p2}''},$$
(9-4)

$$C_{a-} = \frac{B + C_{n2}''}{1 + C_{n2}' + C_{n2}''},\tag{10-4}$$

که در آنها اندیسهای p و n بکار رفته شده نشاندهنده خطوط مشخصه "مثبت" و "منفی" میباشند. پارامترهای دارای اندیس $(A_1(A_2)$ مربوط به نقاط متناظر روی خطوط ($C^{-})^+$ در گام زمانی قبل میباشند(شکل (1-4) را ببینید). '، '' و ''' نشاندهنده ترمهای مربوط به مدل اصطکاک شبه استاتیکی، اصطکاک غیرماندگار، رفتار مکانیکی دیواره لوله و اثر کوپله پواسن میباشند. فرمول مربوط



t شکل (۱-۴) خطوط مشخصه در مختصات z و

به محاسبه هر یک از مقادیر بکار رفته در روابط (4-7) الی (4-00) در جدول (4-1) داده شده است. دقت شود که ترم موجود در سمت راست معادله (3-37) مربوط به اثرات ویسکوالاستیسیته بوده و بوسیله فرمول (4-4) تقریب زده میشود. جهت تعیین ترم $\frac{\partial u_z}{\partial z}$ در جدول (4-1)، معادله ارتعاشی محوری لوله (3-40) یا (3-80)، بایستی حل شود. اما جهت حل این معادله، مقدار $\frac{\partial \widetilde{H}}{\partial z}$ باید محاسبه گردد که این نیز مستلزم حل معادلات هیدرولیک میباشد. بنابراین یک فرایند تکراری در هر گام زمانی بین زیر برنامههای هیدرولیکی و سازهای نیاز خواهد بود تا بتوان مجهولات مربوط به سازه و هیدرولیک را در هر گام زمانی تعیین نمود[1997].

		مدل اصطکاک شبه استاتیکی [']
$C'_{p1} = C'_{p2} = 0$	$C_{n1}' = C_{n2}' = 0$	بدون اصطکاک:
		تقريب درجه اول:
$C_{p1}' = -R\Delta t \left Q_{A_1} \right Q_{A_1}$	$C_{n1}' = -R\Delta t \left Q_{A_2} \right Q_{A_2}$	$R - \underline{f}$
$C'_{p2} = 0$	$C'_{n2} = 0$,	$R = \frac{1}{2DA}$
$C''_{p1} = C''_{p2} = 0$	$C_{n1}'' = C_{n2}'' = 0$	اصطکاک غیر ماندگار ['']
	[′	رفتار ويسكوالاستيك ديواره لوله ["
$C_{p1}''' = C_{p2}''' = 0$	$C_{n1}''' = C_{n2}''' = 0$	بدون اثر ويسكوالاستيك
		ويسكوالاستيك خطى
$C_{p1}^{\prime\prime\prime} = -C_{n1}^{\prime\prime\prime} = a_0 a_2, C_{p2}^{\prime\prime\prime}$	$= C_{n2}^{m} = a_0 a_1, a_0 = \frac{D}{e} A_f \rho_f g \left(1 - \frac{D}{e} A_f \rho_f g \right)$	$-\upsilon^2 c_f \Delta t$
$a_1 = -\sum_{k=1}^{N_{KV}} \frac{J_k}{\Delta t} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} \right), a_2 = \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} \right)$	$H(t-\Delta t)-H_0)\sum_{k=1}^{N_{kV}}\left(\frac{J_k}{\tau_k}e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}}\right)-H(t-\Delta t)$	$\sum_{k=1}^{N_{KV}} \frac{J_k}{\Delta t} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} \right) - \sum_{k=1}^{N_{KV}} \frac{e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}}}{\tau_k} I_{Hk} \left(t - \Delta t \right)$
		اثر تداخلی پواسن ['''']
$C_{p1}''' = C_{n1}''' = 0$		بدون اثر تداخلی
$C_{p1}''' = -C_{n1}''' = 2\upsilon A_f c_f \Delta t$	$\frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z}$	با اثر تداخلی

جدول (۴-۱) تعريف ضرايب استفاده شده در معادلات (4-7) الى (4-10) [كرامت 1389].

4-4- حل معادله ارتعاش محوری سازه لوله به روش اجزای محدود

برای حل معادله مرتبه دوم ارتعاش محوری سازه در لوله ویسکوالاستیک و الاستیک، رابطه (3-57) و (58-3)، از روش اجزای محدود استفاده می شود. حل آن مشابه حالتی است که در آن میلهای ناشی از بار دینامیکی گسترده به صورت محوری ارتعاش میکند. در اینجا این بار دینامیکی ناشی از فشار دینامیکی سیال که به صورت ترم $\frac{\partial P}{\partial z}$ در معادله وجود دارد، میباشد. البته باید توجه نمود در صورت در نظر گرفتن کوپله اتصال، نیرویی ناشی از فشار سیال انباشته شده در هنگام بسته شدن شیر نیز در مرز اعمال می شود که خود باعث ارتعاش خواهد شد.

در حل اجزای محدود معادله ارتعاش محوری لوله افقی ویسکوالاستیک، ابتدا با استفاده از تابع وزن W، انتگرال وزنی را برای یک المان دو گرهی با مرزهای z_a و z_b نوشته و با استفاد از انتگرال جزء به جزء، شکل ضعیف آن معادله را تشکیل میدهیم که به صورت زیر خواهد بود:

$$\int_{z_a}^{z_b} \left(\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial z} * \mathrm{d}G + \rho_t \mathbf{W} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \mathbf{W}q \right) dx + \left[\mathbf{W} \left(-\frac{\partial u}{\partial z} * \mathrm{d}G \right) \right]_{z_a}^{z_b} = 0,$$
(11-4)

که در آن *q*، ترم بار دینامیکی ناشی از فشار سیال است که به صورت زیر میباشد:

$$q = \rho_f g \frac{\upsilon D}{2e} \frac{\partial \widetilde{H}}{\partial z}.$$
 (12-4)

ترم دوم در سمت چپ معادله (14-11)، بیانگر شرایط مرزی است و ترم $\mathrm{d}G * \mathrm{d}G$ در آن طبق رابطه $rac{\partial u}{\partial z}$

- و تعریف کرنشهای کوچک برابر تنش ($\sigma = rac{\partial u}{\partial z} * \mathrm{d} G$) در مرزهای المان خواهد بود. اما اگر (14-3)
- لم استیلیس کانولوش (3-12) با استفاده از تعریف عملگر استیلیس کانولوش (3-12) بسط $\frac{\partial u}{\partial z} * \mathrm{d} G$ در ترم اول معادله (12-3) با استفاده از تقریب عددی ارائه شده (4-2)، آن را به صورت زیر می توان نوشت:

$$\frac{\partial u}{\partial z} * \mathrm{d}G \approx \left(G(0) + \sum_{k=1}^{N_{kV}} b_{1k}\right) \frac{\partial u(t)}{\partial z} + \sum_{k=1}^{N_{kV}} \left(b_{2k} \frac{\partial u(t - \Delta t)}{\partial z} + e^{\frac{-\Delta t}{\hat{\tau}_k}} \hat{I}_{\frac{\partial u}{\partial z}k}(t - \Delta t)\right), \quad (13-4)$$

که در آن $u(t - \Delta t)$ جابهجایی معلوم در گام زمانی قبلی است و b_{2k} ، b_{1k} و $I_{\frac{\partial u}{\partial z^k}}(t)$ به صورت زیر تعریف میشوند:

$$b_{1k} = -G_k + \frac{G_k \hat{\tau}_k}{\Delta t} \left(1 - e^{-\Delta t/\hat{\tau}_k} \right)$$
(14-4)

$$b_{2k} = +G_k e^{-\Delta t/\hat{\tau}_k} - \frac{G_k \hat{\tau}_k}{\Delta t} \left(1 - e^{-\Delta t/\hat{\tau}_k} \right)$$
(15-4)

$$\hat{I}_{\frac{\partial u}{\partial z}k}(t) = \frac{-G_k}{\hat{\tau}_k} \int_0^t \frac{\partial u}{\partial z}(t-s) e^{-s/\hat{\tau}_k} ds$$
(16-4)

چنانچه رابطه (13-4)، به جای ترم مربوطه در انتگرال معادله (11-4) جایگزین شود و از روش گالرکین و توابع تقریب خطی برای المان دو گرهی (*i*=1,2) نمونه به طول *l*، به صورت $u = \sum_{j=1}^{2} u_{j}(t) N_{j}(z)$ نمونه به صورت (*u* = $\sum_{j=1}^{2} u_{j}(t) N_{j}(z)$ استفاده و *u* به صورت (*u* = $N_{i}(\overline{z}) = [1 - \overline{z}/t]$

تعریف شود، در نهایت معادلات اجزاء برای المان نمونه به صورت زیر خواهد بود:

$$0 = \sum_{j=1}^{n=2} \left[\rho_t M_{ij} \ddot{u}_j(t) + \left(G(0) + \sum_{k=1}^{N_{kV}} b_{1k} \right) K_{ij} u_j(t) \right] \\ + \sum_{k=1}^{N_{kV}} \left[\sum_{j=1}^{n=2} \left(b_{2k} K_{ij} u_j(t - \Delta t) + e^{-\Delta t / \hat{\tau}_k} K_{ij} \hat{I}_{uk j}(t - \Delta t) \right] - q f_i \qquad (17-4) \\ - \left[N_i \left(\frac{\partial u}{\partial z} * dG = \sigma \right) \right]_{z_a}^{z_b}, \qquad i = 1, 2$$

که در آن \ddot{u}_j مشتق دوم جابهجایی نسبت به زمان یعنی شتاب می باشد. دقت شود مقادیر پارامترهای

تابع رهاسازی موجود در معادله، مربوط به مشخصات مواد ویسکوالاستیک به کار رفته در سازه لوله می باشند. ماتریس جرم M_{ij} ، سختی K_{ij} و بردار نیرو f_i برای المان نمونه دوگرهی در مختصات محلی به صورت زیر خواهد بود:

$$M_{ij} = \int_0^l N_i(\bar{z}) N_j(\bar{z}) d\bar{z}, \qquad for \quad i = 1, 2 \quad , \quad j = 1, 2$$
(18-4)

$$K_{ij} = \int_0^l \frac{\partial N_i(\bar{z})}{\partial \bar{z}} \frac{\partial N_j(\bar{z})}{\partial \bar{z}} d\bar{z}, \quad for \quad i = 1, 2 \quad , \quad j = 1, 2$$
(19-4)

$$f_i = \int_0^l N_i(\bar{z}) d\bar{z}, \quad for \quad i = 1,2 \quad ,$$
 (20-4)

در نهایت معادلات اجزا (رابطه **(4-1**7)) را برای المان نمونه e میتوان به فرم ماتریسی زیر نوشت:

$$\rho_t \mathbf{M}_{\mathbf{e}} \ddot{\hat{\mathbf{u}}}(\mathbf{t}) + C_1 \mathbf{K}_{\mathbf{e}} \hat{\mathbf{u}}(\mathbf{t}) = -\mathbf{f}_r + \mathbf{f}_{\mathbf{e}} q + \left[\mathbf{N}^{\mathrm{T}} \sigma \right]_{z_a}^{z_b}$$
(21-4)

$$C_{1} = \left(G(0) + \sum_{k=1}^{N_{kV}} b_{1k}\right), \qquad \mathbf{f_{r}} = \mathbf{K_{e}}C_{2},$$

$$C_{2} = \sum_{k=1}^{N_{kV}} [b_{2k}\hat{\mathbf{u}}(t - \Delta t) + e^{-\Delta t/\tau_{k}^{R}} \hat{\mathbf{I}}_{\mathbf{u}k} (t - \Delta t)],$$

$$\hat{\mathbf{I}}_{\mathbf{u}k} (t) = \frac{G_{k}}{\hat{\tau}_{k}} \int_{0}^{t} \hat{\mathbf{u}}(t - s) e^{-s/\tau_{k}} ds,$$

که $\hat{\mathbf{u}}$ بردار جابهجایی گرهی، N توابع تقریب و q مطابق با رابطه (4-12) میباشد. ماتریس $\mathbf{K}_{\mathbf{e}}$ و $\mathbf{K}_{\mathbf{e}}$ ، $\mathbf{M}_{\mathbf{e}}$ بردار جابهجایی گرهی، \mathbf{N} توابع تقریب فریب و \mathbf{P} مطابق با رابطه (4-12) میباشد. ماتریس $\mathbf{f}_{\mathbf{e}}$

$$\mathbf{M}_{\mathbf{e}} = \frac{l}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1\\ 1 & 2 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{K}_{\mathbf{e}} = \frac{1}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1\\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{f}_{\mathbf{e}} = \frac{l}{2} \begin{bmatrix} 1\\ 1 \end{bmatrix}$$
(22-4)

که در آن z_a - $l=z_b$ طول هر المان میباشد.

آخرین عبارت در سمت راست معادله (4-21)، بیانگر شرایط مرزی المان است. اگر توابع تقریب خطی را به کار برده و معادلات حاصل برای تمام المانها سرهمبندی شوند، ترم اخر در معادلات حاصل، ساده شده و به جز در گرههایی که دارای نیروی خارجی یا تکیه گاه ویسکوالاستیک (یا شرایط مرزی) هستند، در مابقی گرهها، این ترم برابر صفر خواهد بود. همانطور که مشاهده می شود این ترم به گونه-ای حاصل شده است که باید شرط مرزی را بر حسب تنش قرار داد که علت آن حل معادله ارتعاش محوری بر حسب تابع رهاسازی تنش می باشد. بنابراین در گرههایی (z های مورد نظر) که شرط مرزی تکیهگاه ویسکوالاستیک قرار دارد، باید رابطه (c(z,t)، معادله (61-3)، اعمال شود. از آنجایی که خود این رابطه را هم می توان بر حسب جابه جایی نوشت (در بخش بعد به طور کامل توضیح داده شده است)، می توان در نهایت معادله ارتعاش محوری لوله را که تنها مجهول آن جابهجایی است، با وجود شرط مرزي تكيهگاه ويسكوالاستيك به راحتي حل نمود و جابهجاييها را به طور مستقيم و بدون نياز به تکرار بدست آورد. این در حالی است که اگر معادلهی ارتعاش محوری سازه لوله بر اساس تابع خزش نوشته و حل می گردید، می بایست رابطه کرنش تکیه گاه ویسکوالاستیک به عنوان شرط مرزی، نوشته و اعمال میشد، در این صورت تنش (رابطه ساختاری مواد ویسکوالاستیک (3-11) را ببنید) به عنوان مجهولی جدید وارد معادلات اجزا محدود ارتعاش محوری سازه می شد و حل با مشکل مواجه می گردید.

پس از سرهمبندی معادله (4-21) برای تمام المانها و اعمال شرایط مرزی و مقادیر اولیه، جهت حل این رابطهی ماتریسی در حوزه زمان، الگوریتم نیومارک β مورد استفاده قرار می گیرد که در این الگوریتم، حالت 1/4 = β (شتاب میانگین) به جهت دقت بالاتر و پایدار بودن بی قید و شرط بر گزیده می شود[Reddy, 1993].

معادلهای که حل گردید، معادله ارتعاش محوری در لوله ویسکوالاستیک، رابطه (3-57)، بود. جهت

 $\mathbf{f_r}=0$ و $C_1=E$ و 21-4) با وجود $C_1=E$ و 21-4) و 21-4) با وجود $C_1=E$ و $C_1=E$ و $C_1=E$ و $C_1=E$ و $C_1=E$ میاشد. همانطور که مشاهده میشود صادق خواهد بود، که E مدول الاستیسیته میله الاستیک میباشد. همانطور که مشاهده میشود استفاده از تقریبهای (4-1) یا (4-2) برای انتگرالهای کانولوشن ناشی از رفتار مواد ویسکوالاستیک دیواره لوله جهت حل عددی به روش اجزای محدود، تنها ترمهای اضافیای در ماتریس سختی و بردار دیواره لوله جهت به مواد الاستیک ایجاد مینود.

5-4- پیادہ سازی شرایط مرزی

همواره بایستی با توجه به روش حل معادلات که در اینجا روش MOC-FEM می باشد، شرایط مرزی به نحوی مناسب در روابط پیاده سازی و اعمال شوند. همانطور که پیشتر اشاره شد روش -MOC FEM توانایی بالایی در پیاده سازی شرایط مرزی متنوع در مقایسه با روشهای دیگر مانند روش کاملا MOC دارد. در اینجا نحوه پیاده سازی شرایط مرزی حاکم، از جمله شیر در انتهای لوله و تکیهگاه ویسکوالاستیک در انتها و میانه (در طول) لوله برای انواع لولههای الاستیک و ویسکوالاستیک در روش MOC-FEM بررسی خواهد شد.

در روش MOC-FEM به منظور پیاده سازی کوپله اتصال (که به دلیل وجود تکیهگاه ویسکوالاستیک اجتناب ناپذیر است)، از یک فرآیند تکرار تا همگرایی مقادیر مرزها باید استفاده شود. بنابراین لازم است تا در شرایط مرزی سازهای (شرایط مرزی نیرویی در سازه)، که برای محاسبه جابجاییها در دستگاه مختصات کلی و از آنجا جابجاییها در دستگاه مختصات محلی، مورد استفاده قرار میگیرند، بعضی متغیرهای هیدرولیکی وارد شود. برای این منظور از واقعیتی استفاده میشود که در آن فشار سیال درون لوله در یک مقطع، در بعضی موقعیتها، مثلاً در گرههای شیر یا تقاطع، مانند یک نیروی خارجی متمرکز، بر سازه اثر میکند. بنابراین تحلیل سازه تحت این نیروهای هیدرولیکی یک فرآیند زمانی آنقدر تکرار می شود تا مقادیر همگرا شدهای برای جابجاییها و سرعتها و شتابهای سازهای از یک طرف و ارتفاع پیزومتری از طرف دیگر، برای آن گره (اتصال) که اثر کوپله اش مورد بررسی است، حاصل گردد.

از آنجایی که از تکیهگاههای ویسکوالاستیک در مرزها استفاده شده است، به دلیل قابلیت ارتجاعی در این نوع تکیهگاهها که بسته به میزان سختی و مشخصات آنها متفاوت است، وقوع جابهجایی در این محلها اجتناب ناپذیر می باشد. بنابراین بابد کوپله اتصال در نظر گرفته شود. با توجه به این موضوع، شرایط مرزی جهت پیاده سازی در روش عددی به صورت زیر می باشند.

4-5-1- شير در انتهای لوله

در مرزهایی مانند شیرها، تقاطعها و…، تمام روابط لازم، مانند 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 باید نوشته شوند. برای مرز شیر که در اینجا مورد بررسی است این روابط به صورت زیر میباشند: الف- بستن آنی: شرط مرزی برای شیر در حالت بستن آنی به صورت زیر میباشد. (شیر قابلیت جابه-جایی دارد).

$$V_i^{n+1} = \dot{u}_{zi}^{n+1} \qquad \iff \qquad Q_i^{n+1} = A_f \dot{u}_{zi}^{n+1}$$
 (23-4)

که در این رابطه u_{zi}^{n+1} جابجایی محوری گره شیر میباشد و بنابراین u_{zi}^{n+1} سرعت محوری این گره خواهد بود. بدیهی است که برای محاسبه u_z باید یک تحلیل سازهای روی شبکه لوله انجام گیرد، از طرفی چون بارگذاری مورد نیاز برای این تحلیل سازهای، وابسته به نتایج هیدرولیکی (فشار در گره شیر) میباشد ناچار خواهیم شد از روش تکرار بین حلهای سازهای و هیدرولیکی تا همگرایی جوابها (فشار سیال و سرعت محوری شیر) استفاده نماییم. بعد از محاسبه Q_i^{n+1} از رابطه (23-4) برای محاسبه H_i^{n+1} در محل شیر، مانند حالت شیر مهارشده، میتوان از رابطه C^+ استفاده کرد.

$$H_i^{n+1} = Cp - Bp \ Q_i^{n+1}$$
(24-4)

ب- بستن تدریجی: در این حالت می توان از رابطه زیر استفاده کرد.

$$Q_i^{n+1} = \frac{Q_0 \tau}{\sqrt{H_{0,\text{val}}}} \sqrt{H_i^{n+1} - Z_i} + \dot{u}_{zi}^{n+1} A_f$$
(25-4)

که در آن Z_i رقوم گره شیر بوده و $H_{0,val}$ و au به ترتیب ارتفاع نظیر فشار و نسبت بازشدگی شیر میباشند (روابط زیر).

$$H_{0,\text{val}} = \frac{P_0}{\gamma} \bigg|_{\text{valve}} = H_0 \bigg|_{\text{valve}} - Z_{\text{val}}, \quad \tau = \frac{C_d^{n+1} A_g^{n+1}}{C_d A_g}$$
(26-4)

 H_i^{n+1} در رابطه فوق C_d ضریب دبی است. ازحل همزمان روابط (4-24) و (4-25) برای بدست آوردن Q_i^{n+1} و Q_i^{n+1} و Q_i^{n+1}

$$Q_{i}^{n+1} = \dot{u}_{zi}^{n+1} A_{f} - \frac{\tau^{2} Q_{0}^{2} Bp}{2H_{0,\text{val}}} + \sqrt{\left(\frac{\tau^{2} Q_{0}^{2} Bp}{2H_{0,\text{val}}}\right)^{2} + \frac{\tau^{2} Q_{0}^{2} \left(Cp - Z_{\text{val}}\right)}{2H_{0,\text{val}}} - \frac{\tau^{2} Q_{0}^{2} \dot{u}_{zi}^{n+1} A_{f} Bp}{H_{0,\text{val}}}$$
(27-4)

چنانچه شیر با استفاده از اتصالات صلب به زمین متصل شود در رابطه (4-27) مقدار u_{zi}^{n+1} ، صفر قرار داده می شود. همچنین چنانچه مقدار $\tau = 0$ منظور گردد، شرط مرزی مربوط به بستن آنی شیر حاصل می شود که مشابه رابطه (23-4) که قبلاً عنوان شد، می باشد.

همچنین در مرز شیری که امکان جابهجایی دارد، نیروی متمرکزی ناشی از فشار سیال پشت شیر بر سازه وارد می شود که باید مقدار آن به عنوان شرط مرزی معادله ارتعاش سازه، در بردار نیروی سرهمبندی شده سیستم در این گره اضافه گردد. از آنجایی که در ترم آخر معادله (4-21)، شرایط مرزی باید به صورت تنش اعمال شوند، بنابراین این عبارت با توجه به نیروی هیدرولیکی موجود در گره شیر (رابطه (3-60) و اثرات نسبت پواسن) و فرضیات لولههای جدار نازک به صورت زیر میباشد:

$$\frac{\partial u}{\partial z} * \mathrm{d}G \Big|_{z_b = z_{val} = L} = \sigma \Big|_{z_b = L} = \left[\sigma_z - \upsilon \sigma_\phi\right]_{z_b = L} = \rho_f g \left[\frac{A_f}{A_t} - \frac{\upsilon D}{2e}\right] \widetilde{H}_p, \qquad (28-4)$$

که در آن L طول لوله و $\tilde{H}_p - \tilde{H}_p - \tilde{H}_p$ می باشد. قابل توجه است که رابطه فوق به عنوان نیروی هیدرولیکی وارده از طرف سیال بر شیر باید در بردار نیروی کل سیستم اعمال گردد. این نیرو در برگیرنده هر دو اثر تداخلی پواسن و اتصال میباشد (عبارت دارای ضریب v مربوط به اثر تداخلی پواسن میباشند). این رابطه نشاندهنده این است که جهت ارایه یک توصیف ریضی درست از اثر تداخل پواسن، باید بجز نقاط میانی، در نقاط مرزی نیز اثرات ترمهای کوپله پواسن اعمال گردد. در شرایطی که تنها مدلسازی اثر تداخلی پواسن مورد نظر باشد کار آسان است زیرا مرزها (نقاطی که در ترهای که تنها مدلسازی اثر تداخلی پواسن مورد نظر باشد کار آسان است زیرا مرزها (نقاطی که در آنها سرعت سیال تغییر می کند مانند شیر، پمپ، مخزن و ...) در این حالت کاملاً بدون حرکت خواهند بود. این ثابت بودن مرز منجر به انتقال مستقیم تمام نیروی سیال به تکیهگاه می گردد. چنانچه در مرز هیچ تکیهگاهی وجود نداشته باشد، تمام نیروی هیدرولیکی موجود در مرز صرف انجام کار بر روی سازه میشود.

چنانچه به جای عبارت "dG (مدول الاستیسیته میله الاستیک) قرار داده شود، شرط مرزی به حالتی که مربوط به لولههای الاستیک (با هر دو اثر تداخلی) است منجر خواهد شد. چنانچه 0 = v در رابطه (4-28) اعمال گردد شرط مرزی حاصله مربوط به حالتی است که تنها اثرات تداخلی اتصال موردنظر باشند و اگر فقط اثر تداخلی پواسن مورد نظر باشد (یعنی از تکیه گاه گیردار و صلب به جای تکیه گاه ویسکوالاستیک استفاده شود) این عبارت کل نیروی وارده بر تکیه گاه (که کاملاً صلب و بدون حرکت است) را خواهد داد.

4-5-2- تكيه گاه ويسكوالاستيک

جهت پیاده سازی شرط مرزی تکیه گاه ویسکوالاستیک در معادلات (4-21) اجزای محدود ارتعاش سازه، معادله (3-61) که بیانگر تنش در تکیه گاه در محل اتصال به لوله (z مورد نظر) میباشد را می-توان با استفاده از تعریف کرنشهای کوچک و بسط عملگر استیلیس کانولوشن به صورت زیر نوشت:

$$\sigma(z,t) = \frac{\partial u(z,t)}{\partial z} * dG^{S}(t) = \varepsilon(z,t) * dG^{S}(t)$$

$$= \varepsilon(z,t)G^{S}(0) + \int_{0}^{t} \varepsilon(z,t) \frac{dG^{S}}{ds}(s) ds$$
(29-4)

که در آن (ɛ(z,t) با توجه به شکل شماتیک تکیهگاه ویسکوالاستیک و لوله و استفاده از توابع تقریب
خطی
$$\left[{f N} = iggl[1 - {ar z \over l} ~ {ar z \over l}
ight] = {f N}$$
، به صورت زیر می باشد:

$$\varepsilon(z,t) = \mathbf{S}\mathbf{u} = \mathbf{S}\mathbf{N}\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}} = \frac{u_2 - u_1}{L_s} = \frac{u(z,t)}{L_s}, \qquad \mathbf{S} = \frac{\partial}{\partial \overline{z}}, \qquad \mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial \overline{z}}$$
(30-4)



شکل (۲-۴) شکل شماتیک تکیه گاه ویسکوالاستیک متصل به لوله در گره z.

که در آن L_s طول تکیه گاه ویسکوالاستیکی است که از یک سمت ثابت شده است و از سمت دیگر به لوله متصل است و جابهجایی آن برابر جابهجایی گرهای از لوله (z مورد نظر) است که به آن متصل شده است.

با جاگذاری رابطه (4-30) در معادله (4-29)می توان نوشت:

$$\sigma(z,t) = \varepsilon(z,t) * dG^{s}(t) = \frac{u(z,t)}{L_{s}}G^{s}(0) + \int_{0}^{t} \frac{u(z,t-s)}{L_{s}} \frac{dG^{s}}{ds}(s) ds.$$
(31-4)

در نهایت اگر معادله (4-31) با استفاده از تقریب عددی انتگرال کانولوشن ارائه شده در رابطه (4-2) نوشته و مرتب شود، رابطه تنش در تکیه گاه ویسکوالاستیک در محل اتصال به لوله (z مورد نظر) به عنوان شرط مرزی در معادلات اجزای محدود ارتعاش محوری سازه به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$\sigma(z,t) \approx C_{3}u(z,t) + C_{4}, \qquad (32-4)$$

$$C_{3} = \frac{1}{L_{s}} \left(G^{s}(0) + \sum_{k=1}^{N_{kv}} b_{1k}^{s} \right), \qquad (32-4)$$

$$C_{4} = \sum_{k=1}^{N_{kv}} \left[\frac{1}{L_{s}} b_{2k}^{s} u(z,t-\Delta t) + e^{-\Delta t/\hat{t}_{k}^{s}} \hat{I}_{uk}^{s} (t-\Delta t) \right], \qquad \hat{I}_{uk}^{s}(t) = \frac{1}{L_{s}} \frac{G_{k}^{s}}{\hat{t}_{k}^{s}} \int_{0}^{t} u(0,t-s) e^{-\frac{s}{t_{k}^{s}}} ds.$$

اندیس S در پارامترهای معادلات بالا مربوط به تکیه گاه ویسکوالاستیک میباشد که متمایز کننده از پارامترهایی مواد ویسکوالاستیک لوله که در معادلات اجزا ارتعاش لوله وجود دارد می باشد. $b_{1k}^{\rm S}$ و $b_{2k}^{\rm S}$ با استفاده از روابط (4-14) و (4-15) و مشخصات مواد ویسکوالاستیک تکیه گاه بدست میآیند. پس از اعمال شرط مرزی تکیه گاه ویسکوالاستیک، رابطه (4-32)، در ترم آخر معالات اجزای سرهمبندی شده سیستم، در گرههایی که تکیه گاهها به لوله متصل میباشند (محل شیر در گره آخر معادت اجزای z=L و سایر محلهای قرار گیری این تکیه گاهها در طول لوله)، A در سمت راست معادله باقی خواهد ماند، چراکه مقادیر آن بر اساس گام زمانی قبل و معلوم میباشند. اما (z,u(z,t) که جابه جایی مجهول در گام زمانی فعلی است به سمت چپ معادلات اجزای (4-21) که برای تمام المانها سرهمبندی شده است، میرود و C_3 در درایه ماتریس سختی که مرتبط با گره قرار گیری تکیه گاه است اضافه می شود. البته در اعمال شرط مرزی تکیه گاه ویسکوالاستیک، رابطه (4-32)، باید به این نکته توجه نمود که اگر از تکیه گاه با سطح مقطعی متفاوت از میله استفاده می شود بایستی معادله (4-32) را در نسبت مساحت تکیه گاه (A_s) به مساحت لوله (A_i) ، یعنی (A_s/A_i) ضرب نمود و سپس در معادلات اجزای مساحت تکیه گاه (د. دلیل این موضوع این است که رابطه (4-32) بیانگر تنش در تکیه گاه است در حالی که در معادله (4-21) تنش در لوله است و این معادله بر اساس مشخصات لوله نوشته شده است.

6-4- الگوریتم کلی در حل عددی

برنامه تهیه شده جهت حل عددی معادلات ارائه شده با شرایط مرزی خاص تکیهگاه ویسکوالاستیک، در نرم افزار مطلب^۲ 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 هیدرولیک، زیر تابع بخش سازه و زیر تابع خروجی و رسمها در آن قرار داده شده است. پس از خواندن ورودی های مورد نیاز مانند مشخصات حاکم بر مسئله از جمله رفتار دیواره لوله(الاستیک، ویسکوالاستیک)، شرایط تکیه-گاهی (صلب، الاستیک و ویسکوالاستیک)، اثرات تداخلی، مشخصات فیزیکی لوله و تکیهگاهها، مقادیر اولیه فشارها و دبیها و موارد مورد نیاز دیگر در زیرتابع ورودی، برنامه وارد زیر تابع هیدرولیک شده و پس از محاسبه سرعتها و فشارهای دینامیکی سیال در گرهها وارد زیر تابع سازه خواهد شد. در این زیرتابع نیز جابهجاییها، سرعتها و شتابهای دینامیکی گرهها در سازه لوله محاسبه میشود. در این مرحله چنانچه اثرات تداخلی مانند کوپله اتصال(که به دلیل وجود تکیهگاههای ویسکوالاستیک اجتناب ناپذیر است) و کوپله پواسن در نظر گرفته شده باشند، باید بین زیر تابع هیدرولیک و سازه در را مرحله پازی تا محاسبه می مقادیم وان در نظر گرفته شرا می مرزی نور تابع هیدرولیک و سازه در مرحله پازیر است) و کوپله پواسن در نظر گرفته شده باشند، باید بین زیر تابع هیدرولیک و سازه در را مرحان مرانی تا رسیدن به مقادیر همگرا شده تکرار صورت گیرد. این کار با اعمال شرط لازم و قرار

¹ Matlab

دادن زیرتابعهای هیدرولیک و سازه در یک حلقه که شمارنده، گام زمانی است انجام شده است. پس از محاسبه مقادیر مورد نیاز در زیر تابعهای هیدرولیک و سازه در تمام گرهها، برنامه وارد زیر تابع خروجی شده و نمودارها و خروجی های لازم رسم می شوند. در زیر به اختصار الگوریتم کلی کوپله اتصال و پواسن توضیح داده می شود.

 کوپله اتصال: برای مدلسازی کامپیوتری کوپله اتصال می توان از آلگوریتم زیر استفاده کرد:
 ۹ وارد کردن اطلاعات ورودی جهت تحلیل شبکه.
 9 وارد کردن اطلاعات ورودی جهت تحلیل شبکه.
 2 مقدار ^j را در تمام اتصالات مهار نشده، برابر مقدار به دست آمده برای آن در گام زمانی قبلی قرار می دهیم.

3- با استفاده از ي شهاى به دست آمده براى گرههاى مرزى، معادلات هيدروليكى جريان را حل مى كنيم و فشارها و سرعتها را در تمام گرههاى لوله به دست مى آوريم.
 4- بارهاى متمركز ناشى از فشارها در اتصالات را محاسبه كرده و به بردار نيروها وارد مى نماييم.
 5- تحليل ديناميكى سازه را انجام داده و جابجايىها و سرعتها و شتابها را در تمام گرههاى سازه به دست مى آوريم.

6- متغیرهای سازهای به دست آمده را به دستگاه محلی منتقل کرده و از آنها مقادیر *ی*نها رابرای تمام اتصالات مهار نشده برداشت می نمائیم.

7- همگرایی را برای H و u_z نظیر گره شیر (زانویی، تقاطع و سایر اتصالات مهار نشده که ممکن است وجود داشته باشند) چک می کنیم اگر همگرایی حاصل شده بود به گام 8 می رویم و اگر همگرایی حاصل نشده بود. به گام 3 می رویم ولی این بار از مقادیر جدید به دست آمده برای u_z ها استفاده می کنیم.

. به گام زمانی بعدی $t_n = t_n + \Delta t$ میرویم و پروسه فوق را از گام 2 دوباره تکرار میکنیم.

🗖 کوپله پواسن

برای مدلسازی کامپیوتری کوپله پواسن می توان از آلگوریتم زیر استفاده کرد: 1- وارد كردن اطلاعات ورودى جهت تحليل شبكه. 2- عبارت $\, u'_z$ را در تمام نقاط برابر مقدار به دست آمده برای آن در گام زمانی قبلی، قرار میدهیم. 3- معادلات هیدرولیکی جریان را حل میکنیم و فشارها و سرعتها را در تمام گره لوله به دست مي آوريم. . مقدار عبارت $\frac{\partial P}{\partial r}$ را محاسبه می کنیم و آن را به زیر برنامه سازه می فرستیم. 5- تحلیل دینامیکی سازه را انجام داده و جابجاییها و سرعتها و شتابها را در تمام گرههای سازه به دست مي آوريم. - متغیرهای سازهای به دست آمده را به دستگاه محلی منتقل کرده و از آنها عبارت \dot{u}_z' را محاسبه 6مي كنيم. 7- همگرایی را چک میکنیم اگر همگرایی حاصل شده بود به گام 8 میرویم و اگر همگرایی حاصل نشده بود. به گام 3 میرویم ولی این بار از مقادیر جدید به دست آمده برای \dot{u}_z' برای تحلیل هيدروليک استفاده مي کنيم. . میرویم و پروسه فوق را از گام 2 دوباره تکرار میکنیم. $\left(t_{n+1}=t_n+\Delta t
ight)$ میرویم و پروسه فوق را از گام 2 دوباره تکرار میکنیم. در توضيحات بالا علامت پرايم (') بيانگر مشتق مكاني و علامت دات (.) بيانگر مشتق زماني ميباشد.





1-5- 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 اثبات نمود.

نظر به اینکه هدف از این تحقیق بررسی اثرات تکیهگاه ویسکوالاستیک بر اندرکنش سیال - سازه در پدیده ضربه قوچ در لولههای الاستیک و ویسکوالاستیک است 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 و عدم وجود نتایج عددی مشابه با روشهای حل متفاوت، از روشهای دیگر که در ادامه توضیح داده شده است برای این منظور استفاده می شود.

لذا در این فصل ابتدا با استفاده از حل مسئلهی ارتعاش محوری میله با تکیهگاه ویسکوالاستیک و بررسی نتایج و اثرات بکارگیری این نوع تکیهگاهها، روابط شرط مرزی تکیهگاه ویسکوالاستیک و نحوه پیاده سازی آن مورد صحت سنجی قرار میگیرد. همچنین به دلیل تاثیر مشخصات مواد ویسکو-الاستیک بکار رفته در تکیهگاه بر نتایج [Park, 2007]، در این مثالها که از پیچیدگی کمتری نسبت به مسائل ضربه قوچ برخوردارند و میتوان تاثیر این مشخصات را جدا از سایر عوامل مشاهده نمود، بررسیای به این منظور برای درک بهتر انجام میشود. سپس نتایج بررسی اثرات استفاده از تکیهگاه ویسکوالاستیک در سیستم لوله الاستیک و ویسکوالاستیک به هنگام وقوع ضربه قوچ ارائه خواهد شد.

2-5- ارتعاش محوری میله با تکیه گاه ویسکوالاستیک

همانطور که اشاره شد ارتعاش محوری سازه لوله که در پدیده ضربه قوچ به دلیل بارگذاری دینامیکی ناشی از جریان گذرا اتفاق میافتد، مانند ارتعاش محوری یک میله میباشد. لذا در این بخش اثرات تکیه گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک بر ارتعاش محوری میله الاستیک و ویسکوالاستیک تحت بارگذاری نیروی محرک ثابت و نیروی محرک سینوسی مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین با استفاده از حل این مثالها، صحت روش حل و روند پیاده سازی شرط مرزی تکیه گاه ویسکوالاستیک بررسی خواهد شد. به علاوه برای شناخت و درک بهتر، تاثیر مشخصات تکیه گاه ویسکوالاستیک که با مدل جامع کلوین-ویت قیاس شدهاند مانند طول و سطح مقطع تکیه گاه و پارامترهای تابع رهاسازی تنش و $(\hat{ au}_k)$ بر ارتعاش محوری مورد ارزیابی قرار می گیرند و معیارهایی جهت بهبود عملکرد آنها G_∞ ، G_k در استهلاک انرژی و میرایی سیستم ارائه میشود. علت ارزیابی پارامترهای تابع رهاسازی تنش علاوه بر سایر موارد این است که رابطه تنش تکیه گاه ویسکوالاستیک (4-29) که به عنوان شرط مرزی در معادلات اجزا (4-21) سرهمبندی شده برای کل سیستم اعمال میشود، بر حسب تابع رهاسازی است و نمی توان توصیف دقیقی از تاثیر فیزیکی هر یک از پارامترهای تابع رهاسازی تنش بر رفتار مواد ویسکوالاستیک و به طور کل رفتار تکیه گاه ویسکوالاستیک بر اساس روابط داشت. چراکه پارامترهای تابع رهاسازی را نمیI/E $J_k = 1/E_k$ و $J_0 = 1/E$ $J_k = 1/E_k$ - بر اساس روابط ساده و مستقیمی بر حسب فنرها و میراگرهای مدل جامع کلوین ($au_k = \mu_k/E_k$ ویت که این توابع بر اساس آن بدست آمدهاند، استخراج نمود.

5-2-1- معادلات حاكم

معادله دیفرانسیلی ارتعاش محوری در یک میله الاستیک به طول L و سطح مقطع A به صورت زیرخواهد بود:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \qquad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$
(1-5)

که در آن u جابه جایی، E مدول الاستیسیته و ho جرم مخصوص میله میباشد. چنانچه میله از جنس مواد ویسکوالاستیک باشد، می توان معادله ارتعاش محوری را بر حسب نیاز به فرمهای زیر نوشت:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} * \mathrm{d}G = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$
(2-5)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} * \mathrm{d} J$$
(3-5)

معادله (5-2)، معادله ارتعاش محوری میله ویسکوالاستیک بر حسب تابع رهاسازی تنش و معادله (5-3) بر حسب تابع خزش تطابقی میباشد. به عبارت دیگر در صورت داشتن هر یک از توابع خزش یا رهاسازی، میتوان با استفاده از رابطه (3-30) و خاصیت شرکت پذیری عملگر استیلیس کانولوشن، معادله ارتعاش محوری را بر حسب نیاز بر اساس تابع دیگر بدست آورد. در اینجا چون هدف پیاده-سازی شرط مرزی تکیهگاه ویسکوالاستیک میباشد از معادله (5-2) استفاده خواهد شد(علت آن در فصل سوم و چهارم توضیح داده شده است). قابل توجه است معادلات (5-1) و (5-2) به ترتیب از معادلات (3-20) و (5-7) با حذف جملات

هیدرولیکی جریان بدست می آیند.

شرايط اوليه به صورت زير خواهند بود:

$$u(x,0) = 0, \qquad \qquad \frac{\partial u}{\partial t}(x,0) = \dot{u}(x,0) = 0. \qquad (4-5)$$

شرایط مرزی حاکم بر مسئله که در مرز x=0 دارای تکیه گاه ویسکوالاستیک و در مرز x=L در معرض نیروی محوری دلخواه (F(t) قرار دارد، (شکل (5-1-الف))، به صورت زیر می باشند:

$$\sigma(x,t) = \frac{\partial u}{\partial x}(x,t) * dG^{s}(t) = \varepsilon(x,t) * dG^{s}(t) , \qquad x = 0$$
(5-5)

$$\sigma(x,t) = \frac{\partial u}{\partial x}(x,t) * dG(t) = \frac{F(t)}{A} , \qquad x = L$$
(6-5)

در رابطه (5-5) اندیس S در G^{s} بیانگر تابع رهاسازی تنش با مشخصات مواد ویسکوالاستیک تکیهگاه است در حالی که پارامترهای بدون اندیس S بیانگر مشخصات میله میباشند. چنانچه از تکیهگاه میانی ویسکوالاستیک در طول میله در محل $x=x_0$ استفاده شود، شکل (5-1-ب)، در محل قرار گیری تکیهگاه میانی، شرط مرزیای مشابه معادله (5-5) منتها با مشخصات تکیهگاه-های میانی اعمال میشود. در صورتی که در مرز سمت چپ ((x=0))، تکیهگاه گیردار و ثابت وجود داشته باشد به جای رابطه (5-5)، شرط مرزی (0=t)) حاکم خواهد بود. در این صورت استهلاک انرژی و میرایی نوسانات رخ نخواهد داد.



شکل (۱-۵) میله در معرض نیروی محوری (F(t) و تکیه گاههای مرزی و میانی ویسکوالاستیک

در شرط مرزی سمت راست، معادله (6-5)، اگر میله از جنس مصالح الاستیک باشد به جای " (kdG(t "، ع که مدول الاستیسیته میله الاستیک است، قرار خواهد گرفت.

فرم ماتریسی معادلات اجزا برای یک المان نمونهی میله که از حل معادلات (5-2) و (5-1) به روش

اجزای محدود بدست خواهد آمد، مانند معادلات (2-4) خواهد بود با این تفاوت که q که ترم مربوط به باردینامیکی ناشی از فشار سیال است حذف گردد. همچنین نحوه پیاده سازی شرط مرزی (5-5) در ترم آخرمعادلات اجزای سرهمبندی شده برای کل سیستم، نیز مانند آنچه که در بخش (4-5-2-) توضیح داده شده است می باشد.

5-2-2- ارتعاش تحت نیروی محرک ثابت

می توان نتایج ارتعاش محوری میلهی الاستیک با تکیه گاه گیردار (رنگ آبی)، تکیه گاه مرزی ویسکو-الاستیک (رنگ قرمز) و حالتی که علاوه بر تکیه گاه ویسکوالاستیک مرزی دو تکیه گاه ویسکوالاستیک در طول میله وجود دارد (رنگ مشکی) در شکل (2-5) و شکل (3-5) مشاهده نمود. در شکل (2-5) نتایج ارتعاش گره انتهایی میله واقع در m L=4 m و در شکل (3-5) نتایج ارتعاش گره میانی واقع

پارامترهای تابع خزش تطابقی		پارامترهای تابع رهاسازی تنش			ŀ		
$J_0(\operatorname{Pa}^{-1})$	J_k (Pa ⁻¹)	τ_k (s)	$G_{\infty}(\mathrm{Pa})$	G_k (Pa)	$\hat{\tau}_k$ (s)	ĸ	
10 ⁻¹⁰	0/092 ×10 ⁻¹⁰	0/0011	10 ⁹	1×10 ⁹	0/001	1	
	1/105 ×10⁻ ¹⁰	0/0301		7×10 ⁹	0/01	2	ميله ويسكوالاستيك
	7/803 ×10 ⁻¹⁰	0/1508		1×10 ⁹	0/05	3	
10 ⁻¹⁰	0/092 ×10 ⁻¹⁰	0/0011	10 ⁹	1×10 ⁹	0/001	1	
	1/105 ×10⁻ ¹⁰	0/0301		7×10 ⁹	0/01	2	تکیه کاه مرزی
	7/803 ×10 ⁻¹⁰	0/1508		1×10 ⁹	0/05	3	ويسكوالاستيك
3/33×10 ⁻⁸	0/0031 ×10 ⁻⁶	0/0011	3×10 ⁶	3×10 ⁶	0/001	1	تکیهگاههای میانی
	0/0368 ×10 ⁻⁶	0/0301		21×10 ⁶	0/01	2	ویسکوالاستیک بکار رفته در
	0/2601 ×10 ⁻⁶	0/1508		3×10 ⁶	0/05	3	طول ميله الاستيك
1/667×10 ⁻⁹	0/0015 ×10 ⁻⁷	0/0011	6×10 ⁷	6×10 ⁷	0/001	1	تکیهگاههای میانی
	0/0184 ×10 ⁻⁷	0/0301		42×10 ⁷	0/01	2	ويسكوالاستيك بكار رفته در
	0/1301 ×10 ⁻⁷	0/1508		6×10 ⁷	0/05	3	طول ميله ويسكوالاستيك

جدول (۱-۵) مشخصات مصالح ویسکوالاستیک بکار رفته در میله و تکیه گاهها.

در m در m در m شده است. همانطوری که در این اشکال مشاهده میشود، با استفاده از تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک، ارتعاشات با گذشت زمان میرا شده و حداکثر جابهجاییها رو به کاهش می-باشد (رنگ قرمز). در این حالت در زمانهای اولیه به دلیل تغییر شرایط تکیه گاه مرزی، افزایش اندکی در حداکثر جابهجاییها نسبت به حالت گیردار مشاهده میشود که به دلیل خاصیت فنری و خزشی مواد ویسکوالاستیک یا به عبارتی کاهش سختی نسبت به حالت گیردار میباشد. این رفتار در گره میانی (شکل (5-3) رنگ قرمز) نسبت به گره انتهایی (شکل (5-2) رنگ قرمز)، به دلیل نزدیکتر بودن این گره به مواد ویسکوالاستیک تکیه گاه، بیشتر مشاهده میشود. چنانچه نیاز به افزایش سرعت و میزان میرایی و یا کاهش بیشتر حداکثر جابهجاییها باشد، بایستی خصوصیات مواد ویسکوالاستیک به کار رفته در تکیه گاه را تغییر داد، مانند افزایش x و یا کاهش xها که موجب کاهش سختی و یا کاهش x_h ها که افزایش میراکنندگی را به دنبال خواهد داشت. اما همواره ایجاد این تغییرات در خصوصیات مواد ویسکوالاستیک تکیه گاه مرزی، امکان پذیر نمیباشد. به عنوان مثال نمی توان سختی و یا تکیه گاه مرزی را خیلی کاهش داد چرا که باعث این خوایش جابهجاییها به صورت و این تغییرات در



فصل پنجم

شکل (۲-۵) تاریخچه جابهجایی محوری میله الاستیک با شرایط مختلف تکیه گاهی، در گره x=4 m

کنترل خواهد شد، یا امکان ساخت مصالح با \hat{r}_k های کمتر وجود ندارد، لذا در چنین شرایطی میتوان از تکیهگاههای میانی ویسکوالاستیک با خواص مناسب استفاده نمود. همانطور که در نتایج رسم شده به رنگ مشکی شکل (5-2) و شکل (5-3) مشاهده میشود، استفاده از دو تکیهگاه میانی با سختی کمتر ($_{s}L$ بیشتر و $_{s}G$ های کمتر) نسبت به تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک (جدول (5-1) را مشاهده نمایید)، باعث افزایش سرعت و میزان میرایی ارتعاشات و کاهش بیشتر جابهجاییها شده است. تپهای شدن ارتعاشات نیز به دلیل مشخصههای ماده ویسکوالاستیک بکار رفته در تکیهگاههای میانی و

در شکل (5-4) و شکل (5-5) نتایج مربوط به ارتعاش محوری میله ویسکوالاستیک، با وجود تکیه گاه گیردار در مرز سمت چپ (رنگ آبی)، با وجود تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک (رنگ قرمز)، و حالتی



فصل پنجم

شکل (۳-۵) تاریخچه جابهجایی محوری میله الاستیک با شرایط مختلف تکیه گاهی، در گره x=1.95 m









شکل (۵-۵) تاریخچه جابهجایی محوری میله ویسکوالاستیک با شرایط مختلف تکیه گاهی در گره x=1.95 m.

همانطور که از نتایج موجود در شکل (5-4) و شکل (5-5) برای ارتعاش میله ویسکوالاستیک با تکیه-گاه مرزی ویسکوالاستیک مشاهده می شود (رنگ قرمز)، این تغییر، تاثیر چندانی بر میرایی ارتعاش ندارد چرا که تاثیر میرایی تکیهگاه در مقابل میرایی خود میله که از جنس ویسکوالاستیک است بسیار ناچیز میباشد و تنها به دلیل کاهش سختی تکیهگاه از حالت گیردار به ویسکوالاستیک، افزایش در جابهجاییها مشاهده میشود. اما اگر از تکیهگاه میانی ویسکوالاستیک با خواص مناسب در طول میله استفاده شود، حداکثر جابهجاییها کاهش پیدا خواهد نمود و میرایی ارتعاش هر چند اندک در مقابل خاصیت میرایی مواد ویسکوالاستیک میله، بیشتر میشود(رنگ مشکی). جهت کاهش افزایش صعودی جابهجایی در میله که با گذشت زمان اتفاق میافتد و ناشی از رفتار خزشی مصالح ویسکوالاستیک میله میباشد، از تکیهگاه میانی با G_k بیشتر نسبت به تکیهگاههای میانی بکار رفته در میله الاستیک استفاده شده است (1-5) را ببینید).

5-2-2-1-تغييرات تنش در ميانه ميله

علاوه بر تغییرات گفته شده، تغییرات در تنش ایجاد شده در میله و تکیه گاهها نیز می تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد، چراکه تنش معیاری جهت طراحی و بررسی پدیده خستگی است و می تواند در این امر کمک شایانی نماید. لذا چگونگی تغییرات تنش در میانه میله الاستیک در هنگام ارتعاش، در شرایط مختلف تکیهگاهی بررسی و با هم مقایسه گردید که نتایج در شکل (5-6) آورده شده است. در شکل (5-6-الف) این تغییرات بین حالت ارتعاش میله الاستیک با تکیهگاه مرزی گیردار (رنگ آبی) و حالت ارتعاش میله با تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک (رنگ قرمز) نشان داده شده است. در شکل (5-6-ب) تغییرات تنش بین حالت ارتعاش با تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک (رنگ قرمز) نشان داده شده است.



شکل (۵-۶) تاریخچه تنش در میانه میله الاستیک مرتعش. الف) مقایسه بین دو حالت میله با تکیهگاه گیردار (رنگ آبی) و میله با تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک(رنگ قرمز)، ب) مقایسه بین دو حالت میله با تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک (رنگ قرمز) و میله با تکیهگاه مرزی و دو تکیهگاه میانی ویسکوالاستیک(رنگ مشکی).

گردیده است. همانطور که در این اشکال دیده می شود، استفاده از تکیه گاههای مرزی و میانی ویسکوالاستیک می تواند در کاهش حداکثر تنشها و نوسانات تنش با گذشت زمان موثر باشد و عملکرد میله را در برابر پدیده خستگی بهبود بخشد.

5-2-2-2-تغییرات تنش در تکیه گاهها

در هنگام ارتعاش محوری میله، در تکیه گاههای به کار رفته نیز تنشهایی به وجود خواهد آمد. این تنشها و میزان تغییرات آن نیز حائز اهمیت میباشد. لذا در شکل (5-7) نتایج مقایسه بین تغییرات



تنش در تکیهگاههای مرزی و میانی ویسکوالاستیک میله مرتعش الاستیک که هم دارای تکیهگاه
مرزی و هم دو تکیهگاه میانی ویسکوالاستیک است نشان داده شده است.
علت تفاوت زیاد مقدار تنش در تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک با تکیهگاه میانی ویسکوالاستیک در
L_s اختلاف سختی در این تکیهگاههاست. در تکیهگاه مرزی سختی خیلی بیشتر G_k های بیشتر و
کمتر) از تکیهگاههای میانی میباشد (جدول (5-1) را مشاهده نمایید). همچنین قابل ذکر است ب
اینکه مشخصات مواد ویسکوالاستیک به کار رفته در تکیهگاههای میانی یکسان است، ولی تنش در
تکیهگاه میانی واقع در x=2.6 m (رنگ مشکی در شکل (F-5)) بیشتر از تنش تکیهگاه میانی دیگر
(رنگ قرمز در شکل (5-7)) می باشد، که علت آن نزدیکتر بودن این تکیهگاه به سر آزاد میله و
بیشتر بودن جابهجایی ایجاد شده در این تکیهگاه نسبت به تکیهگاه میانی دیگر میباشد.

5-2-2-3-صحت سنجى

در این بخش درستی معادلات، روش حل و نحوه پیاده سازی شرط مرزی تکیه گاه ویسکوالاستیک، با بررسی نتایج تحت نیروی محرک ثابت در سه بخش مورد ارزیابی قرار می گیرد. در بخش اول معادله استخراج شده ارتعاش محوری سازه و حل آن مورد ارزیابی قرار می گیرد و در دو بخش بعدی با بررسی شرط مرزی تکیه گاه ویسکوالاستیک و پیاده سازی آن صحت سنجی تکمیل می گردد.

□ مقايسه با نتايج مرجع [Keramat & Ahmadi, 2012]

در این مرجع ارتعاش محوری میله ویسکوالاستیک با تکیهگاه گیردار مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق معادله ارتعاش محوری میله بر اساس تابع خزش نوشته شده و حل گردیده، سپس نتایج با حل نیمه تحلیلی مقایسه شده است. در پایان نامه حاضر همانطور که پیشتر اشاره شد برای پیاده سازی شرط مرزی تکیهگاه ویسکوالاستیک معادلات ارتعاش محوری سازه بر اساس تابع رهاسازی تنش استخراج و به روش اجزای محدود حل گردید. بنابراین میتوان جهت صحت سنجی معادلات و نحوه حل، نتایج را در حالت مشابه با نتایج این مرجع مقایسه نمود. در این مرجع از نیروی پلهای محوری $F_0=4$ N میلهای به طول L=4 m سطح مقطع $F_0=4$ P و مدول الاستیسیته Pa $E=2.0750 \times 10^9$ Pa استفاده شده است. همچنین مشخصات پارامترهای تابع خزش تطابقی ماده ویسکوالاستیک استفاده شده در این مرجع به همراه پارامترهای تابع رهاسازی تنش معادل آن ماده، در جدول (2-5) داده شده است.

پارامترهای تابع رهاسازی تنش			پارامترهای تابع خزش تطابقی			1-
$G_{\infty}(\mathrm{Pa})$	G_k (Pa)	$\hat{\tau}_k$ (s)	$J_0(\operatorname{Pa}^{-1})$	J_k (Pa ⁻¹)	τ_k (s)	ĸ
	1/7561×10 ⁹	0/0391		12/05×10⁻ ¹⁰	0/2	1
	0/0474×10 ⁹	0/3013		9/64×10 ⁻¹⁰	0/4	2
2/441×10 ⁸	0/0167×10 ⁹	0/5270	4/82×10 ⁻¹⁰	7/23×10 ⁻¹⁰	0/6	3
	0/0076×10 ⁹	0/7492		4/82×10 ⁻¹⁰	0/8	4
	0/0032×10 ⁹	0/9716		2/41×10 ⁻¹⁰	1	5

جدول (۲-۵) مشخصات مواد ویسکوالاستیک بکار رفته در میله

نتایج در شکل (5-8) با نتایج ارایه شده در مرجع ذکر شده مقایسه شدهاند. در این اشکال گرافهای آبی مربوط به ارتعاش میله ویسکوالاستیک و گرافهای قرمز مربوط به ارتعاش میله الاستیک میباشد. همانظورکه مشاهده می شود جوابها کاملاً یکسان میباشند که این امر نـشان دهنده صـحیح بـودن



شکل (۸-۵) مقایسه نتایج ارتعاش میله ویسکوالاستیک (آبی) و میله الاستیک (قرمز) با تکیهگاه گیردار. راست: نتایج [Keramat & Ahmadi, 2012]، چپ: نتایج تحقیق حاضر.
🗖 مقایسه جابهجایی نهایی میله پس از میرایی با جابهجایی استاتیکی

جابهجایی استاتیکی میله الاستیک با تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک (شکل(5-1-الف)) برابر است با:

$$\Delta = F_0(\frac{1}{K^S} + \frac{1}{K}) = F_0(\frac{L_s}{E_{eq}^S A_s} + \frac{x}{EA}),$$
(7-5)

که در آن K^{S} برابر سختی تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک، K سختی میله و x بیانگر فاصله مقطع مورد ارزیابی تا ابتدا میله است. به عنوان مثال اگر انتهای میله مد نظر باشد L=x خواهد بود. از آنجایی که جابهجایی نهایی تحت نیروی ثابت مد نظر است، در مدل جامع کلوین-ویت که تکیه گاه ویسکو-الاستیک با آن مدل شده است، با گذشت زمان زیاد، فنرها حداکثر جابهجایی خود را انجام دادهاند که برابر حالتی است که گویی میراگرهای مدل حذف و تاثیری در پاسخ نخواهند داشت. بنابراین برای یافتن جابهجایی نهایی، تنها مدول الاستیسیته فنرهاست که باید به صورت سری با یکدیگر جمع شوند. بنابراین در معادله (5-7)، E_{eq}^{S} که مربوط به تکیه گاه است به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$E_{eq}^{S} = \left[J_{0}^{S} + \sum_{k=1}^{N_{kv}} J_{k}^{S}\right]^{-1}.$$
(8-5)

جابهجایی استاتیکی میله ویسکوالاستیک با تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک نیز مانند رابطه (5-7) می-باشد با این تفاوت که به جای E_{eq} میله قرار گیرد. E_{eq} میله مانند رابطه (5-8) خواهد بود با این شرط که از مشخصات (J_k و J_0) میله استفاده شود.

جهت بررسی جابهجایی استاتیکی انتهای میله الاستیک با تکیه گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک، از یک تکیه گاه میانی ویسکوالاستیک واقع در میانه میله (x=L/2) مانند شکل (9-5) استفاده می شود. البته با استفاده از روندی که توضیح داده می شود می توان برای شرایط پیچیده تر (تعداد تکیه گاههای



 F_0 شکل (۹-۵) میله با تکیهگاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک تحت نیروی ثابت

میانی بیشتر) نیز بدست آورد. ابتدا با استفاده از قوانین فنرهای سری و موازی یک سختی معادل میانی بیشتر) نیز بدست آورد. ابتدا با استفاده از قوانین فنرهای سری و موازی یک سختی معادل (K_{eq}) (K_{eq}) برای کل سیستم نشان داده شده در شکل بدست میآوریم. برای این منظور همانطور که در شکل دیده میشود قسمت 3 و 1 به صورت سری به هم متصل می باشند، لذا سختی معادل آن دو قسمت، یعنی قسمت 5 به صورت $\frac{1}{K_1} = \frac{K_3^8 + K_1}{K_1 K_3^8} = \frac{1}{K_1 K_3^8} + \frac{1}{K_1 E_1} a_1$ میباشد. لذا سختی معادل آن دو قسمت، یعنی قسمت 5 به صورت $\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2 K_1 K_3^8} = \frac{1}{K_1 K_3^8} + \frac{1}{K_1 K_3^8} = \frac{1}{K_1 K_1 K_1} a_1$ میباشد. K_1 این رابطه مربوط به سختی میله الاستیک به طول 1 است. چنانچه میله از جنس ویسکوالاستیک این رابطه مربوط به سختی میله الاستیک به طول 1 است. چنانچه میله از جنس ویسکوالاستیک باشد $\frac{1}{L_1}$ میباشد. که باشد $\frac{1}{L_1} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_1} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_1} = \frac{1}{K_1}$ میباشد. که باشد $\frac{1}{L_1} + \frac{1}{K_1 K_2} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_1 K_2} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_1 K_2} = \frac{1}{K_1}$ میباشد. که باشد $\frac{1}{L_1} + \frac{1}{K_1 K_2} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_1 K_2} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_1 K_2} = \frac{1}{K_1}$ میباشد که باشد که باشد $\frac{1}{L_1} + \frac{1}{K_1 K_2} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_1 K_2} + \frac{1}{K_1 K_2} = \frac{1}{K_1 K_2} + \frac{1}{K_1 K$

تحت بار
$$F_0$$
 به صورت $\Delta = rac{F_0}{K_{eq}}$ بدست آورد.

جهت مقایسه جابهجاییهای نهایی حاصل از حل عددی با جابهجاییهای استاتیکی سه حالت مورد بررسی قرارمی گیرد.1-میله الاستیک با تکیه گاه ویسکوالاستیک.2-میله ویسکوالاستیک با تکیه گاه ویسکوالاستیک3-میله الاستیک با تکیه گاه مرزی و یک تکیه گاه میانی ویسکوالاستیک. برای این منظور بایستی گرافهای تاریخچه جابهجایی حل عددی در بازه زمانی بیشتری رسم گردند. در شکل (5-10) تاربخچه جابهجایی سه گره انتهایی و میانی و ابتدایی میله الاستیک مرتعش با تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک (گرافهای رسم شده به رنگ قرمز در شکل (5-2) و شکل (5-3)) در بازه زمانی طولانی تر 1.8 ثانیه رسم شده است. پاسخهای نهایی میله پس از میرایی کامل ارتعاش که از حل عددی بدست آمده است در شکل نشان داده شده است. جابهجایی استاتیکی برای این حالت با استفاده از رابطه (5-7) و مشخصات داده شده در جدول (5-1) برای انتهای میله برابر m $^{-10}$ ×00. برای میانه میله برابر m $^{-10}$ ×00. و برای ابتدای میله (گره 0=x) که بیانگر جابهجایی تکیهگاه نیز میباشد برابر m $^{-10}$ ×0.0 است که دقیقا برابر مقادیر نشان داده شده در شده در شکل (5-10) میباشد.



شکل (۵-۱۰) تاریخچه جابهجایی محوری سه گره انتهایی (رنگ قرمز) و گره میانی (رنگ آبی) و گره ابتدای (رنگ مشکی) میله الاستیک با تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک.

جابهجایی استاتیکی میله ویسکوالاستیک با تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک تحت نیروی ثابت N 10 با توجه به مشخصات جدول (1-5) در انتهای میله برابر m $^{-6}$ m توجه به مشخصات جدول (1-5) در انتهای میله برابر g $^{-6}$ m ایندای میله برابر g ابتدای میله برابر و ابتدای میله برابر g انتهای رسم شده به رنگ قرمز در و ابتدای میله برابر g ا



شکل (۵–۱۱) تاریخچه جابهجایی محوری سه گره انتهایی (رنگ قرمز)، گره میانی (رنگ آبی) و ابتدایی (رنگ مشکی) میله ویسکوالاستیک با تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک.

شکل (5-4) و شکل (5-5) در بازه زمانی بیشتری رسم شدهاند، همانطور که مشاهده میشود، مقادیر جابهجایی نهایی میله در شکل، دقیقا برابر مقادیر جابهجایی استاتیکی محاسبه شده میباشد. جابهجایی استاتیکی انتهای میله الاستیک با تکیه گاه مرزی و یک تکیه گاه میانی ویسکوالاستیک مانند شکل (5-9) با استفاده از مشخصات و شرایط بخش (5-2-2)و با توجه به نحوه محاسبه آن که توضیح داده شد برابر ⁷⁰ل×4.989 میباشد. در شکل (5-12) این مقدار دقیقا برابر مقدار جابهجایی نهایی



شکل (۵-۱۲) تاریخچه جابهجایی محوری گره انتهایی میله الاستیک با تکیهگاه مرزی و یک تکیهگاه میانی ویسکوالاستیک.

حاصل از حل عددی، پس از میرایی ارتعاشات میله میباشد. این موضوع نشان می دهد که نتایج حل عددی درست بوده و سیستم درست عمل می نماید.

🗖 بررسی تنش در میله

یکی دیگر از روشهایی که می توان صحت مدل ریاضی را مورد بررسی قرار داد بررسی تنش در میله میباشد. در شکل (5-13) تاریخچه تنش در میانه میله الاستیک مرتعش با تکیهگاه مرزی ویسکو-الاستیک (رنگ قرمز) رسم شده است. این گراف همان گراف قرمز رنگ در شکل (5-6) میباشد که در بازه زمانی بیشتر رسم شده است. همانطور که مشاهده میشود با گذشت زمان و میرایی ارتعاشات،



شکل (۵-۱۳) تاریخچه تنش در میانه میله الاستیک مرتعش با تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک (رنگ قرمز) (این گراف، گراف قرمز رنگ در شکل (5-6) در بازه زمانی بیشتر می باشد) و تاریخچه تنش در میانه میله الاستیک مرتعش با تکیه گاه مرزی و یک تکیه گاه ویسکوالاستیک در وسط میله (رنگ آبی).

تنش در میله برابر تنش استاتیکی $F_0/A = 10/0.01 = 1000 \text{ N/m}^2$ میشود. همچنین در این شکل تاریخچه تنش در مقطع واقع در m 2.4 m میله الاستیک مرتعش با تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک و یک تکیه گاه ویسکوالاستیک واقع در وسط میله (رنگ آبی) رسم شده است. در این حالت نیز سیستم بدرستی عمل می نماید.

در نهایت براساس بررسیهای انجام شده میتوان گفت مدل ریاضی، روش حل و نحوه پیاده سازی شرط مرزی تکیه گاه ویسکوالاستیک درست بوده و میتوان از آن در حالتهای دیگر استفاده نمود.

5-2-2-4-تاثیر مشخصات تکیهگاه ویسکوالاستیک بر ارتعاش محوری میله

همانطور که در معادلات (4-32) و (3-51) مشاهده میشود، رابطه تنش تکیهگاه ویسکوالاستیک و تابع رهاسازی این مواد که با مدل جامع کلوین – ویت قیاس شدهاند، به پارامترهای مختلفی وابسته-اند که میتوانند بر عملکرد این ماده تاثیر بگذارند. از آنجایی که این پارامترها، که عبارتند از *A*، *A*، G_{0} ، G_{0} , g_{1} , برای مدلسازی رفتار مواد ویسکوالاستیک یا پلیمری، در عمل به کار میروند، لذا شناخت تاثیرات آنها میتواند در انتخاب ماده پلیمری مناسب کمک نماید. برای این منظور ارتعاش محوری میله الاستیک با تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک تحت نیروی محرک ثابت با مشخصات و شرایط ارائه شده در بخش (5-2-2) بررسی میشود. در رابطه با تاثیر سطح مقطع تکیهگاه *x*، به طور کل میتوان گفت با افزایش آن با توجه به رابطه (5-7)، جابهجایی نهایی میله پس از میرایی ارتعاشات کل میتوان گفت با افزایش آن با توجه به رابطه (5-7)، جابهجایی نهایی میله پس از میرایی ارتعاشات کاهش پیدا می کند اما به دلیل افزایش سختی تکیهگاه، میرایی کاهش پیدا کرده و باعث میشود تا گاه به همین مقدار بسنده میشود اما تاثیر سایر پارامترها به طور مفصل مورد بررسی قرار میگیرد. قابل توجه است در تمامی اشکال این بخش، نتایج ارائه شده مربوط به گره آخر میله، یعنی گره واقع

(L_s) اثرات تغيير طول تكيه گاه (L_s)

ابتدا تغییرات طول تکیه گاه ویسکوالاستیک (L_s) مورد بررسی قرار می گیرد. لذا سایر پارامترها ثابت و تنها طول تکیهگاه تغییر خواهد کرد. نتایج ارتعاش محوری میله الاستیک به همراه تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک را میتوان با تعریف نسبت طول تکیهگاه به طول میله برابر $V(L_s/L)$, و مرزی ویسکوالاستیک را میتوان با تعریف نسبت طول تکیهگاه به طول میله برابر $V(L_s/L)$, و تغییر L_s از 10 سانتیمتر تا 50 سانتیمتر، در شکل (5-14) مشاهده نمود. در شکل (5-14-الف) پوش ماکزیمم و مینیمم جابهجاییهای گره انتهایی، در هر دوره تناوب ارتعاش میله الاستیک، از زمان شروع ارتعاش تا زمان 1.1 ثانیه رسم شده است و بیانگر دامنه نوسانات می باشد. در شکل (5-14-ب) تاریخچه جابهجایی گره انتهایی میله با تکیهگاه ثابت (رنگ مشکی) و تکیهگاه ویسکوالاستیک با شروع ارتعاش تا زمان 1.1 ثانیه رسم شده است و بیانگر دامنه نوسانات می باشد. در شکل (5-14-ب) شروع ارتعاش تا زمان 1.1 ثانیه رسم شده است و بیانگر دامنه نوسانات می باشد. در شکل(5-14-ب) شروع ارتعاش میله الاستیک، از زمان تاریخچه جابهجایی گره انتهایی میله با تکیهگاه ثابت (رنگ مشکی) و تکیهگاه ویسکوالاستیک با تاریخچه جابهجایی گره انتهای میله با تکیهگاه ثابت (رنگ مشکی) و تکیهگاه ویسکوالاستیک با تاریخچه حابهجایی گره انتهای میله با تکیهگاه ثابت (رنگ مشکی) و تکیهگاه ویسکوالاستیک با تاریخچه حابهجایی گره انتهایی میله با تکیهگاه ثابت (رنگ مشکی) و تکیهگاه ویسکوالاستیک با تاریخچه جابهجایی آورده شده است. در زمانهای اولیه رسم شده است. همچنین نمودارهای درصد میرایی نوسانات در حالتهای مختلف طول تکیهگاه ویسکوالاستیک در دورههای تناوب مختلف در شکل(5-14-ب) توسانات در حالتهای مختلف طول تکیهگاه ویسکوالاستیک در دورههای تناوب مختلف در شکل(5-

$$d_{n} = \frac{(u_{\max}^{\text{Fsup}} - u_{\min}^{\text{Fsup}}) - (u_{\max}^{\text{VEsup}} - u_{\min}^{\text{VEsup}})}{(u_{\max}^{\text{Fsup}} - u_{\min}^{\text{Fsup}})} \times 100$$
(9-5)

که در آن u_{\max}^{Fsup} و u_{\max}^{Fsup} به ترتیب بیانگر جابهجایی ماکزیمم و مینیمم در دوره تناوب *n* ام ارتعاش میله الاستیک با تکیهگاه ثابت و u_{\max}^{VEsup} و u_{\min}^{VEsup} نیز به ترتیب بیانگر جابهجایی ماکزیمم و مینیمم در دوره تناوب *n* ام ارتعاش میله الاستیک با تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک می باشند. با توجه به شکل (5-14) مشاهده می شود با افزایش طول تکیهگاه ویسکوالاستیک و کاهش سختی، هم درصد میرایی افزایش پیدا می کند و هم جابهجایی نهایی میله پس از میرای ارتعاش بیشتر می-شود که به دلیل افزایش کرنشهای تاخیری تکیهگاه است. نمودارهای درصد میرایی با افزایش طول تکیهگاه، نسبت به یکدیگر از حالت تقریبا خطی به نمایی تبدیل می شوند که با نمودار تنش - کرنش مواد ویسکوالاستیک مطابقت دارد. این امر موجب میشود تا در زمانهای اولیه، افزایش میرایی قابل



شکل (۵-۱۴) اثرات ناشی از تغییرات طول تکیه گاه ویسکوالاستیک بر ارتعاش محوری گره انتهایی میله الاستیک. الف) پوش ماکزیمم و مینیمم جابه جایی های ناشی از ارتعاش میله با تکیه گاه ثابت (رنگ مشکی) و تکیهگاه ویسکو-الاستیک با طولهای مختلف (سایر رنگ ها). ب) تاریخچه جابه جایی میله در زمانهای اولیه ارتعاش. ج)- درصد میرایی ارتعاش در هر دوره تناوب .

توجهی را مشاهده نمود (افزایش سرعت میرایی) و میرایی کامل در زمان کمتری اتفاق افتد. اما علاوه بر افزایش سرعت میرایی باید به حداکثر جابهجایی ها نیز توجه شود. همانطور که در شکل (5-14-الف) مشاهده میشود با افزایش طول تکیهگاه، حداکثر جابهجاییهای اولیه که میتواند شرایط بحرانی را ایجاد نماید، اندکی افزایش مییابد. همچنین جابهجایی نهایی تکیهگاه که موجب افزایش جابهجایی نهایی انتهای میله (پس از میرایی ارتعاشات) میشود، نیز بیشتر خواهد شد. دلیل این امر ثابت بودن بارگذاری و عدم حذف آن و بروز کامل رفتار خزشی مواد ویسکوالاستیک می باشد. به عنوان مثال زمانی که نسبت طول تکیهگاه ویسکوالاستیک به طول کل میله، ۷، برابر 0.1 باشد، جابه- جایی نهایی میله پس از میرایی ارتعاش دینامیکی، تقریبا برابر حداکثر جابهجایی میله الاستیک مرتعش با تکیهگاه ثابت است که نمی تواند مطلوب باشد. البته باید به این نکته توجه نمود که در عمل، معمولا بارهای دینامیکی (مثل زلزله، ضربه، انفجار و ...) پریودیک بوده و پس از مدت زمان اندکی کاملا از روی سیستم برداشته میشوند. بنابراین در این شرایط جابهجایی نهایی میله پس از میرایی ارتعاشات در مقابل خاصیت این مواد در میرایی و استهلاک انرژی از درجه اهمیت کمتری میله پس از مدت زمان میرایی ارتعاشات در مقابل خاصیت این مواد در میرایی و استهلاک انرژی از درجه اهمیت کمتری ایرخوردار است. قابل توجه است در صورتی که مدول الاستیسیته میله الاستیک n برابر شود، بایستی n برابر شود تا از لحاظ جابه جایی ماله مای بارا مای نهایی میله زیاد میرایی ایتها که میله الاستیک میله میلاک انرژی از درجه اهمیت کمتری مها، n/1 برابر شود و در صورتی که ∞ ، n برابر شود، v ها بایستی n برابر شود تا از لحاظ جابه جایی های نهایی انتهای میله (مجموع کرنش میله و تکیه گاه) رفتاری مشابه آنچه بیان شد، مشاهده نمود. های نهایی انتهای میله (مجموع کرنش میله و تکیه گاه) رفتاری مشابه آنچه بیان شد، مشاهده نمود. حداقل جابهجایی های نهایی انتهای میله (مجموع کرنش میله و تکیه گاه) رفتاری مشابه آنچه بیان شد، مشاهده نمود. میمچنین در این شکل می توان دید که استفاده از تکیه گاه ویسکوالاستیک و افزایش طول آن، بر حداقل جابهجاییها تاثیر بیشتری میگذارد که به دلیل رفتار مواد ویسکوالاستیک و کرنشهای

در شکل (5-14-الف) جابهجاییهای نهایی انتهای میله که از حل عددی بدست آمدهاند نشان داده شده است. این مقادیر با جابهجاییهای استاتیکی که می توان از رابطه (5-7) بدست آورد، برابر است. به عنوان مثال برای تکیه گاه به طولLs = 0.2 می باشد که استاتیکی برابر $^{7-}$ 01×6= Δ می باشد که این مقدار بسیار نزدیک به مقدار نشان داده شده در گراف مربوطه می باشد(گراف سبز رنگ با این مقدار بسیار نزدیک به مقدار نشان داده شده در گراف مربوطه می باشد(گراف سبز رنگ با در 9.05).

در شکل (5-14-ب) که تاریخچه جابهجایی ارتعاش میله الاستیک در زمانهای اولیه رسم شده است، نشان میدهد با افزایش طول تکیهگاه ویسکوالاستیک، طول موج ارتعاش نیز افزایش و فرکانس آن کاهش پیدا میکند.

همانطور که مشاهده شد تغییرات طول تکیه گاه بر کلیه پاسخها از جمله جابهجایی های اولیه و نهایی، فرکانس و درصد میرایی اثر می گذارد. لذا در ادامه برای بهتر مشخص شدن تاثیر هر یک از پارامترهای مواد ویسکوالاستیک بر رفتارهای ذکر شده، تغییرات آنها به طور جداگانه مورد بررسی قرار میگیرد. برای این منظور جهت بهتر نشان دادن این تغییرات از طول تکیهگاه $L_{\rm s}$ = 0.1 m یا v=0.025 استفاده می شود.

 G_∞ اثرات تغيير \square

در این بررسی، تغییرات $G_{\infty} = G_{inf}$ تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک نسبت به مقدار آن در جدول (5-(1) و با ثابت بودن سایر پارامترها صورت می گیرد. در بررسی این تغییرات از نسبت این پارامتر به مدول الاستیسیته میله (E) که با $St = G_{inf} / E$ نشان داده شده است، استفاده می شود که دلیل آن مشاهده رفتاری مشابه از لحاظ کیفی و نه کمی با تغییر این نسبت می باشد. نتایج این بررسی در شکل (5-15) نشان داده شده است.

با توجه به معادله (4-32) و رابطه C_3 ، با افزایش G_{inf} ، $(0) G_0$ و به تبع آن C_3 افزایش پیدا خواهد کرد. از آنجایی که C_3 ضریب جابه جایی مجهول در زمان فعلی می باشد، لذا در ماتریس جرم که ضریب جابه جایی در معادلات اجزا محدود است، وارد می شود، بنابراین افزایش G_{inf} ، موجب افزایش سختی و کاهش آن موجب کاهش سختی خواهد شد.

همانطور که در شکل (5-15-الف و ج) مشاهده میشود افزایش G_{inf}، یا *St*، و نزدیک شدن آن به مدول الاستیسیته میله، باعث خواهد شد جابه جایی نهایی میله به جابه جایی استاتیکی (شبه پایدار) میله الاستیک با تکیهگاه گیردار نزدیک شود، و در عین حال درصد میرایی، کاهش پیدا کند. کاهش بیش از حد G_{inf}، یعنی *St* کمتر از 0.1، تاثیر بسیار اندکی بر افزایش درصد میرایی دارد(شکل(5-15-ج)) و تنها کرنش نهایی تکیهگاه ویسکوالاستیک یا بطور کل، جابهجایی نهایی میله پس از میرایی را به طور نامطلوبی افزایش میدهد. همچنین افزایش بیش از حد G_{inf}، یعنی *St* بیش از میرایی کاهش جابهجایی نهایی میله نیز مطلوب نخواهد بود چراکه نمی توان این جابه جایی را از مقداری نزدیک به جابه جایی شبه پایدار میله با تکیهگاه ثابت کمتر نمود و تنها درصد میرایی کاهش پیدا



شکل (۵-۱۵) اثرات ناشی از تغییرات $G_{\rm inf} = G_{\rm inf}$ تکیهگاه ویسکوالاستیک بر ارتعاش محوری گره انتهایی میله الاستیک. الف) پوش ماکزیمم و مینیمم جابه جایی های ناشی از ارتعاش میله الاستیک با تکیه گاه ثابت (رنگ مشکی) و ویسکوالاستیک در $St = G_{\rm inf}/E$ های مختلف (سایر رنگها). ب) تاریخچه جابه جایی میله در زمانهای اولیه ارتعاش. ج)- درصد میرایی ارتعاش در هر دوره تناوب .

خواهد کرد. بنابراین نسبتی بین 0.1 تا 0.5 برای St میتواند مناسب باشد. شکل(5-15-ب)نشان میدهد که تاثیر تغییرات G_{inf} برکاهش یا افزایش فرکانس یا طول موج ارتعاش و همچنین افزایش حداکثر جابهجاییهای اولیه بسیار اندک میباشد. چنانچه به شکل (5-14-ج) و شکل(5-15-ج) دقت شود، از آنجایی که در این دو شکل، گراف درصد میرایی رسم شده با رنگ قرمز، در شرایط یکسانی میباشد، مشاهده میشود که با افزایش s، سرعت میرایی (افزایش میرایی در دورههای تناوب اولیه) نیز افزایش مییابد درحالی که افزایش G_{inf} تاثیر چندانی بر افزایش سرعت میرایی ندارد. بنابراین تغییرات G_{inf} بیشتر بر جابهجاییهای نهایی پس از میرایی نوسانات تاثیر دارد.

🗖 اثرات تغيير $G_{
m k}$ ها

در بررسی G_k ، تغییرات در تمام G_k های تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک و نسبت به جدول (5-1) اعمال خواهد شد. این تغییرات، بر خلاف G_{inf} ، همانطور که در شکل (5-16-الف) دیده می شود تاثیری بر جابه جایی نهایی میله پس از میرایی ارتعاش ندارد. این موضوع به این دلیل است که با تغییر تاثیری بر جابه جایی نهایی میله پس از میرایی ارتعاش ندارد. این موضوع به این دلیل است که با تغییر G_k ها، هرچند J_0 و J_0 ها عوض می شود، اما حاصل جمع آنها، یعنی E_{eq}^{s} تغییر نمی کند. بنابراین بر طبق رابطه (5-7) نیز، جابه جایی نهایی نباید تغییر نماید.

با توجه به شکل(5-16-ب و ج)، با کاهش G_k ها، فرکانس کاهش اما طول موج، حداکثر جابهجایی



شکل (۵۹-۱۶) اثرات ناشی از تغییرات G_k های تکیه گاه ویسکوالاستیک بر ارتعاش محوری گره انتهایی میله الاستیک. الف) پوش ماکزیمم و مینیمم جابهجاییهای ناشی از ارتعاش میله الاستیک با تکیه گاه ثابت (رنگ مشکی) و ویسکو-الاستیک با G_k های مختلف. ب) تاریخچه جابه جایی میله در زمانهای اولیه ارتعاش . ج)- درصد میرایی ارتعاش در هر دوره تناوب .

اولیه و همچنین درصد میرای افزایش مییابد. بایستی توجه نمود همانطور که در شکل(5-16-الف و ج) مشاهده میشود، کاهش G_k ها تا زمانی که مجموع G_k ها برابر G_{inf} نشود، می تواند موجب افزایش درصد میرایی شود (به دلیل رفتار تابع رهاسازی این مواد میباشد). به عنوان مثال اگر $^{00} \times 3^{-10}$ باشد، و مجموع $^{00} \times 9_{k=1} = G_k$ باشد، جهت افزایش درصد میرایی، می توان g_k ها را تنها به اندازه 1/3 کاهش داد، و اگر بیشتر از این مقدار کوچک شود درصد میرایی کاهش پیدا می

اثرات تغيير $\hat{\tau}_k$ ها \square

در شکل (17-5) نتایج مرتبط با بررسی تغییرات $\hat{\tau}_k$ ها نشان داده شده است. این تغییرات نیز نسبت



شکل (۵–۱۷) اثرات ناشی از تغییر $\hat{\tau}_k$ های تکیهگاه ویسکوالاستیک بر ارتعاش محوری گره انتهایی میله الاستیک. الف) پوش ماکزیمم و مینیمم جابه جاییهای با تکیهگاه ثابت (رنگ مشکی) و ویسکوالاستیک با $\hat{\tau}_k$ های مختلف (سایر رنگها). ب) تاریخچه جابهجایی میله در زمانهای اولیه ارتعاش. ج)- درصد میرایی ارتعاش در هر دوره تناوب .

به جدول (5-1) انجام میشود. همانطور که در اشکال شکل (5-17) مشاهده میشود با توجه به $rac{t}$ تعریف $rcc{t}$ که بیانگر زمان تاخیر رهاسازی میراگرهای موجود در مدل جامع کلوین- ویت میباشد، تغییرات $rcc{t}$ ها تاثیری بر حداکثر جابهجاییهای اولیه و جابهجایی نهایی میله پس از میرایی ارتعاشات و همچنین فرکانس و طول موج ارتعاش ندارد. اما تاثیر قابل توجه آن بر افزایش میرایی در زمانهای اولیه و همچنین فرکانس در جابهجاییهای اولیه و با میرو ای توجه آن بر افزایش میرایی در زمانهای اولیه و همچنین فرکانس و مول موج ارتعاش ندارد. اما تاثیر قابل توجه آن بر افزایش میرایی در زمانهای اولیه و همچنین فرکانس و مول موج ارتعاش ندارد. اما تاثیر قابل توجه آن بر افزایش میرایی در زمانهای اولیه و همچنین فرکانس و مول موج ارتعاش ندارد. اما تاثیر قابل موجه آن بر افزایش میرایی در زمانهای اولیه و همچنین فرکانس و مول موج ارتعاش ندارد. اما تاثیر قابل موجه آن بر افزایش میرایی در زمانهای اولیه و محینین فرکانس و مول موج ارتعاش ندارد. اما تاثیر قابل موجه آن بر افزایش میرایی در زمانهای اولیه و محینین فرکانس و مول موج ارتعاش ندارد. اما تاثیر قابل موجه آن بر افزایش میرایی در زمانهای اولیه و محینین فرکانس و مول موج ارتعاش ندارد. اما تاثیر قابل موجه آن بر افزایش میرایی در زمانهای اولیه و محینین در ارت ای در جابهجاییهای اولیه و نهایی، می تواند در جابهجاییهای این مواد و همچنین کنترل پدیده خستگی بسیار مفید باشد. محینین درکاهش $rac{t}{k}$ ها جهت افزایش میرایی، برخلاف G_k ها محدودیتی وجود ندارد.

5-2-3- ارتعاش تحت نیروی محرک سینوسی

بررسی اثر میرایی مواد ویسکوالاستیک بر ارتعاش محوری میله ناشی از نیروهای هارمونیک مانند نیروی سینوسی $f(t)=\alpha \sin \omega t$ بیروی مختلف میتواند مهم باشد. بدین منظور از نیروی محرک سینوسی $F(t)=4\sin(200\pi t)$ برای این بررسی استفاده میشود. میله دارای طول 4=4 س و سطح مقطع برابر $f(t)=4\sin(200\pi t)$ میباشد. چگالی میله الاستیک g/m^3 و مدول الاستیسیته آن P=1200 kg/m³ میباشد. مشخصات مواد ویسکوالاستیک بکار رفته در این بخش، مطابق جدول (5-2) است.

5-2-5-1 ارتعاش ميله الاستيك و ويسكوالاستيك با تكيه گاه گيردار

نتایج جابهجایی دینامیکی محوری میله الاستیک با تکیهگاه گیردار در شکل (5-18-الف)، در 6 گره یا مقطع نشان داده شده است. ارتعاشات دامنه جابهجایی در تمام مقاطع، بغیر از گره یک که گره تکیهگاه گیردار با جابهجایی صفر میباشد، بدون میرایی مشاهده میشود. همانطور که قبلا اشاره شد می توان جهت میرایی ارتعاشات از مواد ویسکوالاستیک در سازه اصلی یا در تکیهگاه استفاده نمود. در شکل (5-18-ب) نتایج در حالتی که از مواد ویسکوالاستیک در میلهای با تکیهگاه گیردار، جهت



شکل (۵–۱۸) تاریخچه جابه جایی 6 گره در طول میله، تحت نیروی محرک سینوسی، در سه حالت: الف) میله الاستیک با تکیه گاه مرزی گیردار. ب) میله ویسکوالاستیک با تکیه گاه مرزی گیردار. ج)- میله الاستیک با تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک.(مواد ویسکوالاستیک به کار رفته در حالت ب و ج یکسان می باشد)

میرایی استفاده شود، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود استفاده از این مواد موثر و کارآمد است چراکه تقریبا پس از گذشت 0.35 ثانیه ارتعاشات دامنه جابه جایی، که ناشی از رزونانس می باشد میرا شده و سپس میله با یک دامنه ثابت تحت نیروی سینوسی جابه جا می شود.

5-2-3-2-5 ارتعاش ميله الاستيك با تكيه گاه مرزى و ميانى ويسكوالاستيك

همواره استفاده از مصالح میراگر در خود سازه به دلایل مختلف اقتصادی و فنی مقدور نمی باشد یا امکان تغییر مصالح سازه اصلی به مواد ویسکوالاستیک امکان پذیر نیست. در این شرایط میتوان به عنوان روشی جایگزین جهت میرایی و استهلاک انرژی از مواد ویسکوالاستیک در تکیهگاهها استفاده نمود. بنابراین چنانچه از مواد ویسکوالاستیک جدول (5-2) ، در تکیهگاه مرزی به طول m 2.0 = *L* - *L* - *L* - *L* مرای چانچ از مواد ویسکوالاستیک در تکیهگاه استفاده نمود. بنابراین چنانچه از مواد ویسکوالاستیک در تکیهگاهها استفاده نمود. بنابراین چنانچه از مواد ویسکوالاستیک جدول (5-2) ، در تکیهگاه مرزی به طول m 2.0 = *L* - *L* - *L* میله استفاده شود و میله از جنس الاستیک باشد، نتایج در شکل (5-18-ج) نشان داده شده به جای میله استفاده شود و میله از جنس الاستیک باشد، نتایج در شکل (5-18-ج) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود، در گره یک، جابهجاییهایی هر چند اندک به وجود میآید، که اولیه نسبت به حالت قبل کاهش پیدا کرده است ولی ارتعاشات دامنه جابهجایی، حتی پس از گذشت یک ثانیه به طور کامل میرا نشده است. علت آن کمتر شدن مواد ویسکوالاستیک بکار رفته نسبت به از حالت قبل کاهش پیدا کرده است ولی ارتعاشات دامنه جابهجایی، حتی پس از گذشت اولیه نسبت به حالت قبل کاهش پیدا کرده است ولی ارتعاشات دامنه جابهجایی، حتی پس از گذشت رادی ثانیه به طور کامل میرا نشده است. علت آن کمتر شدن مواد ویسکوالاستیک بکار رفته نسبت به از مواد ویسکوالاستیک مناسبتر به عملکرد بهتری دست یافت. به عنوان مثال در صورتی که از مواد ویسکوالاستیک مناسبتر به عملکرد بهتری دست یافت. به عنوان مثال در صورتی که از مواد ویسکوالاستیک مناسبتر به عملکرد بهتری دست یافت. به عنوان مثال در صورتی که از مواد ویسکوالاستیک مناسبتر به عملکرد بهتری دست یافت. به عنوان مثال در میورتی که زمانهای تاخیر جدول (5-2) ، 100 برایر شوند نتایج مناسبی حاصل خواهد شد، از جمله کاهش از مواد ویسکوالاستیک می اولیه نسبت به حالت قبل و میرای کامل پس از تقریبا 20.5 ثمانیه، که در شکل (5-

تهیه چنین مصالحی همواره، چه از لحاظ اقتصادی و چه از لحاظ فنی، امکان پذیر نیست. در چنین شرایطی استفاده از تکیه گاه ویسکوالاستیک در طول میله به ویژه در حالت هایی که طول میله زیاد است، می تواند مفید باشد. برای این منظور از یک تکیه گاه ویسکوالاستیک در طول میله، واقع در x=2 m ستفاده شده است. طول دو تکیه گاه مرزی و میانی m 2.0 و از جنس مواد ویسکوالاستیک جدول (5-2) می باشند (مصالحی که پیش تر در میله استفاده شده بود). شکل (5-19-ب) نشان میدهد که این حالت نیز از کارآمدی خوبی برخوردار است چراکه نه تنها می-تواند هزینهها را از لحاظ استفاده مواد، کاهش دهد بلکه پس از تقریبا 0.6 ثانیه ارتعاشات دامنه میرا میشود، همچنین جابهجاییها به ویژه حداکثر جابهجایی دینامیکی اولیه و حداکثر جابهجاییها پس از میرایی را نسبت به حالات قبل کاهش میدهد. لذا از این نظر در مقایسه با حالات قبلی تکیه گاهی مناسب است. البته همچنان میتوان با استفاده از مصالح بهتر در تکیه گاهها شرایط را بهبود بخشید. همچنین دراین حالت به دلیل وجود تکیه گاه ویسکوالاستیک در وسط میله و تکیه گاه ویسکوالاستیک



شکل (۵-۱۹) تاریخچه جابه جایی 6 گره در طول میله تحت نیروی محرک سینوی در دو حالت: الف) میله الاستیک با تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک با مصالح تقویت شده. ب) میله الاستیک با تکیه گاه ویسکوالاستیک در مرز ابتدا و وسط میله (مواد ویسکوالاستیک به کار رفته در دو تکیه گاه مطابق جدول (5-2) می باشد).

مرزی در گره ابتدا، جابهجایی گرههایی که بین این دو تکیهگاه قرار دارند، بسیار کاهش یافته است. قابل توجه است که این نوع تکیهگاه ها به دلیل قابلیت ارتجاعی خود، علاوه بر میرای ارتعاشات موجب کاهش تنشهای ایجاد شده در تکیهگاه نسبت به حالت گیردار میشود که میتواند از لحاظ طراحی مهم باشد.

5-2-3-1-أثر فركانس نيرو بر ارتعاش ميله الاستيك با تكيه گاه ويسكوالاستيك

بررسی مشابهای برای سه حالت، میله الاستیک با تکیهگاه مرزی گیردار، میله الاستیک با تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک و یک تکیهگاه ویسکو-مرزی ویسکوالاستیک و میله الاستیک با تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک و یک تکیهگاه ویسکو-الاستیک در وسط میله، برای نیروی سینوسی $f(t) = 4\sin(2\pi f t)$ در چهار فرکانس (50.70 – 10,30,50,70 – 14z) به انجام شد($\pi c / 2 = t$). مشخصات مواد ویسکوالاستیک به کار رفته مانند جدول (5-2) می، باشد. همانطور که نتایج در شکل (5-20) نشان می دهد با افزایش فرکانس نیرو، تاثیر مواد ویسکوالاستیک در میرایی کاهش پیدا می کند و میرایی در مدت زمان بیشتری اتفاق میافتد. همچنین موجب تغییر در دامنه و فرکانس ارتعاش در مقایسه با حالت ارتعاش میله الاستیک با تکیهگاه گیردار میشود. دلیل این موارد کوچک بودن دوره تناوب نیروی محرک در فرکانسهای زیاد در مقایسه با زمانهای تاخیر مواد ویسکوالاستیک مدلسازی شده با مدل کلوین–ویت تعمیم یافته می اشد، لذا مواد ویسکوالاستیک این موارد کوچک بودن دوره تناوب نیروی محرک در فرکانسهای زیاد در مقایسه با زمانهای تاخیر مواد ویسکوالاستیک مدلسازی شده با مدل کلوین–ویت تعمیم یافته می مشد، لذا مواد ویسکوالاستیک این موارد کوچک بودن دوره تناوب نیروی محرک در فرکانسهای زیاد در مقایسه با زمانهای تاخیر مواد ویسکوالاستیک مدلسازی شده با مدل کلوین–ویت تعمیم یافته می باشد، لذا مواد ویسکوالاستیک این موضوع در شکل (5-19-الف) به خوبی مشاهده گردید که جهت بهبود عملکرد تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک در فرکانس zH مان – انه ای مشاهده گردید که جهت بهبود عملکرد تکیهگاه مرزی درخا

همچنین می توان با استفاده از تکیه گاه میانی ویسکوالاستیک علاوه بر افزایش میرایی و کنترل جابه-جاییها، اثرات تغییرات فرکانس را نیز کنترل نمود.



شکل (۲۰-۵) تاریخچه جابه جایی گره انتهایی میله الاستیک تحت نیروی محرک سینوسی، در چهار فرکانس 10، 30، 50 و70. در هر شکل نتایج ارتعاش میله الاستیک با تکیه گاه گیردار (آبی-خط تیره)، با تکیه گاه مرزی ویسکو-الاستیک (خط قرمز)، با تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک و یک تکیه گاه ویسکوالاستیک در وسط میله (خط مشکی) نشان داده شده است.

علاوه بر موارد ذکر شده باید به این نکته توجه نمود که اعمال نیرویهای هارمونیک با فرکانس کم، شبیه حالتی است که نیرو به تدریج زیاد میشود، لذا اثرات دینامیکی بسیار کمی ظاهر شده و پاسخ مانند حالت شبه پایدار خواهد بود. این موضوع اهمیت بررسی پاسخ دینامیکی در فرکانسهای بالا را نشان میدهد.

3-5- اثر تكيهگاه ويسكوالاستيك بر پديده ضربه قوچ در سيستم لوله

جهت بررسی اثر تکیه گاه ویسکوالاستیک بر پدیده ضربه قوچ در سیستم لوله های الاستیک و ویسکو-الاستیک، از مشخصات بکاررفته در آزمایش انجام شده در دپارتمان مهندسی عمران و محیط زیست ایمپریال کالج لندن که توسط کواس انجام شده است استفاده می شود. علت این انتخاب این است که 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 مورد بررسی قرار داده اند. بنابراین میتوان در اینجا با استفاده از این نتایج به بررسی اثرات تکیه گاه ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن اندرکنش سیال- سازه در پدیده ضربه قوچ پرداخت. مشخصات این آزمایش که در یک سیستم مخزن-لوله-شیر انجام شده است در جدول (5-3) داده شده است.

طول لوله	قطر داخلی لوله	ضخامت ديواره لوله	جرم مخصوص لوله	مدول يانگ	نسبت پواسن	دبی جریان پایدار	هد مخزن	زمان بستن شير
277m	50.6 mm	6.3 mm	5000kg/m3	1.43GPa	0.46	1.011/s	45m	0.09s

جدول (۵-۳) دادههای ورودی مورد نیاز در آزمایش ایمپریال کالج جهت بررسی ضربه قوچ

همچنین مشخصات تابع خزش تطابقی کالیبره شده مواد ویسکوالاستیک که برای آزمایش ایمپریال کالج در لوله ویسکوالاستیک، با $Q_0 = 1.01 \, {\rm l/s}$ و صرف نظر از اصطکاک غیرماندگار در آنالیزهای عددی، از مقاله [Covas et.al, 2005]، در جدول (4-5) 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 آوردن توابع خزش تلون می باند می باند می باند ویسکوالاستیک توابع.

جدول (۴-۵) ضرایب کالیبره شده توابع کرنش خزشی در آزمایش ایمپریال کالج برای I/s ای 20=0.0 و c_f = 395 m/s با صرفنظر از اصطکاک غیرماندگار.

بازہ زمانی	تعداد المان كلوين - ويت	J_0 (10 ⁻¹⁰ Pa ⁻¹)	$ au_{k}$, $J_{k} (10^{-10} \mathrm{Pa^{-1}})$					
20 s	5	5 7.00	$\tau_1 = 0.05 \text{ s}$	$\tau_2 = 0.5 \text{ s}$	τ ₃ =1.5 s	τ ₄ =5 s	τ ₅ =10 s	
			$J_1 = 1.057$	$J_2 = 1.054$	J ₃ =0.9051	$J_4 = 0.2617$	$J_5 = 0.7456$	

قابل توجه است، تعداد المانهای مورد نیاز جهت مدلسازی صحیح رفتار ویسکوالاستیک یک ماده به زمانی که آن ماده به مقدار حدیاش همگرا می شود 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 (HDPE) و از ماده PVC ویسکوزتر میباشد، به همین دلیل زمان-های تاخیر بزرگتر و تعداد المانهای کلوین-ویت بیشتری برای توصیف دقیقتر این ماده ویسکو-الاستیک نیاز است.

5-3-5- لوله الاستيك با اثر كوپله پواسن و اتصال (بدون تكيهگاه VE)

این بخش به منظور مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج تحقیق [2012] و استفاده از آنها در بخشهای بعدی جهت بررسی اثرات تکیهگاه ویسکوالاستیک ارائه شده است. در مرجع مذکور با استفاده از مشخصات جدول (5-3) و فرض لوله الاستیک، نتایج در دوحالت اثر کوپله پواسن به تنهایی (در محل شیر جهت جلوگیری از حرکت محوری شیر تکیهگاه گیردار قرار دارد اما حرکت سایر المانهای لوله ما بین مخزن و شیر در جهت محوری آزاد است) و اثر توام کوپله پواسن و حرکت سایر المانهای لوله ما بین مخزن و شیر در جهت محوری گراد است) و اثر توام کوپله پواسن و خربه تایج کرکت سایر المانهای لوله ما بین مخزن و شیر در جهت محوری آزاد است) و اثر توام کوپله پواسن و محرکت سایر المانهای لوله ما بین مخزن و شیر در جهت محوری کاملا آزاد است) ارائه و با نتایج ضربه قوچ کلاسیک (بدون FSI) مقایسه شده است. در آن برای بدست آوردن نتایج ضربه قوچ کلاسیک، نسبت پواسن برابر صفر در نظر گرفته شده است، در نتیجه سرعت موج فشار با توجه معادله کلاسیک، نسبت پواسن برابر مفر در حالی که اگر نسبت پواسن مقدار برابر 8-30 می باشد در حالی که اگر نسبت پواسن 6-40 باشد این مقدار برابر 8-40 می باشد در حالی که اگر نسبت پواسن 6-40 باشد این مقدار برابر 8-30 می باشد در حالی که اگر نسبت پواسن 6-40 باشد این مقدار برابر مفرد که خواهد برای تغییرات هد فشار در شیر مشاهده نمود که خواهد بود. در شکل (5-21) نتایج مذکور را میتوان برای تغییرات هد فشار در شیر مشاهده نمود که خواهد بود. در شکل (5-21) نتایج مذکور را میتوان برای تغییرات هد فشار در شیر مشاهده نمود که خواهد بود. در شکل (5-21) نتایج مذکور را میتوان برای تغییرات هد فشار در شیر مشاهده نمود که خواهد بود. در شکل (5-21) نتایج مذکور را میتوان برای تغییرات هد فشار در شیر مشاهده نمود که خواهد بود. در شکل (5-21) نتایج مذکور را میتوان برای تغییرات هد فشار در شیر مشاه می می در که در می می می می در می در

همان طور که در شکل(a-21-5) دیده میشود در نتایج FSI سرعت موج فشار و فشار جوکوفسکی $(\rho_f c_f V_0)$ اندکی بیشتر از حالت ضربه قوچ کلاسیک میباشند. این اثرات به وسیله اثر کوپله اتصال متوازن میشوند (شکل (b-21-5)). همچنین FSI، هدهای فشار بیشتری نسبت به حالت ضربه قوچ

کلاسیک ایجاد می کند و زمانی که هر دو کوپله پواسن و اتصال در نظر گرفته می شود، اندکی افزایش هد فشار در نیم سیکل اول ضربه قوچ در مقایسه با نتایج بدست آمده از حالتی که تنها اثر کوپله پواسن در نظر گرفته می شود دیده می شود.



شکل (۲۱-۵) هد فشار در محل شیر در لوله الاستیک. ردیف بالا نتایج تحقیق [2012 Keramat et al.) و ردیف پایین نتایج این تحقیق. a) اثر کوپله پواسن به تنهایی، b) اثر توام کوپله اتصال و پواسن. (گراف قرمز رنگ در دو شکل نتایج ضربه قوچ کلاسیک می باشد)

باید توجه شود زمانی که تنها کوپله پواسن در نظر گرفته می شود یعنی اینکه سیستم از تکیه گاه گیردار مناسب در محل شیر برخوردار است که مانع حرکت آن خواهد شد، همچنین زمانی که کوپله اتصال نیز در نظر گرفته می شود یعنی امکان جابه جایی در محل شیر وجود دارد که البته در نتایج قبل مربوط به حالتی است که شیر به طور کامل در جهت محوری رها و آزاد است. بنابراین استفاده از تکیهگاه ویسکوالاستیک در محل شیر (که قابلیت جابهجایی را دارد) با توجه به سختی آن، حالتی بین این دو است لذا در ادامه نتایج استفاده از تکیهگاه ویسکوالاستیک در لوله الاستیک با نتایج گفته شده مقایسه خواهد شد. البته حالت دیگری نیز در بحث تداخلی وجود دارد و آنکه کوپله اتصال در نظر گرفته شود، ولی کوپله پواسن حذف گردد. انجام این کار مستلزم بکارگیری تکیهگاه های مناسب به تعداد بسیار زیاد در طول لوله است تا از حرکات گرههای لوله در جهت محوری جلوگیری نماید که این کار در عمل امکان پذیر نمی باشد. لذا این حالت بررسی نخواهد شد.

5-3-3- لوله الاستیک با تکیهگاه مرزی (در محل شیر) ویسکوالاستیک

مشخصات مواد ویسکوالاستیک بکار رفته در تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک در جدول (5-5) نشان داده شده است.

سطح مقطع تکیهگاه مرزی	طول تکیهگاه مرزی	$G_{\infty}(\mathrm{Pa})$	پارامترهای تایع رهاسازی تنش					
0.01 m ²	2 m	5×10 ⁵	k	1	2	3		
			$\hat{\tau}_k (10^{-3} \text{ s})$	0.1	1	5		
			$G_k (10^4 \text{ Pa})$	1	7	1		

جدول (۵-۵) مشخصات تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک بکار رفته در محل شیر

نتایج استفاده از تکیهگاه ویسکوالاستیک در لوله الاستیک بخش (5-3-2) با وجود هر دو کوپله پواسن و اتصال در مقایسه با شکل (a-21-5) که تکیهگاه محل شیر، گیردار (تنها اثر کوپله پواسن) و شکل (b-21-5) که شیر در جهت محوری آزاد است، در شکل (2-22) نشان داده شده است. استفاده از تکیهگاه ویسکوالاستیک در محل شیر موجب میشود تا در نیم سیکل اول هد فشار (گراف مشکی) مانند حالتی باشد که حرکت شیر در جهت محوری آزاد است و هر دو کوپله اتصال و پواسن در نظر گرفته میشود (گراف آبی در شکل (c-22-3)) که علت آن وقوع جابهجایی در محل شیر به دلیل استفاده از تکیهگاه ویسکوالاستیک است. اما در نیم سیکل دوم به دلیل ایجاد تقابل بین حرکت



تکیهگاه و موج فشار، هد فشار (گراف مشکی) برابر حالتی خواهد بود که تکیهگاه گیردار در محل شیر است و تنها کوپله پواسن در نظر گرفته میشود (گراف آبی در شکل (a-22-5)).

شکل (۵-۲۲) تاریخچه هد فشار در لوله الاستیک با وجود تکیهگاه ویسکوالاستیک و هر دو اثر کوپله اتصال و پواسن (رنگ مشکی) در محل شیر (ردیف بالا) و در میانه لوله (ردیف پایین). در مقایسه با a) بدون تکیهگاه VE و تنها اثر کوپله پواسن (تکیهگاه شیر گیردار)، b) بدون تکیهگاه VE و هر دو کوپله پواسن و اتصال (حرکت محوری شیر آزاد).

البته در میانه لوله این مقدار کمتر خواهد بود. بنابراین تقریبا میتوان با ثابت نگهداشتن حداکثر هد فشارها نسبت به حالتهای مذکور که با آنها مقایسه انجام شد، تنشهای تکیهگاه را به دلیل تغییر از تکیهگاه گیردار در محل شیر به تکیهگاه ویسکوالاستیک کاست و همچنین جابهجاییها را همانطور که در شکل (5-23) مشاهده میشود میتوان نسبت به حالتی که حرکت شیر در جهت محوری آزاد است و هر دو کوپله اتصال و پواسن در نظر گرفته میشود (گراف مشکی در مقایسه با گراف ممتد آبی) کاهش داد که در اینجا این کاهش در محل شیر به حدود 41 درصد می رسد. همچنین در شکل سمت راست شکل (5-23) که جابهجایی دیواره لوله را در میانه آن نشان می دهد، می توان اثر در نظر گرفتن کوپله پواسن بر جابهجایی دیواره لوله مشاهده نمود. زمانی که تنها اثر کوپله پواسن در لوله در نظر گرفته می شود باید در محل شیر، تکیه گاه گیردار مناسب که مانع حرکت محوری لوله شود نصب گردد لذا در محل شیر جابهجایی برابر صفر خواهد بود (گراف خط تیره آبی رنگ در شکل سمت چپ شکل (5-23))اما با بررسی جابهجایی های محوری در میانه لوله مشاهده می شود در این حالت جابهجایی هایی در لوله وجود دارد (گراف خط تیره آبی رنگ در شکل سمت راست شکل (5-23))که به دلیل در نظر گرفتن کوپله پواسن می باشد که به نوعی لزوم در نظر گرفتن این اثر تداخلی را نشان می دهد. به علاوه در این اشکال می توان اثر تکیه گاه ویسکوالاستیک را بر سرعت پریود جابهجایی دیواره لوله مشاهده نمود.



شکل (۵-۲۳) تاریخچه جابهجایی محوری لوله الاستیک در گره شیر (سمت چپ) و میانه لوله (سمت راست). با تکیه-گاه ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن (رنگ مشکی)، بدون تکیهگاه VE با هر دو کوپله اتصال و پواسن (خط ممتد آبی رنگ)، بدون تکیهگاه VE و تنها اثر کوپله پواسن (خط تیره آبی رنگ)، ضربه قوچ کلاسیک (رنگ قرمز).

در شکل (5-24) ، تاریخچه هد فشار در محل شیر که در شکل (5-22) رسم شدهاند در بازه زمانی بیشتر رسم گردیده است. همانطور که مشاهده می شود اگرچه از تکیه گاه ویسکوالاستیک با



شکل (۵-۲۴) تاریخچه هد فشار رسم شده در ردیف بالای شکل (5-22) در بازه زمانی بیشتر. شکل بالا معادل شکل (a-22-5) و شکل پایین معادل شکل (b-22-5) می باشد.

طول نسبتا زیاد و مواد ویسکوالاستیک با سختی و زمانهای تاخیر کم برای میرایی بیشتر استفاده شده است (جدول (5-5) را مشاهده نمائید) ولی به دلیل طول زیاد لوله اثرات میرایی قابل ملاحظهای در هد فشارها و ارتعاشات آن به دلیل اثرات FSI، چه در زمانهای اولیه و چه با گذشت زمان مشاهده نمی شود. اما می توان اثرات آن را بر تغییرات سرعت موج فشار با گذشت زمان مشاهده نمود. با توجه به زیاد بودن طول لوله استفاده از تکیه گاههای ویسکوالاستیک در طول لوله (تکیه گاههای میانی ویسکوالاستیک) برای رسیدن به میرایی بیشتر می تواند مفید باشد که در بخش بعد بررسی خواهد شد.

5-3-4- لوله الاستیک با تکیه گاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک

برای این منظور از چهار تکیه گاه ویسکوالاستیک در طول لوله در محلهای m $z_1=55.4$ m این منظور از چهار تکیه گاه ویسکوالاستیک در طول لوله در محلهای $z_3=160.2$ m $z_4=221.6$ m $z_3=166.2$ m الاستیک با مشخصات جدول (5-5) در محل شیر استفاده می شود.

سطح مقطع تکیهگاه میانی	طول تکیهگاه میانی	$G_{\infty}(\mathrm{Pa})$	پارامترهای تایع رهاسازی تنش				
0.0049 m ²	1 m	8×10 ⁵	k	1	2	3	
			$\hat{\tau}_k (10^{-2} \text{ s})$	0.1	1	5	
			$G_k (10^6 \text{ Pa})$	0.8	5.6	0.8	

جدول (۵-۶) مشخصات تکیه گاههای میانی ویسکوالاستیک بکار رفته در طول لوله

در شکل (5-25) نتایج هد فشار در گره شیر در لوله الاستیک با در نظر گرفتن هر دو کوپله اتصال و پواسن، در حالتی که از تکیهگاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک استفاده شود (رنگ آبی) در مقایسه با زمانی که تنها از تکیهگاه مرزی استفاده شود(رنگ مشکی) و حالت ضربه قوچ کلاسیک(رنگ قرمز)، نشان داده شده است.

همانطور که در شکل مشاهده می شود هد فشار نسبت به فشار جو کوفسکی، از ابتدا افزایش پیدا



شکل (۵-۲۵) تاریخچه هد فشار در محل شیر با در نظر گرفتن هر دو کوپله اتصال و پواسن در لوله الاستیک با تکیهگاه مرزی VE (رنگ مشکی)، با تکیهگاه مرزی و چهار تکیهگاه میانی VE (رنگ آبی) و ضربه قوچ کلاسیک (رنگ قرمز).

می کند و ارتعاشات آن نیز بیشتر می شود که علت آن افزایش سختی سیستم، به دلیل استفاده از تکیه گاههای میانی است. در این حالت حداکثرِ هد فشار در نیم سیکل اول نیز تقریبا 5.5 درصد کاهش پیدا می کند ولی ماکزیمم هدهای فشاری که در بین کل سیکلها اتفاق می افتد تقریبا در هر دو حالت برابر است. میرایی حاصل از بکار گیری تکیه گاههای ویسکوالاستیک در طول لوله الاستیک علاوه بر محل شیر به دو صورت ظاهر می شود. 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 تقریبا چهار سیکل، کاملا میرا می شود. اما میرایی خود هد فشار با سرعت کمی اتفاق می افتد که حتی پس از گذشت 40 ثانیه، هدهای فشار حداکثر همچنان بیشتر از هدهای فشار ضربه قوچ کلاسیک می باشد که علت آن هم تفاوت زیاد سطح مقطع تکیه گاه در مقایسه با سطح مقطع لوله (²m 0.001) و کم بودن فرکانس موج فشار می باشد.

در شکل(5-26) نتایج هد فشار در گره میانی لوله الاستیک با در نظر گرفتن هر دو کوپله اتصال و پواسن، در حالتی که از تکیهگاه مرزی و میانی ویسکوالاستیک استفاده شود (رنگ آبی) در مقایسه با زمانی که تنها از تکیهگاه مرزی استفاده شود(رنگ مشکی) و حالت ضربه قوچ کلاسیک(رنگ قرمز)، نشان داده شده است.

همانطور که در این شکل دیده می شود در حالت استفاده از تکیه گاه مرزی VE فشارها گهگاهی به دلیل تقابل حرکت تکیه گاه و موج فشار، از فشار ضربه قوچ کلاسیک افزایش می یابد اما با استفاده از تکیه گاههای میانی هد فشار در مقادیر هد فشار معادل ضربه قوچ کلاسیک کنترل خواهد شد. همچنین تغییرات هد فشار از حالت پله ای که در ضربه قوچ کلاسیک وجود دارد خارج خواهد شد. باید به این نکته نیز توجه داشت علاوه بر خواص قابل توجه مواد ویسکوالاستیک در میرایی، همانطور که در شکل (5-27) مشاهده می شود استفاده از تکیه گاههای میانی ویسکوالاستیک منجر به افزایش سختی کل سیستم و کاهش بیشتر جابه جایی های محوری لوله نسبت به حالتی که تنها از تکیه گاه



کلاسیک (رنگ قرمز).

مرزی VE استفاده می شود خواهد شد که این به نوبه خود می تواند باعث کاهش اثر کوپله پواسن و اتصال گردد. همچنین این موضوع می تواند به جلوگیری از پارگی خط لوله با کاهش جابه جایی ها کمک نماید.



شکل (۵-۲۷) تاریخچه جابهجایی دیواره لوله با تکیهگاه مرزی VE (رنگ مشکی) و تکیهگاه مرزی و میانی VE (رنگ آبی)، الف) در گره شیر، ب) در گره میانی لوله.

5-3-5- لوله ويسكوالاستيك با اثر كوپله پواسن و اتصال (بدون تكيهگاه VE)

تا کنون ضربه قوچ در لولههای الاستیک با در نظر گرفتن هر دو کوپله پواسن و اتصال و اثرات تکیه-گاههای ویسکوالاستیک بر آنان بررسی شد. در این بخش ابتدا نتایج ضربه قوچ در لوله ویسکوالاستیک با مشخصات جدول (5-3) و جدول (5-4) با درنظر گرفتن اثرات تداخلی کوپله پواسن و اتصال (بدون تکیهگاه ویسکوالاستیک) با نتایج ارائه شده در مقاله [2012 [keramat et al, 2012] جهت صحت سنجی معادلات و حل آنها (در مرجع مذکور معادلات بر حسب تابع خزش نوشته شده و حل گردیده است اما در این تحقیق به منظور پیاده سازی شرط مرزی تکیهگاه ویسکوالاستیک معادلات بر حسب تابع رهاسازی تنش نوشته و حل شدهاند) مقایسهای صورت میگیرد. بنابراین فرض میشود که هیچگونه تکیهگاه محوری در سرتا سر لوله وجود ندارد به طوری که اثر کوپله پواسن به طور کامل ایجاد گردد. همچنین با فرض امکان جابجایی شیر به طور کامل، اثر تداخلی اتصال نیز به وجود میآید. سپس این نتایچ جهت بررسی اثرات تکیهگاه ویسکوالاستیک بر اثرات تداخلی ضربه قوچ در لولههای ویسکو-الاستیک، در بخشهای بعدی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

پارامترهای تابع رهاسازی تنش معادل ماده ویسکوالاستیک بکار رفته در آزمایش ایمپریال کالج لندن با پارامترهای تابع خزش تطابقی جدول (5-4) ، در جدول (5-7) آورده شده است.

بازه	تعداد المان	G_{∞} (10 ⁸ Pa)	$\hat{\tau}_k$ (s) , G_k (10 ⁸ Pa)						
زمانی	كلوين – ويت								
20 s	5	9.0716	$\hat{\tau}_1 =$	$\hat{\tau}_2 =$	$\hat{\tau}_3 =$	$\hat{\tau}_4 =$	$\hat{\tau}_5 =$		
			0.0433 s	0.4402 s	1.3700 s	4.8705 s	9.3551 s		
			$G_1=$	$G_2=$	$G_3=$	$G_4=$	$G_5=$		
			1.9369	1.5246	0.8980	0.2617	0.5930		

جدول (۵-۷) پارامترهای تابع رهاسازی تنش معادل ماده ویسکوالاستیک بکار رفته در آزمایش ایمپریال کالج لندن با پارامترهای تابع خزش تطابقی جدول (5-4)

درشکل (FSI) نتایج هد فشار در لولههای ویسکوالاستیک بدون FSI (گراف قرمز)، با اثر کوپله پواسن (گراف آبی در شکلهای ستون (a)) و با اثر هر دو کوپله پواسن و اتصال (گراف آبی در شکل- های ستون (b)) نشان داده شده است. شکلهای ردیف بالا مربوط به نتایج مرجع (keramat et.al, [2012 و ردیف پایین مربوط به نتایج این تحقیق میباشد که کاملا با یکدیگر همخوانی دارند. قابل ذکر است در اشکال مربوط به مرجع مذکور نتایج با استفاده از دو روش عددی متفاوت تماماً MOC و MOC-FEM حاصل شدهاند. در این گراف ها، خط چینها مربوط به روش تماماً MOC هستند که به منظور متمایز شدن، به اندازه t=0.1s به سمت راست انتقال داده شدهاند.

با توجه به اشکال، اثر ویسکوالاستیسیته منجر به ایجاد یک میرایی قابل ملاحظه در نتایج هد فشار ضربه قوچ می شود اما اثر FSI همچنان به شکل یک افزایش فشار (که بیـشتر از فشار جوکوفسکی



شکل (۲۸-۵) هد فشار در محل شیر در لوله ویسکوالاستیک. ردیف بالا نتایج تحقیق [2012. Keramat et al)، و ردیف پایین نتایج این تحقیق. a) اثر کوپله پواسن به تنهایی، b) اثر توام کوپله اتصال و پواسن. (گراف قرمز رنگ در دو شکل نشان دهنده نتایج ضربه قوچ در لوله ویسکوالاستیک بدون FSI می باشد)

است) در لحظات اولیه پس از غیرماندگاری سیستم و همچنین ارتعاشات هد فشار حاکم است. کاهش فرکانس، که یک ویژگی عمده اثر تداخلی است در لولههای ویسکوالاستیک نیز همچنان وجود دارد.

افزایش فشار ایجاد شده در نتایج این بخش که مربوط به FSI در لولههای ویسکوالاستیک میباشد ضرورت انجام آنالیزهای تداخلی را برای سیستمهای با اهمیت بالا، جهت تعیین حداکثر تنش وارده بر لوله، نشان میدهد.

با مقایسه ماکزیمم فشارهای حاصله در محلهای مختلف لوله، نشان میدهد که همواره نقاط بحرانی که در معرض تنشهای بالا هستند، نقاطیاند که به منشا ایجاد کننده اثر تداخلی (در اینجا شیر) نزدیکترند، بنابراین این نقاط نیاز به محافظت بیشتری دارند.

5-3-5- لوله ويسكوالاستيك با تكيه گاه مرزى (در محل شير) ويسكوالاستيک

مواد ویسکوالاستیک دیواره لوله طبق جدول (5-4) و مواد ویسکوالاستیک بکار رفته در تکیهگاه مرزی طبق جدول (5-5) میباشند. نتایج این بررسی در شکل (5-29) نشان داده شده است. در شکل (5-29-1لف) نتایج هد فشار در محل شیر برای سه حالت لوله ویسکوالاستیک بدون FSI (گراف قرمز)، با هر دو کوپله اتصال (حرکت لوله در جهت محوری در محل شیر آزاد است) و پواسن (گراف مشکی) و با هر دو کوپله اتصال (حرکت لوله در جهت محوری در محل شیر آزاد است) و پواسن (گراف مشکی) و با هر دو کوپله اتصال (حرکت لوله در جهت محوری در محل شیر آزاد است) و پواسن (گراف مشکی) و با هر دو کوپله اتصال (حرکت لوله در جهت محوری در محل شیر آزاد است) و پواسن (گراف مشکی) و با هر دو کوپله اتصال (حرکت لوله در جهت محوری در محل شیر آزاد است) و پواسن (گراف مشکی) و مست. نتایج گره میانی لوله (m تا 138.75) در این سه حالت نیز در شکل (5-29-ب)رسم شده است. نتایج گره میانی لوله (m تا 138.75) در این سه حالت نیز در شکل (5-29-ب)رسم شده است. تقابل حرکت تکیهگاه و موج فشار دسبت به زمانی که اثر کوپله اتصالی که در آن شیر در جهت محوری رهاست (گراف مشکی) افزایش سختی و موری رهاست (گراف میکی) افزایش سختی و موری در محل در گره شیر به دلیل افزایش سختی و محوری رهاست (گراف مشکی) افزایش ییدا میکند. این افزایش در گره میانی لوله کمتر خواهد بود. محوری رهاست (گراف مشکی) افزایش پیدا میکند. این افزایش در گره میانی لوله کمتر خواهد بود. محوری رهاست (گراف مشکی) افزایش پیدا میکند. این افزایش در گره میانی لوله کمتر خواهد بود.



شکل (۵-۲۹) تاریخچه هد فشار لوله ویسکوالاستیک در سه حالت بدون FSI (گراف قرمز)، با هر دو کوپله اتصال و پواسن (گراف مشکی) و با هر دو کوپله اتصال و پواسن و وجود تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک در محل شیر (گراف آبی). الف) گره شیر، ب)گره وسط لوله

دوم که ناشی از اثرات FSI میباشد کاهش یابد. البته افزایش هد فشار در این سیکل از آنجایی که از ماکزیمم هد فشاری که در نیم سیکل اول اتفاق می افتد کمتر است، مشکلی را از نظر طراحی ایجاد نمی نمی اید در حالی که میرایی ارتعاشات هد فشاری که اتفاق میافتد میتواند به بهبود عملکرد لوله در مقابل پدیده خستگی کمک نماید. افزایش اندک هد فشار در نیم سیکل اول نیز ناشی از پاسخ آنی مواد ویسکوالاستیک تکیهگاه و وقوع جابهجایی در آن که متناسب با $J_0=1/E$ است، میافتد. اثر تکیه-مواد ویسکوالاستیک تکیهگاه و وقوع جابهجایی در آن که متناسب با $J_0=1/E$ است، میافتد. اثر تکیه-مواد ویسکوالاستیک بر میرایی هد فشار با گذشت زمان در مقابل اثر میرایی مواد ویسکوالاستیک دیواره لوله بسیار ناچیز خواهد بود. علاوه بر مزیتهایی که ناشی از استفاده از تکیه گاه ویسکوالاستیک در بالا اشاره شد، می توان به کاهش جابه جایی های محوری لوله که ناشی از تنش های محوری در دیواره لوله است اشاره نمود. بدین صورت می توان خسارات ناشی از آن را، مانند پارگی خط لوله و اتصالات را کنترل نمود (شکل (5-30) را ببینید). همچنین می توان تنش های تکیه گاه را به دلیل قابلیت ارتجاعی تکیه گاه ویسکوالاستیک کاهش داد.



شکل (۵-۳۰) تاریخچه جابهجایی دیواره لوله ویسکوالاستیک ناشی از پدید ضربه قوچ بدون در نظر گرفتن FSI (گراف قرمز)، با هر دو کوپله اتصال (در جهت محوری آزاد) و پواسن (گراف مشکی) و وجود تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک و هر دو کوپله اتصال و پواسن (گراف آبی)

5-3-7- لوله ويسكوالاستيك با تكيه گاه مرزى و ميانى ويسكوالاستيك

اگر چنانچه مانند بخش (5-3-4-) از چهار تکیه گاه ویسکوالاستیک با مشخصات جدول (5-6) علاوه بر تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک استفاده شود، نتایج در شکل (5-31) برای دو گره، شیر (شکل (5-13-الف)) و گره میانی لوله (شکل (5-31-ب)) در سه حالت مذکور بخش قبل رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود ماکزیمم هد فشار در نیم سیکل اول در محل شیر کاهش پیدا کرده است و حالت تغییرات آن نیز عوض شده است که ناشی از بروز حالت میرایی در هد فشار می باشد. در لوله های ویسکوالاستیک به دلیل میرایی که در هد فشار در هر سیکل با گذشت زمان اتفاق می افتد، بر خلاف لوله های الاستیک، ماکزیمم هد فشار در نیم سیکل اول رخ می دهد، بنابراین کاهش این هد فشار، منجر به کاهش ماکزیمم هد فشار، در کل دوره زمانی وقوع جریان غیرماندگار می شود. همچنین



شکل (۵-۳۱) تاریخچه هد فشار در لوله ویسکوالاستیک در سه حالت بدون FSI (گراف قرمز)، با هر دو کوپله اتصال و پواسن (گراف مشکی) و با هر دو کوپله اتصال و پواسن و وجود تکیهگاه مرزی و چهار تکیهگاه میانی ویسکوالاستیک در طول لوله (گراف آبی). الف) گره شیر، ب)گره وسط لوله

بر خلاف لوله الاستیک با تکیهگاههای مرزی و میانی مشابه، میرایی ارتعاشات هد فشار در سیکلهای اولیه نیز مشاهده می شود. قابل ذکر است در این حالت، جابه جایی های محوری مانند بخش (5-3-4-) به دلیل وجود تکیه گاههای میانی بسیار کاهش پیدا می کند.

فصل ششم

خلاصه، نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات
6-1- خلاصه

دراین پایاننامه ابتدا به طور اجمالی مسائل کلی مرتبط با این تحقیق مانند ضربه قوچ، اندرکنش سیال-سازه در لولهها و مواد ویسکوالاستیک معرفی گردید. سپس با توجه به هدف این پایاننامه که بررسی اثرات تکیهگاههای ویسکوالاستیک بر اندرکنش سیال - سازه در هنگام وقوع پدیده ضربه قوچ در یک سیستم مخزن-لوله-شیر میباشد، معادلات و روابط مورد نیاز ارائه شد. برای این منظور معادلات حاکم بر حرکت سیال در جریان غیرماندگار، معادله ارتعاش محوری سازه لوله به دلیل در نظر گرفتن اثرات تداخلی پواسن و اتصال و بارگذاریهای هیدرولیکی وارد بر آن، شرایط اولیه و روابط مرزی به در یاز ارائه شد. برای این منظور معادلات حاکم بر حرکت سیال در جریان غیرماندگار، معادله ارتعاش محوری سازه لوله به دلیل در نظر گرفتن اثرات تداخلی پواسن و اتصال و بارگذاریهای هیدرولیکی وارد بر آن، شرایط اولیه و روابط شرایط مرزی به ویژه تکیهگاه ویسکوالاستیک که برای اولین بار در این تحقیق مورد بررسی قرار شرایط است استخراج گردید.

مواد ویسکوالاستیک در این تحقیق با استفاده از مدل مکانیکی کلوین-ویت تعمیم یافته توصیف و روابط ساختاری حاکم بر آن مدل (روابط تنش و کرنش) وتوابع خزش تطابقی و رهاسازی تنش که رفتار خزشی و رهاسازی این مواد را توصیف میکنند معرفی شدند. در این تحقیق از فرم انتگرالی روابط ساختاری استفاده گردید. برای 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 قبل ارائه مینماید، استفاده شد.

در اینجا دو اثر تداخلی اتصال و پواسن در آنالیز پدیده ضربه قوچ در نظر گرفته شده است. در واقع به دلیل استفاده از تکیهگاه ویسکوالاستیک در محل شیر و در طول لوله و قابلیت ارتجاعی که این نوع تکیهگاهها دارند (به دلیل وقوع جابهجایی در محل شیر) کوپله اتصال اتفاق خواهد افتاد. همچنین برای جلوگیری از کوپله پواسن باید کل طول لوله به نحوی مناسب ثابت شوند که هیچ یک از بخش-های لوله جابهجا نشوند، که این کار در واقعیت به طور کامل امکان پذیر نمیباشد. به همین دلیل هر دو کوپله در نظر گرفته میشود. اثر تداخلی پواسن توسط نسبت پواسن بر اساس پارمترهای سازهای (جملهای مربوط به تغییر مکان محوری المان) در معادلات هیدرولیکی و بر اساس پارامترهای هیدرولیکی (جملات مربوط به فشار) در معادلات سازهای وارد خواهد شد. کوپله اتصال نیز اثری است که در شرایط مرزی هیدرولیکی و سازهای معادلات اعمال میشود. به این ترتیب که در شرایط مرزی هیدرولیکی از پارامترهای سازهای و در شرایط مرزی سازهای از پارامترهای هیدرولیکی برای تحلیل استفاده میشود. بدیهی است، در صورتی که در شبکه، اتصالاتی کاملاً مهار شده وجود داشته باشد، این وابستگی شرایط مرزی سازهای و هیدرولیکی از بین میرود و عامل کوپله اتصال نیز حذف

از آنجایی که اثر تکیه گاه ویسکوالاستیک هم در لوله های الاستیک و هم در لوله های ویسکوالاستیک مورد ارزیابی قرار می گیرد، معادلات هیدرولیکی و سازه ای برای هر دو نوع لوله با در نظر گرفتن اثرات تداخلی اتصال و پواسن، به نحوی که بتوان شرط مرزی خاص تکیه گاه ویسکوالاستیک را در معادلات پیاده نمود ارائه شدند.

معادلات با استفاده از روش MOC-FEM حل گردیدند. در واقع معادلات هیدرولیکی با استفاده از روش خطوط مشخصه (MOC) و معادلات سازهای با استفاده از روش اجزای محدود به همراه روش های انتگرالگیری مستقیم (مانند روش نیومارک β)، حل می شوند. مزیت این روش در مجزا حل شدن معادلات سازهای و هیدرولیکی نسبت به یکدیگر است که این موضوع این امکان را فراهم می-سازد که بتوان مسئله را برای شرایط پیچیدهتر مانند شرط مرزی تکیه گاه ویسکوالاستیک تعمیم داد. اما از آنجایی که کوپله پواسن در نظر گرفته شده است باید از یک فرایند تکرار در هر گام زمانی برای همگرا شدن مقادیر سازهای و هیدرولیکی در هر دو معادله استفاده از می موضوع این امکان را فراهی می-مازد که بتوان مسئله را برای شرایط پیچیدهتر مانند شرط مرزی تکیه گاه ویسکوالاستیک تعمیم داد. ما از آنجایی که کوپله پواسن در نظر گرفته شده است باید از یک فرایند تکرار در هر گام زمانی برای همگرا شدن مقادیر سازهای و هیدرولیکی در هر دو معادله استفاده شود. همچنین برای همگرایی مقادیر در مرزها به دلیل در نظر گرفتن کوپله اتصال فرایند تکرار نیاز میباشد.

در نهایت با تهیه برنامه کامپیوتری بر مبنای این روش، با بررسی مثالهای نمونه اثرات تکیهگاه ویسکوالاستیک مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در فصل پنجم ارائه شد.

2-6- نتيجه گيرى

پس از بررسیها و مطالعاتی که در زمینه اثرات تکیهگاه ویسکوالاستیک انجام شد نتایج کلی زیر حاصل گردید که در دو بخش ارائه می شود. جهت مشاهده نتایج جزئی تر می توان به تفسیرهای ارائه شده برای اشکال رسم شده در فصل پنجم مراجعه نمود.

6-2-1- اثرات تکیهگاه ویسکوالاستیک در بررسی ارتعاش محوری میله

- رفتار تاخیری مواد ویسکوالاستیک و ناحیه پلیمری، با مشاهده تغییرشکلهای باقیمانده در میله و تغییر در فرکانس و دامنه ارتعاشات آشکار می شود و باید دقت داشت که میزان این تغییرات به مشخصات مصالح ویسکوالاستیک مورد استفاده در میله و تکیه گاهها بستگی دارد.
- در میله الاستیک، استفاده از تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک به جای تکیه گاه گیردار، میتواند باعث میرایی ارتعاشات و کاهش جابه جایی ها با گذشت زمان شود. اگر چنانچه در طول میله علاوه بر مرز، از تکیه گاه ویسکوالاستیک با مشخصات مناسب استفاده گردد میتوان میرایی ارتعاشات را به میزان قابل توجهی افزایش و جابه جایی ها را به طور قابل ملاحظه ای کاهش داد.
- زمانی که در ارتعاش میله ویسکوالاستیک از تکیه گاه مرزی ویسکوالاستیک استفاده می شود، تاثیر چندانی در مقایسه با تاثیر خواص پلیمری خود میله بر میرایی نوسانات ندارد، اما بکار گیری تکیه گاه ویسکوالاستیک با مشخصات مناسب در طول میله می تواند کمک شایانی به کاهش حداکثر جابه جایی ها و جلو گیری از افزایش صعودی جابه جایی با گذشت زمان در میله، که ناشی از رفتار خزشی مواد ویسکوالاستیک میله می باشد، نماید.
- بکار گیری تکیه گاههای ویسکوالاستیک باعث کاهش مقدار و تغییرات تنش در میله و تکیه گاهها
 با گذشت زمان شده و می تواند عملکرد مصالح را در برابر پدیده خستگی بهبود بخشد.

5. بررسی مشخصات تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک بر ارتعاش محوری میله الاستیک تحت نیروی محرک ثابت پلهای نشان داد که افزایش طول تکیهگاه، موجب کاهش فرکانس ارتعاش میله و افزایش مقدار و سرعت میرایی خواهد شد. همچنین جابهجاییهای اولیه و جابهجاییهای نهایی میله پس از میرایی نوسانات نیز افزایش میابد. البته افزایش جابهجایی نهایی میله به دلیل عدم میله پس از میرایی نوسانات نیز افزایش می یابد. البته افزایش جابهجایی نهایی میله به دلیل عدم حذف بارگذاری می باشد و از آنجایی که بیشتر نیروهای دینامیکی مانند زلزله و انفجار پریودیک میابشند و پس از مدتی از روی سیستم برداشته میشوند، این افزایش جابهجایی در مقابل حاصیت میرایی که این مواد از خود نشان می دهند دارای اهیمت کمتری است.
نتایج نشان داد که تغییرات ∞6 (یکی از پارامتر تابع رهاسازی تنش ماده ویسکوالاستیک) تکیهگاه نتایج نشان داد که تغییرات ∞6 (یکی از پارامتر تابع رهاسازی تنش ماده ویسکوالاستیک) تکیهگاه ندارد. بیشتر تاثیر تغییرات آن بر جابهجاییهای نهایی میله پس از میرایی نوسانات است.
مه، مراز میرایی به جاییهای اولیه، فرکانس ارتعاش و درصد میرای به ویژه در ∞6های کم، ندارد. بیشتر تاثیر تابع رهاسازی تنش ماده ویسکوالاستیک) تکیهگاه تاثیر چندانی بر جابهجاییهای اولیه، فرکانس ارتعاش و درصد میرای به ویژه در ∞6های کم، ندارد. بیشتر تاثیر تغییرات آن بر جابهجاییهای نهایی میله پس از میرایی نوسانات است.
مه، موجب افزایش جابهجاییهای اولیه و درصد میرایی میگرد.

تغییرات $\hat{\tau}_k$ ها (زمان تاخیر رهاسازی) نیز بر جابهجاییهای نهایی و همچنین برخلاف G_k ها، بر جابهجایی اولیه و فرکانس نیز تاثیر ندارد. اثر مهم $\hat{\tau}_k$ بر میرایی است به نحوی که کاهش $\hat{\tau}_k$ ها منجر به افزایش قابل ملاحظه در مقدار و سرعت میرایی می شود.

6. نتایج ارتعاش محوری میله با تکیه گاه ویسکوالاستیک تحت نیروی سینوسی نشان داد که استفاده از تکیه گاه ویسکوالاستیک جهت میرایی نوسانات در نیروهایی با فرکانسهای پایین بسیار موثر است و در نیروهایی با فرکانس های بالا این کارایی بسیار وابسته به زمان های تاخیر می باشد و می بایست از موادی با زمان های تاخیر کمتر استفاده نمود. علت این امر، کوچک بودن دوره تناوب نیروی محرک در فرکانسهای زیاد در مقایسه با زمان تاخیر مواد ویسکوالاستیک می باشد.

6-2-2- اثرات تکیهگاه ویسکوالاستیک در پدیده ضربه قوچ در لوله

- در نتایج FSI سرعت موج فشار و فشار جو کوفسکی (*p_fc_fV₀*) اند کی بیشتر از حالت ضربه قوچ کلاسیک میباشند. این اثرات به وسیله اثر کوپله اتصال اند کی متوازن می شوند (البته اثرات کوپله اتصال به سختی سیستم بسیار وابسته است). زمانی که هر دو کوپله پواسن و اتصال در نظر گرفته می شود، اند کی افزایش هد فشار در نیم سیکل اول ضربه قوچ در مقایسه با نتایج بدست آمده از حالتی که تنها اثر کوپله پواسن در نظر گرفته می شود دیده می شود. با استفاده از تکیه گاه می شود. با استفاده از تکیه گاه ویسکوالاستیک با مشخصات مناسب در محل شیر می توان با ثابت نگهداشتن حداکثر هد فشارها نسبت به حالتی که حرکت شیر به تعییر از تکیه گاه ویسکوالاستیک با مشخصات مناسب در محل شیر می توان با ثابت نگهداشتن حداکثر هد فشارها نسبت به حالتهای مذکور، تنشهای تکیه گاه را به دلیل تغییر از تکیه گاه گیردار در محل شیر به تکیه گاه ویسکوالاستیک کاست و همچنین جابه جایی ها را نسبت به حالتی که حرکت شیر در جهت محوری آزاد است حدود 40 درصد کاهش داد. اما سرعت موج فشار به دلیل افزایش سختی ناشی از تکیه گاه ویسکوالاستیک نسبت به حالتی که درصد کاهش داد. اما سرعت موج فشار به دلیل گرفتن کوپله اتصال، شیر در جهت محوری آزاد است حدود 40 درصد کاهش داد. اما سرعت موج فشار به دلیل آزاد است محروی آزاد است حدود 40 درصد کاهش داد. اما سرعت موج فشار به دلیل افزایش سختی ناشی از تکیه گاه ویسکوالاستیک نسبت به حالتی که حرکت شیر در جهت محوری آزاد است حدود 40 درصد کاهش داد. اما سرعت موج فشار به دلیل افزایش سختی ناشی از تکیه گاه ویسکوالاستیک نسبت به حالتی که برای در نظر گرفتن کوپله اتصال، شیر در حمه تموری رهاست، بیشتر خواهد شد.
- در لولههای الاستیک با طول زیاد، استفاده تنها از تکیهگاه مرزی ویسکوالاستیک، اثرات میرایی قابل ملاحظهای را در هدهای فشارها و در ارتعاشات آن به دلیل اثرات FSI، چه در زمانهای اولیه و چه با گذشت زمان ایجاد نخواهد نمود. در این حالت استفاده از تکیهگاههای میانی ویسکوالاستیک توصیه می شود.
- 3. استفاده از تکیه گاههای ویسکوالاستیک در طول لوله الاستیک به تعداد و مشخصات مناسب، باعث میشود با گذشت زمان، هدهای فشار و ارتعاشات ناشی از FSI آن میرا شود. این موضوع می تواند به ویژه در شرایطی که چه از لحاظ فنی و چه از لحاظ اقتصادی امکان تعویض مصالح کل سیستم به مواد ویسکوالاستیک نمی باشد، بسیار کارآمد و مفید باشد. 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.

- 4. اثر ویسکوالاستیسیته دیواره لوله منجر به ایجاد یک میرایی قابل ملاحظه در نتایج ضربه قوچ می شود به طوری که ماکزیمم هد فشار بر خلاف لوله الاستیک در نیم سیکل اول اتفاق می افتد. در نتایج حاصله از آنالیز لولههای ویسکوالاستیک با FSI دیده می شود که افزایش فشار مازاد بر فشار جوکوفسکی در لولههای ویسکوالاستیک به مراتب بیشتر بوده، لذا میتواند اثرات مخرب بیشتری داشته باشد. این موضوع از توجه به مدول الاستیسیته و سرعت موج کمتر مواد ویسکوالاستیک ویسکوالاستیک با می می شود که افزایش فشار مازاد بر فشار جوکوفسکی در نیم سیکل اول اتفاق می افتار مازاد بر فی در نتایج حاصله از آنالیز لولههای ویسکوالاستیک به مراتب بیشتر بوده، لذا میتواند اثرات مخرب ویسکوالاستیک به مراتب بیشتر موده، دا میتواند اثرات مخرب و سرعت موج کمتر مواد ویسکوالاستیک و نسبت پواسن بزرگتر آنها در مقایسه با مواد الاستیک فهمیده می شود.
- 5. در لولههای ویسکوالاستیک اثر تکیهگاههای ویسکوالاستیک بر میرایی هد فشار با گذشت زمان در مقابل اثر میرایی مواد ویسکوالاستیک دیواره لوله بسیار ناچیز خواهد بود، اما در زمانها و سیکلهای اولیه میتواند به میرایی ارتعاشات هد فشار ناشی از FSI کمک نماید. همچنین در اینجا با استفاده از تکیهگاههای میانی ویسکوالاستیک، هد فشار نیم سیکل اول که در لولههای ویسکوالاستیک ماکزیمم هد فشار نیز میباشد، در حدود 5.5 درصد کاهش پیدا کرده است.
- 6. همانگونه که انتظار میرود اگر اتصالات مانند شیر و تقاطع آزاد باشند باعث میشود فشارهای ماکزیمم قدری کاهش پیدا کنند. که علت آن حرکت سازه اتصال مورد نظر و صفر نشدن آنی سرعت مطلق سیال (در بستنهای آنی) میباشد. اما 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 که این به نوبه خود می تواند باعث کاهش از کوپله پواسن و اتصال و ا

مانع از خسارات ناشی از آن مانند پارگی خط لوله گردد. همچنین این موضوع باعث کاهش تنشها در تکیهگاهها نسبت به حالت گیردار نیز خواهد شد.

3-6- پیشنهادات 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 و این رساله، تنها گام کوچکی در این زمینه به شمار میرود. 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 تکیه گاه ویسکوالاستیک 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. اکنون با آماده شدن برنامهای برای آنالیز دینامیکی، میتوان در زمینه طراحی و کشف نکات مهم و موثر برای ارایه یک طرح خوب کار کرد. 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).
- روش خطوط مشخصه برای تحلیل جریان غیرماندگار روش بسیار دقیقی است ولی محدودیت هایی دارد. یکی از این محدودیتها نسبت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ است که باید همواره برابر با سرعت موج در لوله باشد. در یک خط لولهٔ 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 شبکهٔ لوله که از لولههای

با جنس و قطر متفاوت تشکیل شده است، مقدار سرعت موج فشاری در هر کدام از لولهها می تواند متفاوت باشد. از طرفی چون کل شبکه در یک پروسهٔ حل واحد تحلیل می گردد، طول بازهٔ زمانی برای کل مسأله باید مقداری ثابت باشد. بنابراین مقدار Δx در هر لوله با توجه به سرعت موج در آن تعیین میشود. بنابراین ممکن است طول لوله به گونهای باشد که در تقسیم بندی لوله به بازههای Δx ، قطعهای از لوله مقدار کمتری پیدا کند. در این حالت در تقسیم بندی لوله به بازههای میگرد در این حالت باشد. بنابراین مقدار تعدید که توجه به سرعت موج در آن تعیین میشود. بنابراین ممکن است طول لوله به گونهای باشد که در تقسیم بندی لوله به بازههای Δx ، قطعهای از لوله مقدار کمتری پیدا کند. در این حالت استفاده از اینترپولاسیون میتواند خطای بسیار زیادی وارد محاسبات کند. لذا بکارگیری تکیه گاههای ویسکوالاستیک در شبکه لولهها و 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 فرض شده است نیروهای وارده از طرف لوله بر تکیهگاههای ویسکوالاستیک
 به صورت محوری اعمال می شود که می توان آن را برای حالتی که نیروها به صورت برشی
 اعمال می شوند تعمیم داد و بررسی نمود.
- می توان آنالیز اثرات تکیه گاه ویسکوالاستیک و اندر کنش سیال-سازه را با در نظر گرفتن
 معادلات خمشی و پیچشی سازه لوله تکمیل نمود.
- در این تحقیق از روش MOC_FEM استفاده شده است که می توان از روش تماما اجزای محدود (full FEM) استفاده و نتایج را با تحقیق حاضر مقایسه نمود.
- می توان پدیده ضربه قوچ در لولههای الاستیک و ویسکوالاستیک با تکیه گاههای ویسکو الاستیک را در حوزه فرکانس مورد بررسی قرار داد.



پيوست الف: معادله پايستاري مومنتوم [كرامت 1389]

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 می شوند. از اثرات سختی خمشی ٔ، اینرسی دورانی ٔ و تغییر شکل برشی عرضی صرفنظر می گردد. این فرضیات به عنوان فرضیات امواج با طول موجهای بلند ^{*} خوانده می شوند. از اثرات سختی خمشی ٔ، اینرسی دورانی ٔ و تغییر شکل برشی عرضی صرفنظر می گردد. این فرضیات به عنوان فرضیات امواج با طول موجهای بلند ^{*} خوانده می شوند. از اثرات سختی خمشی ٔ، اینرسی دورانی ٔ و تغییر شکل برشی عرضی صرفنظر می گردد. این فرضیات به عنوان فرضیات امواج با طول موجهای بلند ^{*} خوانده می شوند. در این فرمولاسیون، متغیرها عبارتند از مار می مره می مره و مره می مواج با طول موجهای همگی توابعی از z و $r_{r} = r_{rr}$ که می می می می می مصالح لوله r_{r} ثابت می باشد و اثرات ترمهای همرفتی ^{*} همانند این ترمها در معادلات پیوستگی و مومنتم سیال ناچیز فرض می شود (فرضیات همود (فرضیات موجری). اکوستیک). نیروی بدنی محوری [°] به صورت θ مومنتم در جهت محوری به عوری از معادلات پیوستگی و مومنتم سیال ناچیز فرض می شود (فرضیات گرفته می شود (فرضیات گرفته می شود). کرم می می موری به عنوان فرضیات ترمهای گرفته می شود (فرضیات گرفته می شود (ور جهت محوری به صورت روابط تعادل مومنتم در جهت محوری به صورت:

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

و در جهت شعاعی به صورت:

$$\rho_{t} \frac{\partial \dot{u}_{r}}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial (r\sigma_{r})}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} - \frac{\partial \sigma_{\phi}}{r}$$
(2-1)

مىباشند.

¹ Bending stiffness

² Rotary inertia

³ Long wavelength approximation

- (

⁴ Convective terms

⁵ Axial body force

جهت حصول یک فرمولاسیون یک بعدی (فقط بر حسب $t \in z$) 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 شعاع معادلات فوق در $2\pi r$ ضرب میشوند و سپس نسبت به r از R الی R+e انتگرالگیری شده (R شعاع داخلی لوله و g ضخامت دیواره لوله است.) و بر g(r+e/2)e تقسیم میشوند. همچنین نیروی برشی که نسبت به امتداد محوری متقارن میباشد، $r_r r_r dr$ ، (جمله موجود در سمت راست فرم انتگرالگیری شده می گردد. پس از این که نسبت به معادله (الف 2)) با توجه به فرضیات تقریب با طول موج بلند حذف می گردد. پس از این عملیات با توجه به شکل (g-g)، معادله حرکت در جهت محوری به صورت :

$$\rho_{t} \frac{\partial \bar{u}_{z}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{\sigma}_{z}}{\partial z} + \frac{R+e}{\left(R+\frac{e}{2}\right)e} \tau_{zr} \Big|_{r=R+e} - \frac{R}{\left(R+\frac{e}{2}\right)e} \tau_{zr} \Big|_{r=R} + \rho_{t}g\sin\theta$$
(3-1)

و معادله حرکت در جهت شعاعی به شکل

$$\rho_{t} \frac{\partial \dot{u}_{r}}{\partial t} = \frac{R+e}{\left(R+\frac{e}{2}\right)e} \sigma_{r} \Big|_{r=R+e} - \frac{R}{\left(R+\frac{e}{2}\right)e} \sigma_{r} \Big|_{r=R} - \frac{1}{R+\frac{e}{2}} \overline{\sigma}_{\phi}$$
(4-ibi)

:خواهد بود که در آنها $\overline{\sigma}_{\phi}, \overline{\sigma}_z, \overline{\dot{u}}_r, \overline{\dot{u}}_z$ مقادیر متوسط گیری شده از متغیرهای $\sigma_{\phi}, \overline{\sigma}_z, \overline{\dot{u}}_r, \overline{\dot{u}}_z$ خواهد بود که در آنها

$$\overline{\dot{u}}_{z} = \frac{1}{2\pi \left(R + \frac{e}{2}\right)e} \int_{R}^{R+e} 2\pi r \dot{u}_{z} dr$$
(5-الف)

$$\overline{\dot{u}}_{r} = \frac{1}{2\pi \left(R + \frac{e}{2}\right)e} \int_{R}^{R+e} 2\pi r \dot{u}_{r} dr$$
(6-الف)

$$\overline{\sigma}_{z} = \frac{1}{2\pi \left(R + \frac{e}{2}\right)e} \int_{R}^{R+e} 2\pi r \sigma_{z} dr$$
(7-الف)

$$\bar{\sigma}_{\phi} = \frac{1}{e} \int_{R}^{R+e} \sigma_{\phi} dr$$
(8-الف)

معادلات حرکت ارایه شده تا اینجا، سرعتهای محوری u_z را به تنشهای محوری σ_z و سرعتهای شعاعی u_r را به تنشهای محوری σ_{ϕ} و سرعتهای شعاعی u_r را به تنشهای محیطی σ_{ϕ} مرتبط می نمایند. این روابط برای لولههای ویسکوالاستیک یا پلاستیک و حتی در شرایطی که سیستم لوله تحت تأثیر تغییر شکلهای عرضی بزرگ قرار گیرد نیز صادق می باشند [Paidussis, 1998].

حال می توان معادله پایستاری مومنتم^۲ را بااستفاده از رابطه (الف-3) با توجه به رابطه زیر که نظر به رفتار سیال و سازه در مرز تماس آنها در دیواره لوله حاصل گردیده است، بدست آورد.

$$\tau_{zr}|_{r=R} = -\tau_0, \qquad \tau_{zr}|_{r=R+e} = 0$$
 (9-10)

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 پایستاری مومنتم).

$$\frac{\partial \bar{u}_z}{\partial t} - \frac{1}{\rho_t} \frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial z} = \frac{R}{\rho_t \left(R + \frac{e}{2}\right)e} \tau_0 + g \sin \theta \tag{10-10}$$

که در آن θ ، زاویه بین محور لوله و یک صفحه افقی میباشد. اکنون چنانچه در این رابطه همانند رابطه (ابطه (ابطه (ابطه (10 مرا) از مدل اصطکاک شبه ماندگار استفاده و فرضیات لوله ای جدار نازک e << R اعمال شوند خواهیم داشت.

$$\frac{\partial \dot{u}_z}{\partial t} - \frac{1}{\rho_t} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \frac{\rho_f A_f}{\rho_t A_t} \frac{f V |V|}{2D} + g \sin \theta, \qquad (11-1)$$

¹ hoop stress

² Conservation of momentum

پیوست ب: اثبات تقریب عددی انتگرال کانولوشن [Keramat et.al, 2012]

$$\begin{split} f_{k}(t) &= \frac{J_{k}}{\tau_{k}} \int_{0}^{s} g(t-s) e^{\frac{-s}{\tau_{k}}} ds \\ &= \frac{J_{k}}{\tau_{k}} \int_{0}^{s} g(t-s) e^{\frac{-s}{\tau_{k}}} ds + \frac{J_{k}}{\tau_{k}} \int_{s}^{t} g(t-s) e^{\frac{-s}{\tau_{k}}} ds \\ &= \frac{J_{k}}{\tau_{k}} \int_{0}^{s} g(t-s) e^{\frac{-s}{\tau_{k}}} ds \\ &= -\frac{J_{k}}{\tau_{k}} \int_{t}^{t-s} g(y) e^{\frac{y-t}{\tau_{k}}} dy = \frac{J_{k}}{\tau_{k}} e^{\frac{z}{\tau_{k}}} \int_{t-s}^{t} g(y) e^{\frac{y-t}{\tau_{k}}} dy \\ &= \frac{J_{k}}{\tau_{k}} e^{\frac{z}{\tau_{k}}} \left(g(y) \tau_{k} e^{\frac{y}{\tau_{k}}} \right)_{t-s}^{t} - g(t-s) \tau_{k} e^{\frac{y-s}{\tau_{k}}} - \int_{t-s}^{t} \frac{\partial g(y)}{\partial y} \tau_{k} e^{\frac{y}{\tau_{k}}} dy \\ &= \frac{J_{k}}{\tau_{k}} e^{\frac{z}{\tau_{k}}} \left(g(t) \tau_{k} e^{\frac{t}{\tau_{k}}} - g(t-s) \tau_{k} e^{\frac{t-s}{\tau_{k}}} - \tau_{k} \frac{\partial g(y)}{\partial y} \tau_{k} e^{\frac{y}{\tau_{k}}} dy \\ &= \frac{J_{k}}{\tau_{k}} e^{\frac{z}{\tau_{k}}} \left(g(t) \tau_{k} e^{\frac{t}{\tau_{k}}} - g(t-s) \tau_{k} e^{\frac{t-s}{\tau_{k}}} - \tau_{k} \frac{\partial g(y)}{\partial y} \tau_{k} e^{\frac{y}{\tau_{k}}} dy \\ &= \frac{J_{k}}{\tau_{k}} e^{\frac{z}{\tau_{k}}} \left(g(t) \tau_{k} e^{\frac{t}{\tau_{k}}} - g(t-s) \tau_{k} e^{\frac{t-s}{\tau_{k}}} - \tau_{k} \frac{\partial g(y)}{\partial t} \tau_{k} e^{\frac{y}{\tau_{k}}} dy \\ &= \frac{J_{k}}{\tau_{k}} e^{\frac{z}{\tau_{k}}} \left(g(t) \tau_{k} e^{\frac{t}{\tau_{k}}} - g(t-s) \tau_{k} e^{\frac{t-s}{\tau_{k}}} - \tau_{k} \frac{\partial g(y)}{\delta t} - s \right) \left[\tau_{k} e^{\frac{y}{\tau_{k}}} \right] \\ &= \frac{J_{k}}{\tau_{k}} e^{\frac{z}{\tau_{k}}} \left(g(t) \tau_{k} e^{\frac{t}{\tau_{k}}} - g(t-s) \tau_{k} e^{\frac{t-s}{\tau_{k}}} - \tau_{k} \frac{\partial g(t-s)}{\delta t} \right) \left[e^{\frac{t}{\tau_{k}}} - e^{\frac{t-s}{\tau_{k}}} \right) \\ &= J_{k} g(t) - J_{k} g(t-s) \tau_{k} e^{\frac{t-s}{\tau_{k}}} - J_{k} \tau_{k} \left(\frac{g(t) - g(t-s)}{\delta t} \right) \left[1 - e^{\frac{-s}{\tau_{k}}} \right) \right] \\ &= J_{k} g(t) \left[J_{k} + \frac{J_{k} \tau_{k}}}{\delta \tau_{k}} \left(e^{\frac{-s}{\tau_{k}}} - 1 \right) \right] + g(t-s) \left[-J_{k} e^{\frac{-s}{\tau_{k}}} - 1 \right] \\ &= \int_{M}^{s} g(t-s) \frac{J_{k}}}{\tau_{k}} e^{\frac{z}{\tau_{k}}} ds = \int_{0}^{t-s} g(s) \left(t-s - 1 \right) \frac{J_{k}}{\tau_{k}} e^{\frac{-s}{\tau_{k}}} ds \\ &= e^{\frac{-s}{\tau_{k}}}} \int_{0}^{t-s} g(t-s) \left(J_{k} + \frac{J_{k} \tau_{k}}}{\delta \tau_{k}} \left(e^{\frac{-s}{\tau_{k}}} - 1 \right) \right) + g(t-s) \left(-J_{k} e^{\frac{-s}{\tau_{k}}} - \frac{J_{k} \tau_{k}}}{\delta t} \left(e^{\frac{-s}{\tau_{k}}} - 1 \right) \\ &= f_{k} e^{\frac{-s}{\tau_{k}}} f_{k} (t-s) \end{array}$$



منابع فارسى

- [۱] استریتر و و وایلی ب، (1386)، "مکانیک سیالات". انتظاری ع، یازدهم، نورپزدازان، تهران، 744.
- [۲] جزایری مقدس س م، (1383)، پایان نامه ارشد:"تحلیل همزمان جریان غیر ماندگار و دینامیک سازه خط لوله". دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- [۳] کرامت ع، (1389)، رساله دکتری:"بررسی اندرکنش سیال-سازه در سیستمهای لوله ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن جدایی ستون مایع". دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۴] کرامت ع، (1384)، پایان نامه ارشد:"تحلیل دینامیکی شبکههای لوله تحت فشار با روش اجزای محدود". دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- [۵] کلانتری بهزاد، (1390)، پایان نامه ارشد:"تحلیل پدیده ضربه قوچ با در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه (FSI) به روش المان محدود". دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

منابع انگلیسی

- [1] Achouyab, E.H., Bahrar, B., (2011), "Numerical modeling of phenomena of waterhammer using a model of fluid-structure interaction". Comptes Rendus Me´canique 339: 262–269.
- [2] Ahmadi, A., Keramat, A., (2011), "Investigation of fluid-structure interaction with various types of junction coupling", Journal of Fluids and Structures, 26: 1123–1141.
- [3] Aklonis J. J., McKnight W. J., Shen M. (1972), Introduction to Polymer Viscoelasticity, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- [4] Bergant, A., Tijsseling, A.S., (2001), "Parameters Affecting Water Hammer Wave Attenuation, Shape and Timing," Proceedings of the 9th Int. Meeting of the IAHR Work Group on the Behaviour of Hydraulic Machinery under Steady Oscillatory Conditions, June 26.-28., Trondheim, Norway.
- [5] Bergant A., Tijsseling, A., Vítkovský, J.P., Covas, D., Simpson, A., and Lambert, M. (2008), "Parameters affecting water-hammer wave attenuation, shape and timing. Part 1: mathematical tools", IAHR Journal of Hydraulic Research, 46(3):373-381.
- [6] Bergant A., Tijsseling, A., Vítkovský, J.P., Covas, D., Simpson, A., and Lambert, M. (2008), "Parameters affecting water-hammer wave attenuation, shape and timing. Part 2: case studies", IAHR Journal of Hydraulic Research, 46(3): 382-391.
- [7] Brinson, H.F., Brinson, L.C., (2008), "Polymer engineering science and viscoelasticity, an introduction", Springer.
- [8] Chazal C.F, Moutou Pitti R, (2009), 'An incremental constitutive law for ageing viscoelastic materials: a three-dimensional approach'. C R Mecanique 337(1): 30–33.
- [9] Covas, D., Stoianov, I., Mano, J., Ramos, H., Graham, N., and Maksimovic, C., (2004), "The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part I—Experimental analysis and creep characterization." IAHR Journal of Hydraulic Research, 42(5): 516–530.
- [10] Covas, D., Stoianov, I., Mano, J., Ramos, H., Graham, N., and 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(1): 56–70.
- [11] Covas, D., Stoianov, I., Ramos, H., Graham, N., and Maksimovic, C., Butler, D., (2004), "Water hammer in pressurized polyethylene pipes: conceptual model and experimental analysis"., Urban Water Journal, 1(2): 177-197.
- [12] Duan, H.F., Ghidaoui, M., Lee, P.J., Tung, Y.K., (2010), "Unsteady friction and visco-elasticity in pipe fluid transients". IAHR Journal of Hydraulic Research, 48: 354–362 (Discussion in 49, 398– 403).
- [13] D' Souza, A. F., and Oldenburger, R., (1964), "Dynamic Response of Fluid Lines," ASME Journal of Basic Engineering. 86 : 589-598.
- [14] Fan Z.J, Kim K.J, (1996), "Investigation of Effects of Viscoelastic Boundary Supports on Transient Sound Radiated from a Rectangular Plate by Modal Strain Energy Method." KSME International Journal, 11(5): 530-536.
- [15]Fan Z.J, Lee J.H, Kang K.H, Kim K.J, (1997), 'The Forced Vinration of a Beam with Viscoelastic boundary Supports'. Journal of Sound and Vibration 210(5): 673-682.
- [16] Ferry J. D. (1965), "Viscoelastic Properties of Polymers", WN-T, Warszawa (in Polish).
- [17] Friswell M.I, Sawicki J.T, Inman D.J, Lees AW. (2006). 'The response of rotating machines on viscoelastic supports', ISMA
- [18] Gray, C.A.M. (1953), "The Analysis of the Dissipation of Energy in water hammer," Proc ASCE, 119 : 1176-1194.

- [19] Gromeka, I. S., (1883), "Concerning the propagation Velocity of Water hammer waves in Elastic Pies," Scientific Soc. Of Univ. of Kazan, kazan, U.S.S.R.
- [20] Haberman, H.,(2004), "Applied Partial Differential Equations with Fourier Series and Boundary Value Problems", 4th Edition, Prentice Hall.
- [21] 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,17-30.
- [22] Heinsbroek, A.G.T.J. (1997), "Fluid-structure interaction in non-rigid pipeline systems", Nuclear Engineering and Design, 172: 123-135.
- [23] Jones, S. E., and Wood, D. J., (1972), "The Effect of Axial Boundary Motion on Pressure Surge Generation," ASME Journal of Basic Engineering. 94 : 441-446.
- [24]Katarzyna W, (2006), "Viscoelastic Model of Waterhammer in Single Pipeline Problems and Questions", Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, 53(4): 331–351.
- [25]Keramat A, Ahmadi A, (2012), 'Axial wave propagation in viscoelastic bars using a new finiteelement-based method.' J Eng Math, DOI 10.1007/s 10665-012-9556-y.
- [26]Keramat A, Tijsseling A.S, Hou Q, Ahmadi A, (2012), 'Fluid-structure interaction with pipe-wall viscoelasticity during water hammer'. Journal of fluids and structures 28: 434-455.
- [27] Lavooij, C.S., Tijsseling, A.S., (1990), "Fluid Structure Interaction in Compliant Piping Systems", Proceedings of 6th Int. Conference. on Pressure Surges, BHRA, 85-100.
- [28]Lee U, Oh H, (2005). 'Dynamics of an axially moving viscoelastic beam subject to axial tension'. International Journal of Solids and Structures, 42: 2381–2398.
- [29] 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.
- [30] Majorana C.E., Pomaro B, (2011). "Dynamic stability of an elastic beam with visco-elastic translational and rotational support". Engineering Computations, 28(2):114 129.
- [31] Mikhailenko B.G, Mikhailov A.A, Reshetova G.V, (2003), 'Numerical viscoelastic modeling by the spectral laguerre method'. Geophys Prospect, 51(1):37–48.
- [32] Moireau P, Xiao N, Astorino M, Figueroa C. A, Chapelle D, Taylor C. A & Gerbeau J.-F, (2012), ' External tissue support and fluid-structure simulation in blood flows', Biomech Model Mechanobiol 11:1-18
- [33] Paidoussis M.P, (1998), "Fluid-structure interactions, slender structures and axial flow, Volume 1" academic press.
- [34]Prak J, (2007), "Influence of support viscoelastic properties on the structural wave propagation", J Mech Sci Technol 21: 2117-2124.
- [35]Rachid, F.B.De.F, Mattos, H.S.C., (2002), "Modelling of the fluid-structure interaction in inelastic piping systems", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences , 24: 62-69.
- [36] Reddy J.N. (1993), "An Introduction to the Finite Element Method." Texas A&M University.
- [37]Regitz, J. D., Jr. (1960), "An Experimental Determination of the Dynamic Response of a Long Hydraulic Line," NASA Technical Note D- 576.
- [38] Ruus, E., (1966), "Optimum Rate of closure of Hydraulic Turbine Gates" presented at Amer. Soc. Mech. Engrs. Engineering Inst. Of Canada conference, Denver, Colorado.

- [39] Soares, A.K., Covas, D.I.C., Reis, L.F., (2008), "Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer", ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 134(9): 1389-1394.
- [40] 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, 2(4): 269-277.
- [41] Stoessel JC, Keowen RS, and Ibanez P, (1988), "Visco-elastic pipe support effect on water hammer induced loads". Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, New York, USA, ASME-PVP 144: 279-281.
- [42] Streeter, V.L., and Lai, C., (1963), "waterhammer Analysis Including Fluid Friction," Trans Amer. Soc. Civ. Engrs, 128: 1491-1524 (see also discussions by Gray. C.A.M., pp.1530-1533, and by painter, H.M., pp. 1533-1538.
- [43] 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.
- [44] Tijsseling, A.S. (1993), "Fluid-structure interaction in case of water hammer with cavitation", PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands,
- [45] Tijsseling, A.S., (1996), "Fluid-structure interaction in liquid-filled pipe systems: a review", Journal of Fluids and Structures, 10, 109-146.
- [46] 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.
- [47] Tijsseling, A.S. (2007), "Water hammer with fluid-structure interaction in thick-walled pipes", Journal of Computers & Structures, 85: 844-851.
- [48] 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.
- [49] Tillema H.G, (2003), 'Noise reduction of rotating machinery by viscoelastic bearing supports' PhD thesis, University of Twente, ISBN: 90-36518776
- [50] 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
- [51]Wiggert, D.C., Hatfield, F.J, and Stuckenbrock, S., (1987), "Analysis of Liquid and Structural Transients in Piping by Method of Characteristics", J. of Fluid Engineering, ASME, vol. 109, No.2, 161-165.
- [52]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.
- [53] Wineman, A.S., Rajagopal, K.R., (2000), "Mechanical response of polymers: an introduction", Cambridge University Press, pp 313.
- [54] Wilkinson, D. H., (1978), "Acoustic and Mechanical Vibrations in Liquid- Filled Pipework Systems," Proceeding of the BNES Vibration in Nuclear Plant Conference, Paper No. 8:5, Keswick, England.
- [55]Wood, D. J., (1968), "A Study of the Response of Coupled Liquid Flow- Structural Systems Subjected to Periodic Disturbances," ASME Journal of Basic Engineering. 90 : 532-540.
- [56]Wood, D. J., (1969), "Influence of Line Motion on Waterhammer Pressures," Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 95: 941-959.
- [57] Wylie E. B., Streeter V. L., (1978), "Fluid Transients", McGraw Hill, United states of America, pp 379. ISBN 0-07-072187-4.
- [58] Yang, Ke, Li, Q.S., Zhang L.,(2004), "Longitudinal vibration analysis of multi-span liquid-filled pipelines with rigid constraints" Journal of Sound and Vibration, 273: 125-147.

Abstract

Fluid-Structure Interaction (FSI) issues such as Poisson and Junction coupling and their effects on water hammer results in important piping systems have been in attention in recent years. These effects cause vibration in pressure heads and displacements of pipe wall. Considering the behavior of viscoelastic (VE) materials in dampening and energy dissipation, the main purpose of this research is analysis of water hammer and modeling of fluid-structure interaction in a pipe line (made of elastic or viscoelastic materials) with viscoelastic supports.

In this study in order to describing the behavior of viscoelastic substances, the generalized Kelvin-Voigt mechanical model and the integration form of its constitutive equations has been used. For numerical solution of the convolution integral caused by viscoelastic behavior, a numerical approximation was used in accordance with unknowns of the current time step and the known values of the previous time step. The hydraulic equations were solved by the method of characteristic (MOC) and the structural equation that has appropriately been derived for implementation of boundary condition of VE support are solved using the finite element method (FEM) in the time domain.

The results showed that using of VE supports with appropriate properties and numbers are very effective and efficient in damping and decreasing the displacement of pipe wall, vibration of pressure heads caused by FSI and also dampening the pressure heads over time, especially in elastic pipes. They can also significantly reduce the stress and its rate of changes in the pipe and its supports over the time and improve the performances of the pipe structure against the fatigue phenomenon. In addition, the maximum pressure head in VE pipes that occurs at first cycle, unlike the elastic pipes, can be decreased.

Keyword: Water hammer, Viscoelastic pipe, Viscoelastic supports, Fluidstructures interaction



Shahrood University of Technology

Civil Engineering Department

Viscoelastic Support Effects on Fluid-Structure Interaction

in Water Hammer

Roohollah Zanganeh

Supervisors:

Dr. Ahmad Ahmadi

Dr. Alireza Keramat

September 2013