



مطالعه جریان گذرا در لوله ویسکوالاستیک با احتساب اثرات اندرکنشی بر مبنای پاسخ تحلیلی در حوزه فرکانس

حامد کریمیان علی آبادی^{۱*}، احمد احمدی^۱، علیرضا کرامت^۲

^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
^۲ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۰۱
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۶/۲۵
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۸/۳۰

کلمات کلیدی:

شیوه ماتریس انتقال
تحلیل گذرا
آنالیز حوزه فرکانس
جداره ویسکوالاستیک
اندرکنش سیال-سازه
مدل کلونین ویت

خلاصه: در این تحقیق اندرکنش سیال و سازه با احتساب شرایط گذرا درون یک لوله ویسکوالاستیک با استفاده از ابزارهای تحلیل در حوزه فرکانس مطالعه شده است. هدف اصلی، بررسی پدیده ضربه قوچ در جداره ویسکوالاستیک از طریق مطالعه فرکانسی و بویژه مبتنی بر شیوه تعمیم یافته ماتریس انتقال بوده است. در خلال این فعالیت تطبیق پذیری و مزیت‌های نسبی روش تحلیلی ماتریس انتقال در حل یک مسئله کوپل و مشتمل بر دینامیک سازه پیچیده، تبیین شده است. یکی از مزیت‌های اصلی حل در حوزه فرکانس تبدیل فرم انتگرالی معادلات حاکم به معادلات جبری و ساده‌سازی آنها می‌باشد. در اینجا استفاده از تحلیل حوزه فرکانس برای مدلسازی لوله ویسکوالاستیک به دلیل حذف انتگرال کانولوشن که در مدل زمانی ماده ویسکوالاستیک ظاهر می‌شود، مزیت نسبی و تأثیر بیشتری دارد. برای مسئله حاضر که تحلیل جریان گذرای حاصل از بسته شدن آنی شیر پایین دست در لوله ویسکوالاستیک می‌باشد، ماتریس انتقال تعمیم یافته که شامل متغیرهای حالت سازه‌ای علاوه بر متغیرهای هیدرولیکی است، ارائه شده است. بعنوان نوآوری کلیدی در تعمیم این شیوه، دو جنبه تحریک غیرهارمونیک و مدل جداره ویسکوالاستیک لحاظ شده است. معادلات کلونین-ویت برای مدلسازی رفتار جداره ویسکوالاستیک مورد استفاده قرار گرفته است. صحت عملکرد مدل حاضر از طریق مقایسه نتایج با دو دسته داده‌های تحلیلی و آزمایشگاهی بررسی و تأیید شده است. برای بررسی همزمان اثرات ویسکوالاستیسیته و اندرکنش سیال-سازه یک مسئله نمونه تعریف شده که نتایج حاصل به منظور قیاس بین حالت‌های مختلف تحلیل اندرکنشی و غیر اندرکنشی و نیز در ازای فرض جداره الاستیک و یا ویسکوالاستیک استخراج و ارائه شده است.

۱- مقدمه
در دو دهه اخیر مدلسازی و آنالیز جریان گذرا در مجاری انعطاف پذیر موضوع تحقیقات گسترده‌ای بوده است. این تحقیقات عموماً انتشار موج فشاری یا ضربه قوچ را همزمان با برخی پدیده‌های مرتبط مثل اصطکاک غیرماندگار، کاویتاسیون و رزنانس بررسی کرده‌اند. همچنین تأثیر عیوب خط لوله مانند گرفتگی و یا نشست بر انتشار امواج از موضوعات مهم در این حوزه بوده است. فرآیندهای حل در این زمینه به دو دسته کلی شامل حل در حوزه زمان و حوزه فرکانس قابل تفکیک است. در حوزه زمان اغلب روش خطوط مشخصه^۱ برای حل مسائل در خط لوله به کار گرفته می‌شود. از میان پژوهش‌های صورت پذیرفته به کمک روش خطوط مشخصه، می‌توان به مقاله‌های منتخب شامل تحقیق ژانگ و وایراوامورتی که در آن اندرکنش سیال-سازه لحاظ شده است [۱]، پژوهش فراس و همکاران [۲] که با

احتساب اثرات اصطکاک غیرماندگار انجام شده، تحقیق کرامت و همکاران [۳] که در آن ویسکوالاستیسیته لوله مدلسازی شده است، برخی فعالیت‌ها که با در نظر گرفتن پدیده جدایی ستون مایع در خلال ضربه قوچ انجام شده نظیر برگانت و سمسون [۴] و هم چنین احمدی و کرامت [۵]، کارهای دیگری که تنوع شرایط مرزی و اثرات تکیه گاه در آنها تبیین شده است نظیر پژوهش تننارلی [۶]، افشار و روحانی [۷] و زنگنه و همکاران [۸]، اشاره نمود که اینها از جمله مقالات مبسوط و دقیق در این حوزه هستند.
اگرچه نتایج حل در حوزه زمان فهم دقیق و شهودی از نوسانات فشار در سیستم را منتقل می‌کند، نتایج حل در حوزه فرکانس از جمله منحنی پاسخ فرکانسی نیز حاوی اطلاعات ارزشمندی از قبیل شکل مدهای سیستم، سرعت موج وابسته به فرکانس، فرکانس‌های تشدید سیستم می‌باشد [۹]. درحقیقت ماهیت هایپربولیک سیگنال‌ها در جریان گذرا امکان حل تحلیلی در حوزه فرکانس را فراهم می‌کند [۱۰]. بخصوص زمانی که پدیده‌های وابسته به فرکانس از قبیل اصطکاک غیرماندگار و ویسکوالاستیسیته

Method of Characteristics (MOC) 1

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hamed.karimian@gmail.com

نیز مدنظر باشند روش‌های فرکانسی بهینه خواهند بود [۱۱]. با این حال روش‌های حل در حوزه فرکانس که از نظر پیاده سازی پیچیدگی کمتری دارند، تا بحال توجه محققین کمتری را به خود جلب کرده است و هنوز مدل فرکانسی جریان گذرا که اثرات اساسی اندرکنش سیال و سازه در لوله ویسکوالاستیک را حتی برای یک سیستم ساده مخزن-لوله-شیر شبیه سازی نماید ارائه نشده است. از اولین تحقیقات انجام شده در حوزه فرکانس می‌توان به تحقیق انجام شده در سال ۱۹۶۴ اشاره نمود که در آن از فرم تبدیل یافته لاپلاس معادلات حاکم با احتساب اثرات اندرکنش سیال-سازه^۱ استفاده شده است [۱۲].

دی جونگ [۱۳] در سال ۱۹۹۵ روش ماتریس انتقال^۲ در حوزه فرکانس را برای مسائل یک بعدی انتشار موج پیاده سازی کرد. روش ماتریس انتقال از اوایل دهه ۷۰ میلادی به صورت گسترده‌ای برای آنالیز لرزه‌ای سیستم‌های مکانیکی توسعه پیدا کرد [۱۴]. با این حال این روش حل که به صورت مبسوط توسط چادری [۱۵] برای خطوط انتقال سیال تشریح گردیده است، غالباً با هدف بررسی انتشار موج در سیال مورد استفاده قرار گرفته است و انتشار موج تنش در سازه و نیز مکانیزم‌های اندرکنش سیال-سازه کمتر از این روش مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. به علاوه بسیاری از منابع از جمله کتاب معرفی شده چادری در هنگام استفاده از روش ماتریس انتقال تحریک سیستم را هارمونیک فرض کرده‌اند. ژانگ و همکاران [۹] اولین محققینی بودند که در سال ۱۹۹۹ تحریک غیرهارمونیک سیستم را در مدل فرکانسی خود شبیه سازی کردند. آن‌ها با موفقیت بارهای ضربه‌ای که باعث ایجاد جریان گذرا در سیستم می‌شدند را مدل کردند. این مدل قادر بود برای تعیین فرکانس‌های طبیعی سیستم و شکل مودهای سیستم سیال-سازه مورد استفاده قرار بگیرد. لی و همکاران [۱۶] این مدل را برای سیستم مشابهی شامل لوله‌های سری با قطرهای مختلف توسعه دادند. مقایسه نتایج مدل توسعه یافته کلون-ویت با نتایج آزمایشگاهی براساس بازسازی زمانی سیگنال‌ها توسط نگارندگان مقاله حاضر در پژوهش قبلی ارائه شده است [۱۷].

در سال‌های اخیر استفاده از لوله‌های پلی وینیل کلراید^۳ و پلی اتیلنی^۴ رواج بیشتری یافته است. این موضوع به دلیل قیمت نسبتاً پایین تر و مشخصات مکانیکی مناسب این مواد به خصوص برای مجاری انتقال آب است [۱۸ و ۱۹]. این مواد با داشتن کرنش تاخیری یا ویسکوز

علاوه بر کرنش آنی یا الاستیک در اثر اعمال نیرو، ویسکوالاستیک^۵ نامیده می‌شوند. این خاصیت منحصر به فرد مواد ویسکوالاستیک نقش مهمی در تحلیل جریان گذرا در خط لوله ایفا می‌کند. مشاهدات آزمایشگاهی در مسئله ضربه قوچ در لوله‌های ویسکوالاستیک نشان می‌دهد که مدل‌های کلاسیک ضربه قوچ نمی‌توانند پیش بینی درستی از نوسانات فشار در لوله را ارائه کنند. چشم‌پوشی از رفتار ویسکوالاستیک جداره در تحلیل جریان گذرا و به کارگیری مدل الاستیک به جای مدل ویسکوالاستیک می‌تواند خطای قابل توجهی را در نتایج مدل عددی نسبت واقعیت ایجاد کند [۲۰]. کوچ و همکاران [۲۱ و ۲۲] در مقالاتی که در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ منتشر گردید مدلی را در حوزه زمان ارائه کردند که با داشتن ترم اضافه‌ای در معادله پیوستگی، تغییر شکل شعاعی لوله ویسکوالاستیک را شبیه سازی می‌کرد. سرعت و میرایی (کاهش دامنه) موج در لوله ویسکوالاستیک توسط پرک [۲۲] بررسی گردید که در آن از نتایج مدل آزمایشگاهی جهت کالیبره کردن مدل تحلیلی استفاده گردید.

یک مدل تحلیلی که در سال ۲۰۱۰ توسط دوآن و همکاران [۲۳] ارائه شد نشان داد که خواص میرایی و اختلاف فاز ایجاد شده در اثر ویسکوالاستیسیته جداره به خصوص پس از مرحله گذرای اولیه جریان، موثرتر و مهم‌تر از میرایی حاصل از اصطکاک غیرماندگار می‌باشد. نتیجه گیری دیگر تحقیق نامبرده این است که تأثیر ویسکوالاستیسیته در صورتیکه که زمان تأخیر ماده ویسکوالاستیک کمتر از زمان انتشار موج در طول خط لوله باشد، بیشتر و تعیین کننده تر خواهد بود. کرامت و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۱۲ یک مدل جامع ضربه قوچ در لوله ویسکوالاستیک در حوزه زمان ارائه کردند که در آن امکان کالیبراسیون تابع خزش و نیز امکان تعیین مقادیر ضرایب مدل کلون-ویت فراهم شده بود. منیکونی و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۱۲ تأثیر تغییر مقطع در لوله‌های ویسکوالاستیک متصل شده به صورت سری بر امواج فشاری ضربه قوچ را بررسی کردند. این تحقیق نیز که در حوزه زمان انجام شده بود نشان داد که نسبت طول لوله‌های با قطر کم و زیاد تأثیر زیادی بر صحت نتایج مدل یک بعدی ارائه شده دارد. در تحقیق دیگری آن‌ها به بررسی اتلاف انرژی و میرایی موج فشار برای یک سیستم ساده لوله ویسکوالاستیک با یک شیر میانی پرداختند و اثرات اصطکاک غیرماندگار را نیز لحاظ کردند [۲۶].

تحقیق جدیدتری توسط گونگ و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۱۵ برای استخراج تابع پاسخ فرکانسی لوله‌های ویسکوالاستیک با استفاده از مدل

- 1 Fluid-Structure Interaction (FSI)
- 2 Transfer-Matrix Method (TMM)
- 3 PolyVinyl Chloride (PVC)
- 4 PolyEthylene (PE)

5 Viscoelastic (VE)

در مدل حاضر امکان استفاده از آن برای مدلسازی لوله‌های الاستیک نیز میسر خواهد بود.

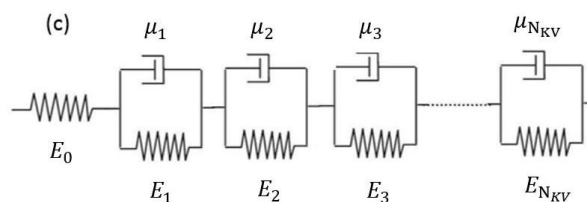
۲- مدل ریاضی

۲-۱- مدل جداره ویسکوالاستیک

براساس مطالعات پیشین، برای شبیه سازی رفتار جامد ویسکوالاستیک دو مدل رایج و پر کاربرد مدل‌های کلونین-ویت و ماکسول هستند [۲۸]. این مدل‌ها براساس ترکیب‌ها و چیدمان‌های مختلفی از فنر و میراگر بوجود آمده‌اند [۲۰]. مدل کلونین-ویت شامل یک فنر و یک میراگر است که به صورت موازی بهم متصل شده‌اند و مدل توسعه یافته کلونین-ویت، شامل تعدادی سلول کلونین-ویت و یک فنر اضافه است که به صورت سری بهم متصل شده‌اند [۲۹]. در اینجا از مدل کلونین ویت به دلیل مزیت و دقت بیشتر در توصیف رفتار خزشی جداره ویسکوالاستیک به نسبت مدل ماکسول استفاده شده است. در شکل ۱ مدل توسعه یافته کلونین-ویت که از این پس در این مقاله مدل کلونین-ویت یا به اختصار مدل KV نامیده می‌شود، نمایش داده شده است. خواهیم دید که رابطه تنش- کرنش حاکم بر این مدل که به خوبی رفتار ماده جامد ویسکوالاستیک را مدل‌سازی می‌کند، در حوزه فرکانس نیز به سهولت و از طریق معادلات جبری قابل پیاده سازی است. در شکل ۱ پارمترهای E_i و μ_i به ترتیب مدول الاستیسیته فنر و ویسکوزیته میراگر i ام هستند. در این پژوهش ابتدا مدل سه پارامتری که شامل یک فنر و یک سلول کلونین-ویت می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد و در انتها نتایج آن با مدل‌های مرتبه بالاتر جهت بررسی میزان دقت مقایسه خواهد گردید. افزایش مرتبه (دقت) مدل کلونین-ویت باعث پیچیده‌تر شدن ماتریس انتقال حالت می‌گردد که ممکن است در نتایج به همان نسبت مؤثر نباشد. در حین پدیده ضربه قوچ، نوسانات فشار، تنش‌های محیطی در جداره لوله ایجاد می‌نماید که به دلیل وجود نسبت پواسون این تنش‌ها باعث ایجاد تغییرشکل‌های شعاعی و کرنش محوری لوله می‌شود. همچنین تنش‌های محوری که بر اثر ضربه قوچ پدید می‌آیند به طرز مشابهی به تغییر شکل شعاعی و محیطی منتج می‌گردد. رابطه تنش-کرنش سه بعدی که مطابق با رفتار تبدیلی اشاره شده باشد به صورت زیر تعریف می‌گردد [۲۹]:

$$\varepsilon_z = \sigma_z * dJ - \nu(\sigma_\phi * dJ - \sigma_r * dJ) \quad (1)$$

$$\varepsilon_\phi = \sigma_\phi * dJ - \nu(\sigma_z * dJ - \sigma_r * dJ) \quad (2)$$



شکل ۱: مدل توسعه یافته کلونین-ویت برای شبیه سازی رفتار مکانیکی جامد ویسکوالاستیک

Fig. 1. Generalized Kelvin-Voigt Model to simulate mechanical properties of a viscoelastic solid

کلونین-ویت انجام شده است. این تحقیق که دران از اثرات اندرکنشی سیال-سازه صرف نظر گردیده، نشان داد که خاصیت ویسکوالاستیسیته جداره لوله باعث میرایی و جابجایی وابسته به فرکانس در فرکانس‌های طبیعی سیستم می‌گردد. وایا [۱۸] در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۷ به مطالعه جریان لایه‌ای در لوله ویسکوالاستیک پرداخت و براساس آنالیز ابعادی پارامترهای بی بعد دریافت که تاثیرات ویسکوالاستیسیته در لوله‌های طولی و یا با قطر زیاد قابل توجه تر است. همان‌طور که پیشتر بیان شد، مقالات زیادی در مورد روش‌های حل فرکانسی ضربه قوچ با در نظر گرفتن اندرکنش سیال-سازه در مطالعات پیشین موجود است. همچنین پژوهش‌های متعددی در خصوص مدل‌سازی لوله ویسکوالاستیک در حوزه زمان و فرکانس انجام شده است. با این حال مدل جامعی شامل اندرکنش سیال-سازه در لوله ویسکوالاستیک در حوزه فرکانس تا زمان نگارش این مقاله مشاهده نشده است.

در تحقیق حاضر هدف ارائه مدلی است که تحلیل ضربه قوچ را در لوله ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن مکانیزم‌های اندرکنشی پواسون و اتصال در حوزه فرکانس، فراهم آورد. در اینجا تبدیل لاپلاس معادلات سیال و سازه برای بکارگیری ماتریس انتقال استخراج شده است. شرایط مرزی و همچنین مدل کلونین-ویت برای ماده ویسکوالاستیک نیز به فضای لاپلاس منتقل شده‌اند. مدل پیشنهادی در محیط نرم افزار متلب پیاده سازی شده است. نتایج متنوعی که تأثیر ماده ویسکوالاستیک و مکانیزم‌های اندرکنشی را به صورت تفکیک شده و مقایسه‌ای ارائه می‌کند از این مدل استخراج و ارائه شده است. بررسی‌های انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از ابزارهای حل در حوزه فرکانس می‌تواند شرایط را برای حل تحلیلی معادلات فراهم آورد. نتایج به دست آمده از حل در حوزه فرکانس می‌تواند برای پیش بینی همه جانبه و دقیق شرایط بحرانی خط لوله مورد استفاده قرار گیرد. به علاوه امکان مطالعه پارامتری رفتار سیستم به سهولت در این مدل وجود خواهد داشت. به علاوه با صفر قرار دادن مقادیر ضرایب پاسخ تاخیری لوله

تعریف شده است که می‌تواند معرف مدل ۳ پارامتری یا مدل‌های مرتبه بالاتر کلومین-ویت باشد.

$$[KV] = s\bar{J} = \sum_{K=0}^{N_{KV}} J_k - s \sum_{K=1}^{N_{KV}} \frac{J_k \tau_k}{1 + s\tau_k} \quad (۸)$$

برای مدل سه پارامتری که در آن $N_{KV} = ۱$ رابطه (۸) به فرم زیر کاهش می‌یابد:

$$[KV] = s\bar{J} = J_0 + \frac{J_1}{1 + s\tau_1} = \frac{p_0 + p_1 s}{q_0 + q_1 s} \quad (۹)$$

که در آن:

$$p_0 = 1, p_1 = \frac{\mu_1}{E_0 + E_1}, q_0 = \frac{E_0 E_1}{E_0 + E_1}, q_1 = \frac{E_0 \mu_1}{E_0 + E_1} \quad (۱۰)$$

۲-۲- معادلات کوپل اندرکنش سیال-سازه در لوله ویسکوالاستیک
دسته معادلات حاکم در حوزه زمان شامل ۶ معادله اولیه است. این معادلات که در ادامه ارائه شده‌اند به ترتیب عبارت از معادلات پیوستگی و مومنتوم سیال، رابطه تعادل نیروها، تعریف کرنش محوری و روابط تنش-کرنش محوری و شعاعی می‌باشد:

$$\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{\rho_f g}{K} \frac{\partial H}{\partial t} + 2 \frac{\partial \varepsilon_\varphi}{\partial t} = 0 \quad (۱۱)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{-fV |V|}{2D} \quad (۱۲)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} - \frac{1}{\rho_t} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \frac{\rho_f A_f}{\rho_t A_t} \frac{fV |V|}{2D} + g \sin \theta \quad (۱۳)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (۱۴)$$

که در آن σ و ε تنش و کرنش هستند، و * نماد اپراتور کانولوشن و * d بیانگر اپراتور استیلیس کانولوشن است که در رابطه (۶) تعریف گردیده، φ, z و r جهت محورها در مختصات استوانه‌ای هستند. σ_φ تنش هوپ (محیطی) است که در لوله جدار نازک تحت فشار به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\sigma_\varphi = \frac{\rho g H D}{2e} \quad (۳)$$

که در آن H هد فشار، ρ چگالی، g شتاب جاذبه، D قطر داخلی لوله، e ضخامت جداره لوله است. پارامتر J بیانگر تابع خزش است که برای حالت کلی مدل N پارامتری کلومین-ویت عبارتست از [۲۹]:

$$J = J_0 + \sum_{k=1}^{N_{KV}} J_k (1 - e^{-t/\tau_k}) \quad (۴)$$

که در آن $J_0 = 1/E$ و $J_k = 1/E_k$. $\tau_k = \mu_k / E_k$ پاسخ آنی و یا تغییر شکل الاستیک ماده ویسکوالاستیک را شبیه سازی می‌کند. زیرنویس k تعداد سلول‌های مدل کلومین-ویت در نظر گرفته شده است. باید توجه کرد که $E = E_0$ همان مدول الاستیسیته فنر منفرد است. برای مدل سه پارامتری کلومین-ویت رابطه بالا به صورت زیر ساده می‌گردد:

$$J = J_0 + J_1 (1 - e^{-t/\tau_1}) \quad (۵)$$

تعریف اپراتور استیلیس کانولوشن که در روابط (۱) و (۲) مشاهده شد در رابطه زیر آمده است [۲۹]:

$$\sigma * dJ = \sigma(t)J(0) + \int_0^t \sigma(t-s) \frac{dJ}{ds}(s) ds \quad (۶)$$

با در نظر گرفتن $J(0) = J_0$ تبدیل لاپلاس معادله (۶) برابر است با:

$$\mathcal{L}\{\sigma * dJ\} = \bar{\sigma} J_0 + \bar{\sigma}(s\bar{J} - J_0) = \bar{\sigma} s\bar{J} = [KV] \bar{\sigma} \quad (۷)$$

که در آن نماد خط بالانویس معرف تبدیل لاپلاس توابع است. در این مقاله به دلیل استفاده متعدد از مدل کلومین-ویت با تعداد مختلف سلول‌ها، نماد $[KV] = s\bar{J}$ به معنی s ضربدر تابع تبدیل یافته کلومین-ویت

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} &= -\frac{-1}{\rho_t c_t^2} \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} + g \frac{D \rho_f \nu}{2Ee} \frac{\partial H}{\partial t} \\ &= \frac{\partial I_{\sigma_z}}{\partial t} - g \frac{D \rho_f \nu}{2e} \frac{\partial I_H}{\partial t} \end{aligned} \quad (20)$$

که در این روابط ضرایب به کار رفته عبارتند از :

$$\begin{aligned} c_t^2 &= \frac{E}{\rho_t}, I_{\sigma_z} = \int_0^t \sigma_z(t-s) \frac{dJ(s)}{ds} ds \\ I_H &= \int_0^t H(t-s) \frac{dJ(s)}{ds} ds \end{aligned} \quad (21)$$

در دستگاه معادلات فوق از نیروی اصطکاک بین جداره لوله و سیال صرف‌نظر شده و محور لوله افقی فرض شده است.

۲-۳- شرایط اولیه و مرزی

لازم است شرایط اولیه سیستم شامل سرعت جریان، هد فشار، جابجایی محوری و سرعت محوری لوله براساس تحلیل جریان پایدار قبل از شروع جریان گذرا در خط لوله به دست آیند. در این حالت مقادیر ثابتی برای سرعت و هد به دست می‌آیند و به طبع آن مقادیر غیر صفر برای کرنش‌های شعاعی و محوری به دست خواهد آمد. با این حال از آنجا که هدف در اینجا به دست آوردن کرنش‌های نسبی و دینامیکی حاصل از ضربه قوچ است، تغییرشکل‌های اولیه لوله صفر در نظر گرفته می‌شود. در مورد یک سیستم مخزن-لوله-شیر^۱ شرایط اولیه رایج می‌تواند شامل: سرعت محوری لوله برابر با صفر، $\dot{u}_z(t=0)$ ، کرنش محوری لوله $\varepsilon_z(t=0)$ و وقتی که انتهای لوله مقید باشد، سرعت اولیه سیال $V = V_0$ و هد اولیه در حالت بدون اصطکاک برابر با هد مخزن، $H_0 = H_{Res}$ باشد.

قبل از تعریف شرایط مرزی در مسئله حاضر، لازم است مکانیزم‌های اندرکنش یا تداخل سیال-سازه بررسی شوند. این مکانیزم‌ها به ۳ دسته تداخل پواسون، تداخل اتصال و تداخل اصطکاک تقسیم بندی می‌شود. برای یک لوله که در راستای محوری مقید نباشد کوپل پواسون فعال خواهد بود و بایستی در مدل منظور شود. کوپل اتصال زمانی وجود دارد که تکیه‌گاه‌ها در سیستم کاملاً صلب نباشند و کوپل اصطکاک به دلیل وجود نیروهای بین سیال و سازه بروز می‌کند. حال با اطلاع از نحوه عملکرد مکانیزم‌های اندرکنشی می‌توان شرایط مرزی را برای یک سیستم مخزن-لوله-شیر به

$$\varepsilon_z = \sigma_z * dJ - \nu(\sigma_\varphi * dJ) \quad (15)$$

$$\varepsilon_\varphi = \sigma_\varphi * dJ - \nu(\sigma_z * dJ) \quad (16)$$

که در آن H و V مقادیر متوسط سرعت و هد فشار سیال در مقطع لوله هستند و \dot{u}_z سرعت محوری لوله است. مقدار تنش شعاعی در مقایسه با تنش‌های محوری و محیطی در مسئله حاضر ناچیز است و بنابراین روابط تنش کرنش ماده ویسکوالاستیک که در روابط (۱) و (۲) آمده بود به روابط (۱۵) و (۱۶) تقلیل می‌یابد. جمله سمت راست معادله (۱۲) نیروی اصطکاک سیال می‌باشد که به دلیل انتخاب جهت مثبت محور مختصات و جبری بودن کمیت سرعت، عبارت مجذور سرعت به فرم حاصلضرب قدرمطلق نشان داده شده تا بیانگر جهت اعمال نیروی اصطکاک نیز باشد. سمت راست معادله (۱۳) نیز بطور مشابه نیروی اصطکاک سیال که به تبع آن به جداره نیز وارد می‌شود بصورت نرمال شده بر حسب سطح مقطع جداره ظاهر می‌شود و جمله دیگر اثر شیب لوله و مؤلفه نیروی وزن است که البته هر دو مقادیر اندک دارند و در اینجا نیز ناچیز فرض شده‌اند. با جایگذاری ε_φ در رابطه پیوستگی (۱۱) با تعریف آن از رابطه (۱۶) براساس مقدار تنش محیطی که از رابطه (۳) به دست آمد و نیز با ترکیب دو معادله (۱۴) و (۱۵) دستگاه ۴ معادله‌ای به دست می‌آید که با مشتق‌گیری از آن نسبت به زمان دستگاه ۴ معادله دیفرانسیلی به صورت زیر حاصل خواهد شد :

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\rho_f g}{K} \frac{\partial H}{\partial t} - 2\nu \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} \\ + (1-\nu^2) \frac{D \rho_f g}{e} \frac{\partial (H * dJ)}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \dot{u}_z}{\partial t} - \frac{1}{\rho_t} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \quad (19)$$

زمان که پیشتر ارائه شده بود (معادلات (۱۷) الی (۲۱))، به راحتی می‌توان این دسته معادلات را با نمایش ساده‌تری در قالب ماتریسی نمایش داد:

$$\bar{A} \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial t} + \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial z} + \mathbf{C} \mathbf{y} = \mathbf{r} \quad (26)$$

در این رابطه ماتریس‌های \bar{A} و \mathbf{B} به ترتیب ماتریس‌های ضرایب جملات مشتق زمانی و مکانی هستند و ماتریس \mathbf{C} شامل جملات اصطکاک و میرایی لوله است که در صورت صرفنظر کردن از اصطکاک این ماتریس صفر خواهد بود. بردار \mathbf{r} بیانگر نیروهای خارجی اعمالی بر لوله است. معادله (۲۶) را می‌توان با تبدیل لاپلاس به حوزه فرکانس انتقال داد:

$$\mathbf{A} \mathbf{Y} + \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial z} = \bar{\mathbf{r}} \quad (27)$$

که در آن $\mathbf{A} = \bar{\mathbf{A}}s + \mathbf{C}$ و بردار حالت تبدیل یافته شامل تبدیل لاپلاس متغیرهای اولیه است که به صورت زیر تعریف شده است:

$$\mathbf{Y} = [V, H, \dot{u}_z, \sigma_h]^T \quad (28)$$

که در آن σ_h هد تنش در جداره لوله است. ماتریس‌های ضرایب انتقال یافته به حوزه فرکانس به صورت زیر خواهد بود:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\rho_f g}{K} + \frac{D \rho_f g}{e} [KV] (1 - \nu^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{g D \rho_f \nu}{2Ee} + \frac{g D \rho_f \nu}{2e} ([KV] - J_0) & 0 & \frac{-1}{\rho_f c_t^2} - [KV] + J_0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & g & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\rho_f} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

تفکیک بیان نمود. جابجایی محوری لوله در مقطع پایین دست در صورتی که مقید باشد $u_z(z=l) = 0$ (کوپل پواسون)، تنش محوری لوله در انتهای آزاد $\sigma_z(z=l) = 0$ (کوپل پواسون و اتصال)، جابجایی محوری لوله در مقطع بالادست متصل به مخزن $u_z(z=0) = 0$ ، سرعت محوری لوله در مقطع بالادست $\dot{u}_z(z=0) = 0$ ، هد فشار سیال در مقطع بالادست $H(z=0) = H_{Res}$ ، و در شرایط بسته شدن آبی شیر دبی تخلیه در مقطع پایین دست که می‌تواند توسط یک تابع پله بیان گردد $Q(z=l) = u(t) = \text{Unit Step}$.

۳- روش حل در حوزه فرکانس

۳-۱- تبدیل فرکانسی معادلات حاکم

برای دستیابی به حل تحلیلی به روش ماتریس انتقال که در ادامه تشریح می‌گردد، تبدیل لاپلاس بر معادلات (۱۷) الی (۲۰) اعمال شده است که نتیجه آن به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} + \frac{\rho_f g}{K} (S \bar{H} - H(t=0)) \\ - 2\nu \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} + (1 - \nu^2) \frac{D \rho_f g}{e} \\ \times (S [KV] \bar{H} - J_0 H(t=0)) = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

$$S \bar{V} - V(t=0) + g \frac{\partial \bar{H}}{\partial z} = 0 \quad (23)$$

$$S \bar{u}_z - \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial z} = 0 \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} - \frac{-1}{\rho_f c_t^2} (S \bar{\sigma}_z - \sigma_z(t=0)) \\ + g \frac{D \rho_f \nu}{2Ee} (S \bar{H} - H(t=0)) = \end{aligned} \quad (25)$$

$$S (\bar{\sigma}_z [KV] - J_0 \bar{\sigma}_z) - g \frac{D \rho_f \nu}{2e} S (\bar{H} [KV] - J_0 \bar{H})$$

به طور کلی و بدون در نظر گرفتن شرایط هر مسئله از قبیل جنس لوله و مکانیزم‌های اندرکنشی مورد بررسی، معادلات حاکم در حوزه زمان و فرکانس را می‌توان به فرم ماتریسی نمایش داد. براساس دسته معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر دینامیک سیال و سازه در یک خط لوله در حوزه

$$r = \begin{bmatrix} V(t=0) \\ \frac{g\rho_f}{K}H(t=0) + (1-\nu^2)\frac{gD\rho_f}{e}J_0H(t=0) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

مسئله ضربه قوچ در یک سیستم ساده مخزن-لوله-شیر و حل آن به روش ماتریسی در حوزه لاپلاس برای لوله الاستیک توسط ژانگ و همکاران [۹] با روش ماتریس انتقال انجام شده است. در تحقیق حاضر این روش برای تطبیق با سیستم مشتمل بر لوله ویسکوالاستیک توسعه یافته است. ایده اصلی حل تحلیلی به روش ماتریسی، بکارگیری تبدیل قطری ساز ماتریس حالت است. وقتی ماتریس تبدیل از بردارهای ویژه $A^{-1}B$ به دست آمد، معادلات به حالت غیرکوپل تبدیل می‌شوند و حل تحلیلی آنها امکان پذیر خواهد بود. بنابراین می‌توان انتظار داشت جواب دستگاه معادلات به فرم زیر باشد:

$$Y = K\nu_0 + Q \quad (37)$$

عبارت بالا همان حل معادله دیفرانسیل مرتبه اول خطی است که شامل یک جمله نمایی با ضریب حاصل از شرط اولیه و یک جمله به عنوان جواب خصوصی معادله دیفرانسیل است. بنابراین بردار V براساس شرایط مرزی تعیین می‌گردد. جملات نمایی پاسخ معادله در قالب یک ماتریس قطری که بالطبع در ماتریس تبدیل نیز ضرب می‌شود، قابل توصیف است [۹]:

$$K = SE = [W_1 \quad W_2 \quad W_3 \quad W_4] \times \begin{bmatrix} e^{\frac{-sz}{\lambda_1}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\frac{-sz}{\lambda_2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{\frac{-sz}{\lambda_3}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\frac{-sz}{\lambda_4}} \end{bmatrix} \quad (38)$$

که در آن بردارهای W_i بردارهای ویژه مسئله مقدار ویژه ماتریس‌های A و B یا به عبارت دیگر بردارهای ویژه ماتریس $A^{-1}B$ و پارامتر λ_i مقدار ویژه i ام آن است. ماتریس Q که در رابطه (۳۷) آمده است اثرات

$$r = \begin{bmatrix} V(t=0) \\ \frac{g\rho_f}{K}H(t=0) + (1-\nu^2)\frac{gD\rho_f}{e}J_0H(t=0) \\ 0 \\ \frac{-1}{\rho_f c_t^2}\sigma_z(t=0) + g\frac{D\rho_f\nu}{2Ee}H(t=0) \end{bmatrix} \quad (31)$$

اپراتور لاپلاس در مسئله حاضر نه تنها باعث حذف مشتقات زمانی می‌گردد، بلکه رابطه تنش-کرنش ماده ویسکوالاستیک را به صورت موثری ساده سازی می‌کند. در اینجا برای ساده سازی حل تحلیلی از اصطکاک صرفنظر و محور لوله افقی فرض می‌شود. براساس تعاریف ارائه شده در رابطه (۲۱) و $J_0 = 1/E$ ماتریس A به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\rho_f g}{K} + \frac{D\rho_f g}{e}[KV](1-\nu^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{gD\rho_f\nu}{2e}[KV] & 0 & -[KV] \end{bmatrix} \quad (32)$$

مقدار اولیه تنش محوری در لوله $\sigma_z(t=0)$ در رابطه (۳۱) هنگامی که انتهای پایین دست لوله مقید باشد، قابل محاسبه است. معادله (۱۵) برای حالت جریان پایدار عبارت خواهد بود از:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_{eq}} - \nu\frac{\sigma_\phi}{E_{eq}} = 0 \quad (33)$$

با توجه به شرط اولیه تنش محیطی که بر مبنای فشار سیال بیان می‌شود:

$$\sigma_\phi(t=0) = \frac{PD}{2e} = \frac{gD\rho_f}{2e}H(t=0) \quad (34)$$

تنش محوری اولیه در لوله به دست خواهد آمد:

$$\sigma_z(t=0) = \nu\sigma_\phi(t=0) = \frac{gD\rho_f\nu}{2e}H(t=0) \quad (35)$$

براساس معادله (۳۵) بردار r هنگامی که دو انتهای لوله مقید باشد قابل بازنویسی است:

شرایط اولیه را در خود دارد و به صورت زیر به دست می‌آید [۱۰]:

$$D_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & g \rho_f A_f & \pm sm & -g \rho_l A_l \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$f(L) = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm R_l(s) \end{bmatrix}$$

در رابطه (۴۳) پارامترهای A_f و A_l به ترتیب مساحت داخلی لوله و سطح مقطع جداره لوله می‌باشند. پارامتر R_l تبدیل لاپلاس تحریک خارجی اعمالی بر همان مقطع است. با انتخاب شرایط مرزی متناسب حال امکان محاسبه بردار V در رابطه (۳۷) ایجاد می‌گردد که براساس آن مجهولات در بردار حالت نیز به دست خواهند آمد [۱۰]:

$$v_0 = R^{-1} F \quad (44)$$

ماتریس‌های R و F که می‌توان آن‌ها را معرف نوع شرط مرزی و تابع تحریک نامید در رابطه زیر ارائه شده است:

$$R = \begin{bmatrix} D_1 K(0) \\ D_2 K(L) \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$F = \begin{bmatrix} f(0) - D_1 Q(0) \\ f(L) - D_2 Q(L) \end{bmatrix}$$

۴- ارائه نتایج

۴-۱- اعتبارسنجی مدل

در این بخش، نتایج مدل توسعه یافته با دو مسئله نمونه که برای آنها حل تحلیلی و داده‌های آزمایشگاهی موجود است ارائه می‌گردد. این مثال‌ها بر تحلیل جریان گذرا در حوزه فرکانس تمرکز دارند و از آنجا که در این دو مسئله لوله الاستیک مورد بررسی قرار گرفته است، مدل حاضر نیز با حذف پارامترهای مؤثر در شبیه سازی لوله ویسکوالاستیک به حالت الاستیک انطباق یافته است.

۴-۱-۱- مسئله اول: سیستم مخزن-لوله-شیر

در مسئله اول همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، یک لوله در بالادست به مخزن با تراز آب ثابت و در پایین دست به یک شیر متصل است. مقطع بالادست مقید و مقطع پایین دست آزاد فرض شده است. این فرضیات احتساب مکانیزم‌های اندرکنشی پواسون و اتصال را در مدل الزام

$$Q = S\bar{q} = [W_1 \quad W_2 \quad W_3 \quad W_4] \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$q_i = \frac{se^{-\frac{sz}{\lambda_i}}}{\lambda_i} \int_0^z r_i e^{-\frac{sz}{\lambda_i}} dx$$

پارامتر r_i درایه متناظر در بردار r است و Z موقعیت محوری در لوله را بیان می‌کند. انتگرال فوق به راحتی از طریق روش‌های عددی نظیر سیمپسون قابل حل می‌باشد.

۳-۲- تبدیل لاپلاس شرایط مرزی

برای حصول تطابق لازم با روش ماتریس انتقال، شرایط مرزی در هر دو انتهای لوله نیز می‌بایست به فرم ماتریسی نمایش داده شود. به طور کلی بعد از اعمال تبدیل لاپلاس شرط مرزی را می‌توان به صورت عمومی زیر نمایش داد [۱۰]:

$$D_1 Y(0) = f(0) \quad (40)$$

$$D_2 Y(L) = f(L)$$

که در آن D و f را می‌توان از میان گزینه‌های زیر براساس شرایط مرزی حاکم در مسئله انتخاب نمود:

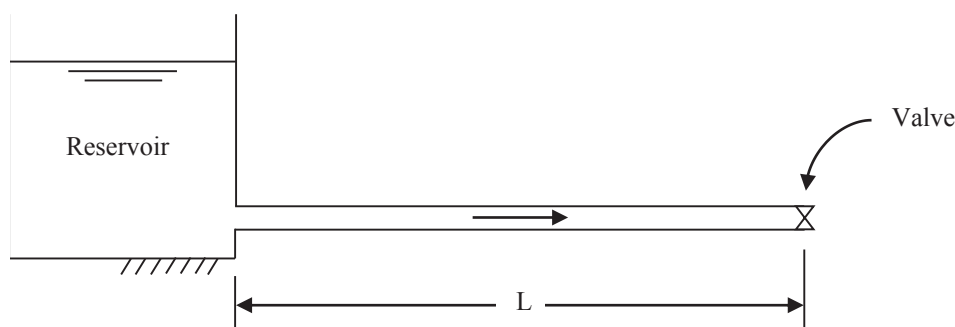
الف) انتهای باز مقید (مثلاً مقطع بالادست متصل به مخزن)

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, f(0) = \begin{bmatrix} u_g(s) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (41)$$

که در آن $u_g(s)$ سرعت تکیه گاه یا زمین می‌باشد.
ب) انتهای بسته مقید

$$D_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, f(L) = \begin{bmatrix} u_g(s) \\ u_g(s) \end{bmatrix} \quad (42)$$

ج) انتهای بسته آزاد با جرم m



شکل ۲: نمایش شماتیک سیستم مخزن-لوله-شیر در مسئله اول

Fig. 2. Schematic illustration of reservoir-pipe valve system of problem 1

در جدول ۳ ارائه شده است.

نتایج ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد مقدار مطلق اختلاف در فرکانس‌های طبیعی بالاتر افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد مدل تحلیلی حاضر در فرکانس‌های بالاتر با کاهش دقت همراه است، با این حال تطابق کلی نتایج با دو گروه داده دیگر مناسب است و اعتبار مدل حاضر را تأیید می‌نماید.

۴-۲- مطالعه موردی

بعد از ارزیابی و تأیید کاربرد مدل حاضر در مسائل ضربه قوچ، حال این مدل برای یک سیستم مخزن-لوله-شیر نمونه با لوله ویسکوالاستیک پلی وینیل کلراید پیاده سازی می‌گردد. انتظار می‌رود به دلیل مشخصه‌های

آور می‌نماید.

مشخصات مکانیکی و هندسی برای این سیستم در جدول ۱ ارائه شده است [۹].

جریان گذرا در این سیستم با بسته شدن آنی شیر در زمان $t = 0$ ایجاد می‌گردد و هدف به دست آوردن منحنی پاسخ فرکانسی سیستم جهت مقایسه با نتایج پژوهش ژانگ و همکاران [۹] است. این منحنی که در شکل ۳ ارائه شده است دامنه نوسان فشار را نسبت به فرکانس ارائه می‌کند. نتایج برای بازه فرکانسی ۰ تا ۲۵۰ هرتز در مقطع پایین دست لوله نمایش داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود منحنی پاسخ فرکانسی حاصل از مدل حاضر انطباق بسیار خوبی با نتایج حل تحلیلی دارد.

۴-۱-۱- مسئله دوم: ضربه قوچ در لوله بسته

مسئله دوم آزمایشی است که توسط واردی و همکاران [۳۰] انجام شده و در مطالعه دیگری توسط لی و همکاران [۱۶] جهت بررسی نتایج یک مدل عددی مورد استناد قرار گرفته است. این آزمایش که به دلیل دقت بالاتر در اعمال شرایط مرزی موردنظر نتایج قابل استناد و دقیقتری را برای مسئله ضربه قوچ ارائه می‌کند [۱۶]، شامل یک لوله آویزان شده به صورت افقی است که هر دو انتهای آن بسته شده و حاوی سیال آب است. شکل ۴ شماتیک این سیستم و جدول ۲ مشخصات آن را ارائه می‌کند.

به منظور اعتبارسنجی در این مسئله فرکانس‌های طبیعی سیستم به عنوان معیار صحت عملکرد مدل‌ها در مقایسه با فرکانس‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش، در نظر گرفته شده است. فرکانس‌های طبیعی استخراج شده از مدل حاضر در کنار داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی و همکاران

Table 1. Properties of the sample RPV system in problem 1

جدول ۱: مشخصات سیستم در مسئله اول

لوله فولادی	آب
$L=20 \text{ m}$	$K=2/1 \text{ GPa}$
$R=398/5 \text{ mm}$	$\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$
$e=8 \text{ mm}$	$\mu = 0/001 \text{ pa}$
$E=210 \text{ GPa}$	
$\rho_t = 7900 \text{ kg/m}^3$	
$\nu = 0/30$	
$m_l = 0 \text{ kg}$	
$\xi = 0/002$	

Table 2. Geometrical and mechanical properties of the system in problem 2

جدول ۲: مشخصات هندسی و مکانیکی سیستم مسئله دوم

لوله فولادی	آب	میله فولادی
$L = ۴/۵$ m	$K = ۲/۱۴$ GPa	$L_r = ۵/۰۲$ m
$R = ۵۲$ mm inner radius	$\rho_f = ۹۹۹$ kg/m ³	$E_r = ۲۰۰$ GPa
$e = ۳/۹۴۵$	$P_0 = ۲$ MPa	$\rho_r = ۷۸۴۸$ kg/m ³
$E = ۱۶۸$ GPa		$v_r = ۱$ m/s velocity
$\nu = ۰/۳$		$T_c = ۱/۹۸$ ms impact time
$\rho_t = ۷۹۸۵$ kg/m ³		$V_r = ۰/۱۱۷۵$ m/s impact velocity
$m_0 = ۱/۳۱۲$ kg		
$m_L = ۰/۳۲۵۸$ kg		

Table 3. Comparison of results from experimental data, numerical model and present study for natural frequencies of the system in problem 2

جدول ۳: فرکانس‌های طبیعی سیستم، مقایسه داده‌های آزمایشگاهی، نتایج مدل عددی و مدل حاضر

فرکانس								نتایج
۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۹۶۸	۹۱۸	۷۵۰	۶۳۶	۴۸۵	۴۵۹	۲۸۹	۱۷۳	تجربی
۹۴۵	۹۰۷	۷۴۱	۶۲۷	۴۷۲	۴۵۴	۲۸۶	۱۷۲	لی و همکاران (۲۰۰۲) [۱۳]
۹۴۸	۹۱۰	۷۴۳	۶۲۹	۴۷۴	۴۵۶	۲۸۵	۱۷۲	نتایج مدل حاضر

مفصل اندازه‌گیری تجربی در خصوص رفتار دینامیکی لوله پلی وینیل کلراید انجام شده و سپس پارامترهای توابع خزشی تنظیم شده‌اند، انطباق دارد. در کار اخیر که مشتمل بر یک سامانه داده برداری و سیستم خط لوله حلقه بسته می‌باشد، پارامترهای سختی و ثابت‌های زمانی به دقت استخراج شده و متعاقباً در تحلیل سیگنال فشار و کرنش بکار برده شده است.

۴-۳- بررسی و مقایسه نتایج در حالت‌های متنوع

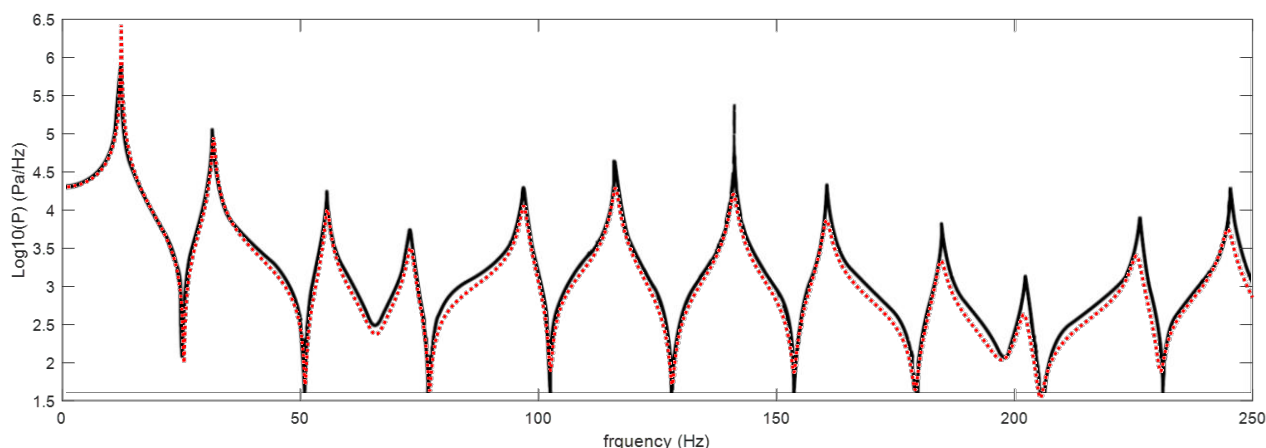
در این بخش با هدف مقایسه، تحلیل‌های مختلفی روی مسئله نمونه انجام شده است که نتایج آن اهمیت احتساب حالت‌های اندرکنشی مختلف و مشخصات مکانیکی سیستم را مشخص می‌سازد. دو حالت ماده الاستیک و ویسکوالاستیک برای لوله و هر کدام در سه حالت مختلف اندرکنشی شامل: حالت بدون اندرکنش جامد و سیال، تحلیل اندرکنشی شامل فقط کوپل پواسون، تحلیل اندرکنشی شامل کوپل پواسون و اتصال مدلسازی شده است. نتایج این تحلیل‌ها در قالب ۹ نمودار مقایسه‌ای و در شکل‌های ۵ الی ۹ ارائه گردیده است. لازم به ذکر است برای دستیابی به یک ماده الاستیک براساس

خزشی ماده ویسکوالاستیک و تفاوت در مدول الاستیسیته و نسبت پواسون در مقایسه با حالت الاستیک، تغییرات مشهود و قابل ملاحظه‌ای در منحنی پاسخ فرکانسی و دامنه تغییر پارامترها ایجاد گردد.

۴-۲-۱- مشخصات مکانیکی و هندسی

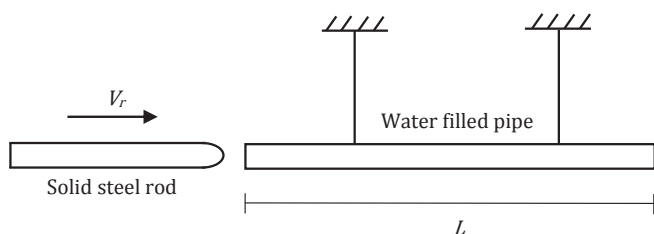
برای حفظ یکپارچگی مطالب همان هندسه کلی مسئله اول که در شکل ۲ نمایش داده شده بود برای مطالعه موردی انتخاب می‌شود. تنها تفاوت این است که در اینجا لوله ویسکوالاستیک فرض می‌گردد و بنابراین مشخصه‌های لوله از قبیل مدول یانگ، دانسیته و نسبت پواسون برای تطابق با ماده ویسکوالاستیک تغییر می‌یابد. مشخصات جدید در جدول ۴ لیست شده‌اند.

مقادیر ضرایب خزش در جدول ۴ که در مدل کلونین-ویت مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقادیر نمونه‌ای هستند که توسط کرامت و حقیقی [۳۱] برای آزمایش انجام شده در امپریال کالج در سال ۲۰۰۴ [۲۱] کالیبره شده‌اند. این مقادیر با داده‌های ارائه شده در اثر کپلر و همکاران [۳۲] که در آن بطور



شکل ۳: دامنه نوسان فشار در مقطع پایین دست لوله، نتایج حل تحلیلی ژانگ و همکاران (خط) و نتایج مدل حاضر (نقطه چین)

Fig. 3. Pressure oscillation amplitude at downstream section of the pipe, analytical solution of Zhang et al. [9] (black line) and proposed model (red dotted line)



شکل ۴: ضربه محوری به یک لوله فولادی آویزان شده حاوی آب

Fig. 4. Axial impact to a free hanging water filled steel pipe

Table 2. Properties of the sample RPV system with VE pipe material

جدول ۴: مشخصات مسئله نمونه مخزن-لوله-شیر با لوله ویسکوالاستیک

لوله پلی وینیل کلراید	آب		
$L=20 \text{ m}$	$K=2/1 \text{ GPa}$		
$R=398/5 \text{ mm}$	$\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$		
$e=8 \text{ mm}$	$\mu = 0.001 \text{ Pa}$		
$E=1/43 \text{ GPa}$	-		
$\rho_t = 1000 \text{ kg/m}^3$	-		
$\nu = 0.46$	-		
$m_t = 0. \text{ kg}$	-		
$\xi = 0.002$	-		
$J_0 = 1/E$	-		
ضرایب خزش			
K	۱	۲	۳
J_K	$1/0.57 \text{ e}^{-10}$	$1/0.54 \text{ e}^{-10}$	0.1905 e^{-10}
τ_K	0.05	0.5	1/5

ماده ویسکوالاستیک تعریف شده در جدول ۴، ضرایب خزش صفر منظور شده و سایر مشخصات تغییر نیافته‌اند تا مقایسه معناداری در تئوری حاصل شود. این تغییر، کرنش تاخیری را از تحلیل اندرکنشی حذف می‌نماید. هدف از این کار بررسی میزان تأثیر این ساده سازی بر نتایج مدل است. برای حالتی که تحلیل بدون اندرکنش جامد و سیال مدنظر است حرکت محوری در طول خط لوله باید صفر فرض شود به عبارت دیگر $\varepsilon_z = 0$ ، در این حالت:

$$\sigma_z * dJ = \nu(\sigma_\phi * dJ)$$

$$\varepsilon_\phi = (1 - \nu^2)(\sigma_\phi * dJ) \quad (46)$$

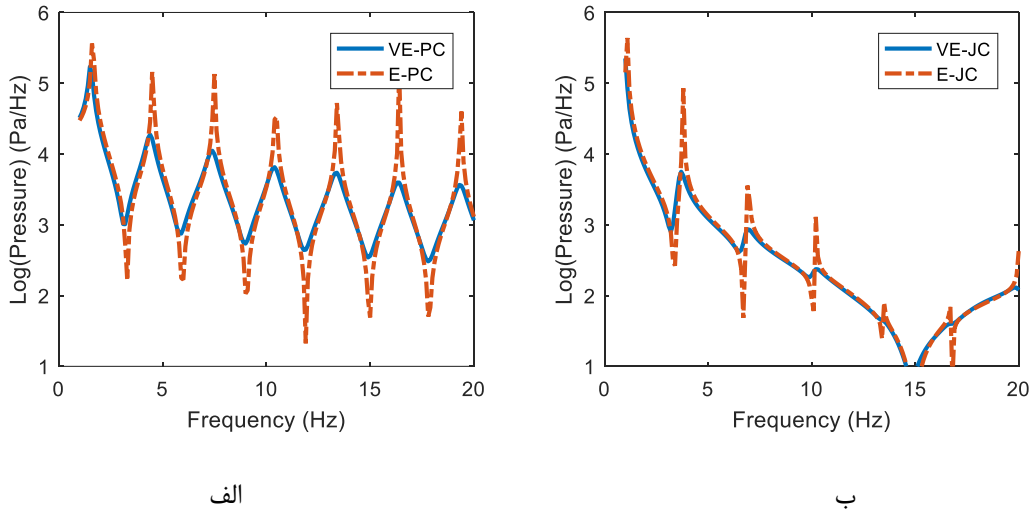
$$\sigma_\phi = \frac{\rho g D H}{2e}$$

این فرض در معادله پیوستگی تأثیر می‌گذارد. معادلات حاکم بر رفتار سیال شامل معادلات پیوستگی و ممنتوم در این حالت به فرم زیر خواهند بود:

$$\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\rho_f g}{K} \frac{\partial H}{\partial t} + (1 - \nu^2) \frac{D \rho_f g}{e} \frac{\partial (H * dJ)}{\partial t} = 0 \quad (47)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} = 0$$

با اعمال تبدیل لاپلاس بر روابط (۴۷) خواهیم داشت:



شکل ۵: مقایسه دامنه نوسان فشار در مقطع پایین دست برای لوله الاستیک و ویسکوالاستیک؛ (الف) آنالیز اندرکنشی فقط با کوپل پواسون، (ب) آنالیز اندرکنشی فقط با کوپل اتصال

Fig. 5. Comparison of Amplitude of pressure oscillation at downstream end of the pipe for Elastic and Viscoelastic pipe, (a) Considering only Poisson coupling, (b) Considering only junction coupling

برای هر دو حالت اندرکنش کوپل پواسون و اتصال همانطور که پیش بینی می‌شد در دامنه نوسانات فشار مشاهده می‌شود. در حالت الاستیک دامنه نوسان فشار افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است. تابع خزش در ماده ویسکوالاستیک رفتاری مشابه میراگر داشته و باعث استهلاک نوسانات شده است. این یک عملکرد عمومی برای سیستم‌های دارای میراگر است. چنین تاثیری را همچنین می‌توان از طریق اعمال مدول الاستیسیته مختلط در مدل ایجاد نمود که به دفعات در پژوهش‌های قبلی به آن اشاره شده است [۲۲، ۳۳-۳۵]. از نمودارهای شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت که صرف نظر کردن از مدل ماده ویسکوالاستیک باعث تخمین نادرست دامنه نوسانات پارامترها خواهد شد. فرکانس‌های طبیعی سیستم در دو حالت الاستیک و ویسکوالاستیک و برای هر دو حالت آنالیز اندرکنشی، تغییر قابل توجهی نداشته‌اند.

در شکل ۶ نکته مهم دیگری در خصوص تأثیر عدم احتساب کوپل پواسون بر جابجایی منحنی پاسخ فرکانسی نمایان شده است. این جابجایی در هر دو منحنی حالت الاستیک و ویسکوالاستیک مشاهده می‌شود. در حقیقت با در نظر گرفتن کوپل پواسون، فرض صلبیت لوله در تئوری ضربه قوچ کلاسیک حذف می‌شود و این موضوع به دلیل ایجاد اندرکنش بین سیال و سازه باعث تغییر فرکانس‌های طبیعی سیستم کوپل شده نسبت به سیستم غیر کوپل می‌گردد. از نقطه نظر انرژی درصدی از انرژی وارد شده به سیستم از طریق تغییر شکل محوری لوله مصرف و یا جایگزین می‌گردد و در نتیجه سیستم انطباق بیشتری نشان می‌دهد. این موضوع به فرکانس‌های طبیعی

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial z} + \frac{\rho_f g}{K} (S\bar{H} - H(t=0)) + (1-\nu^2) \frac{D\rho_f g}{e} \times (S [KV] \bar{H} - J_0 H(t=0)) = 0 \quad (48)$$

$$S\bar{V} - V(t=0) + g \frac{\partial \bar{H}}{\partial z} = 0$$

و این دو معادله را می‌توان به فرم ماتریسی که در رابطه (۲۷) ارائه شده بود، شامل ماتریس‌های ضرایب و باقیمانده به صورت زیر بیان نمود:

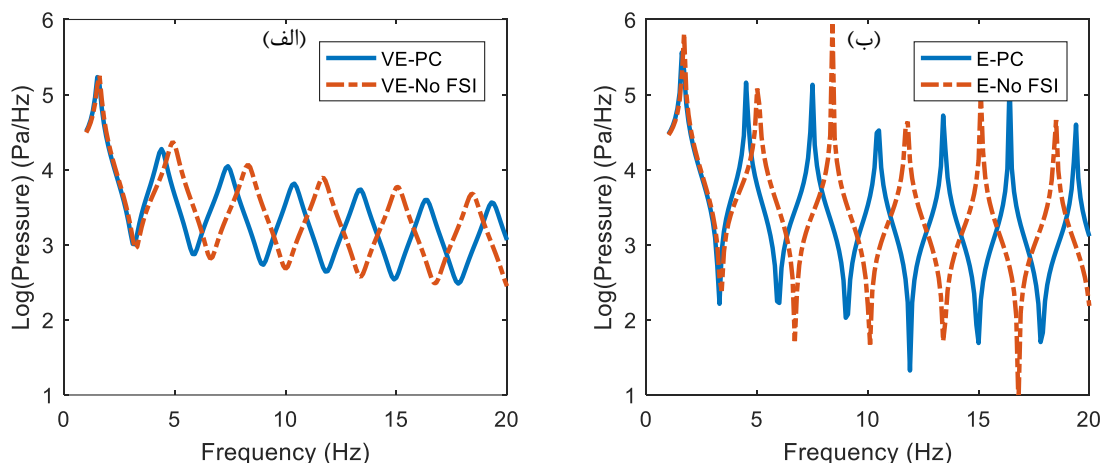
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\rho_f g}{K} + \frac{D\rho_f g}{e} [KV] (1-\nu^2) \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\rho_f} \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \frac{g\rho_f}{K} H(t=0) + (1-\nu^2) \frac{gD\rho_f}{e} J_0 H(t=0) \\ V(t=0) \end{bmatrix}$$

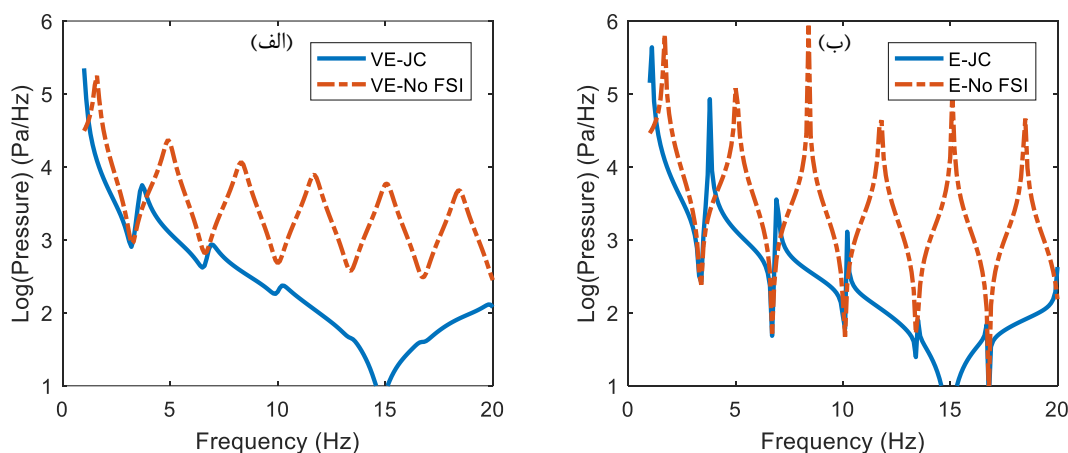
نتایج این مدل به درک اهمیت آنالیز اندرکنش جامد و سیال در لوله‌های ویسکوالاستیک کمک خواهد کرد. در ادامه نتایج تحلیل‌های فوق ارائه و تشریح می‌گردد.

تفاوت آشکار منحنی پاسخ فرکانسی جداره الاستیک و ویسکوالاستیک



شکل ۶: مقایسه دامنه نوسان فشار در مقطع پایین دست با و بدون کوپل پواسون؛ (الف) لوله ویسکوالاستیک، (ب) لوله الاستیک

Fig. 6. Comparison of Amplitude of pressure oscillation at downstream end of the pipe with and without Poisson coupling, (a) For a viscoelastic pipe, (b) For an elastic pipe



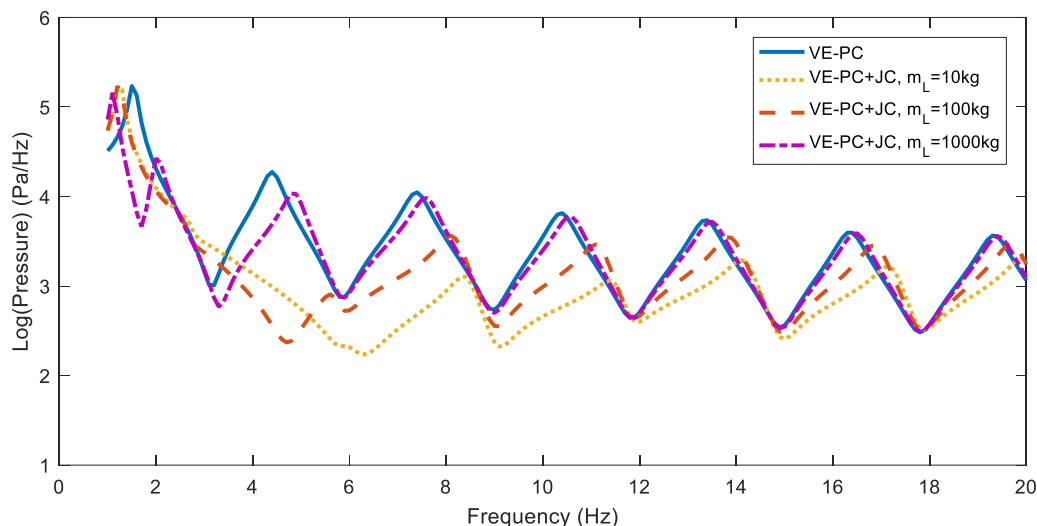
شکل ۷: مقایسه دامنه نوسان فشار در مقطع پایین دست با و بدون کوپل اتصال؛ (الف) لوله ویسکوالاستیک، (ب) لوله الاستیک

Fig. 7. Comparison of Amplitude of pressure oscillation at downstream end of the pipe with and without junction coupling, (a) For a viscoelastic pipe, (b) For an elastic pipe

نتایج تحلیل پرداخته شده است.

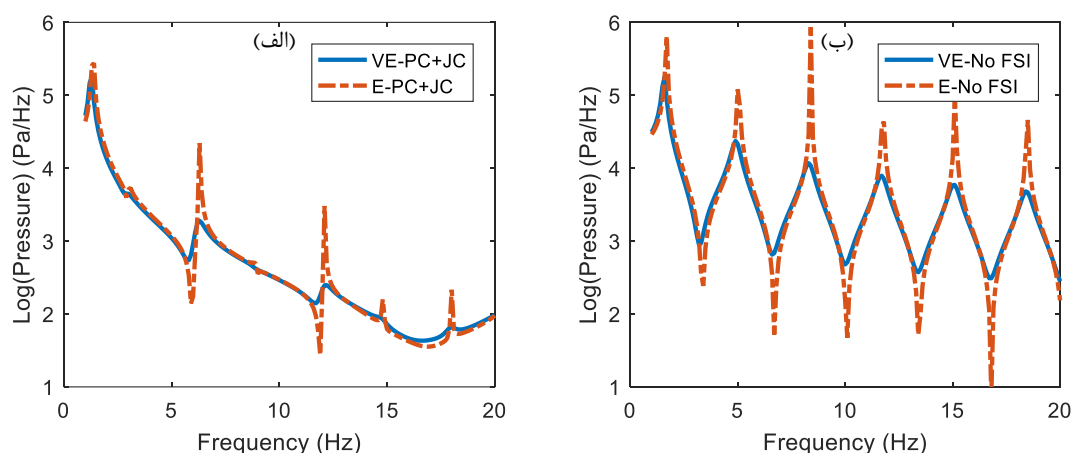
گراف‌های شکل ۷ نشان می‌دهد کوپل اتصال باتوجه به شرایط مرزی در مسئله حاضر می‌تواند تأثیر زیادی در نتایج داشته باشد و صرفنظر کردن از آن رفتار سیستم را بدرستی پیش بینی نخواهد کرد. از گراف‌های ترسیم شده همچنین می‌توان نتیجه گرفت تأثیر کوپل اتصال بر هارمونیک‌های فرد در مسئله حاضر چشمگیر بوده و دامنه نوسان فشار در فرکانس‌های طبیعی فرد سیستم به شدت کاهش یافته‌اند. در عین حال فرکانس‌های طبیعی سیستم در اثر وجود اندرکنش اتصال تغییر قابل توجهی داشته‌اند. با توجه به ماهیت

کوچک‌تر منجر می‌شود که در نتایج فوق نیز آشکار است. در کاربرد می‌توان از این ویژگی به عنوان روشی در انتخاب مصالح مناسب برای دستیابی به پاسخ فرکانسی موردنظر سیستم بهره برد. از طرف دیگر گراف‌های شکل ۶ نشان می‌دهد بدون تغییر مصالح لوله و با حذف کردن کوپل پواسون از طریق مقید نمودن لوله می‌توان فرکانس‌های طبیعی سیستم را افزایش داد. بنابراین به طور خلاصه تأثیرات کلیدی دو دینامیک بررسی شده بیانگر رفتار میرا کننده ماده ویسکوالاستیک و ایجاد تغییر در فرکانس‌های طبیعی سیستم در اثر کوپل پواسون بوده است. در شکل ۷ به بررسی تأثیر کوپل اتصال در



شکل ۸: منحنی دامنه نوسان فشار در مقطع پایین دست برای ۳ مقدار مختلف جرم شیر پایین دست و حالت بدون کوپل اتصال

Fig. 8. Amplitude of pressure oscillation at downstream end of the pipe, for 3 different values of valve mass, along with no junction coupling case



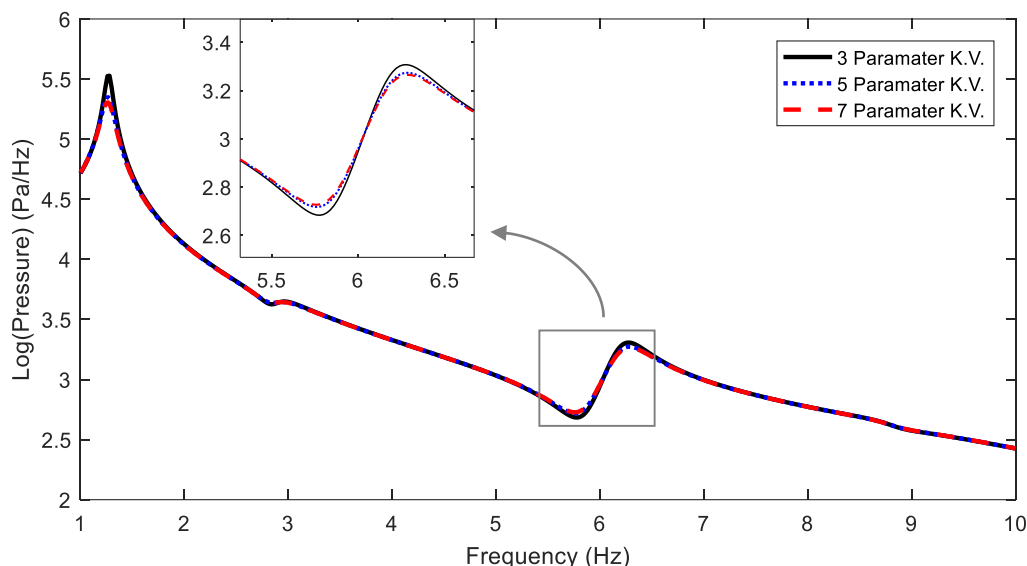
شکل ۹: مقایسه دامنه نوسان فشار در مقطع پایین دست برای لوله الاستیک و ویسکوالاستیک؛ (الف) آنالیز اندرکنشی با کوپل پواسون و اتصال، (ب) بدون اندرکنش جامد و سیال

Fig. 9. Comparison of Amplitude of pressure oscillation at downstream end of the pipe for Elastic and Viscoelastic pipe, (a) Considering Poisson and junction coupling, (b) No FSI mechanism considered

صحت این موضوع به عنوان یک اعتبارسنجی مضاعف برای مدل حاضر در شکل ۸ مورد بررسی قرار گرفته است. در اینجا منحنی پاسخ فرکانسی برای سه جرم متفاوت شیر پایین دست همزمان با حالت بدون تداخل ترسیم شده است. بر اساس منحنی شکل ۸ می‌توان کاهش تأثیر تداخل اتصال با افزایش جرم شیر را تأیید نمود و صحت عملکرد مدل در این زمینه نیز تأیید می‌گردد. نتایج تحلیل اندرکنشی با هر دو مکانیزم تداخلی پواسون و اتصال برای لوله الاستیک و ویسکوالاستیک در شکل ۹ (الف) و بدون احتساب اثرات

کوپل اتصال که در نتیجه تغییر شکل و یا جابجایی تکیه گاه‌ها به مدل وارد می‌شود، می‌توان انتظار داشت با افزایش جرم مقطع پایین دست در مسئله حاضر، باید شاهد باشیم رفتار سیستم به حالتی که در آن انتهای پایین دست مقید است سوق پیدا کند.

مقید بودن مقطع پایین دست در مسئله حاضر به معنی حذف کوپل اتصال خواهد بود. به عبارت دیگر با افزایش جرم مقطع پایین دست می‌بایست شاهد کاهش تأثیر کوپل اتصال بر منحنی پاسخ فرکانسی باشیم.



شکل ۱۰: دامنه نوسان فشار در مقطع پایین دست لوله با احتساب کوپل پواسون و اتصال برای مرتبه‌های مختلف مدل کلون-ویت

Fig. 10. Amplitude of pressure oscillation at downstream end of the pipe considering Poisson and junction coupling for differnet orders of Kelvin-Voigt model

دقت مدل، منحنی در محل قله‌ها ملایم‌تر شده که نشان می‌دهد خاصیت میرایی ماده ویسکوالاستیک دقیق‌تر مدل شده است.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق یک مدل فرکانسی برای مطالعه جریان گذرا در لوله ویسکوالاستیک توسعه یافت. اعتبار این مدل با پیاده سازی در دو مسئله نمونه بررسی و تأیید گردید. در ادامه یک سیستم ساده مخزن-لوله ویسکوالاستیک-شیر برای دستیابی به منحنی پاسخ فرکانسی سیستم به عنوان مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهش حاضر با هدف درک اهمیت و تأثیر مکانیزم‌ها و مدل‌ها، فیزیک‌های مختلفی در قالب آنالیز پاسخ فرکانسی مدل‌سازی و تحلیل شد. حالت‌های متنوع تحلیل شده شامل سیستم با لوله ویسکوالاستیک و الاستیک متناظر، با و بدون احتساب اثرات اندرکنشی می‌باشد. همچنین مدل کلون-ویت با دقت‌های مختلف به کار گرفته شد تا دقت بهینه برای مسئله حاضر بررسی شود. از نتایج این بررسی‌ها می‌توان به دستاوردهای زیر را برشمرد:

۱- رفتار لوله ویسکوالاستیک تأثیر بسزایی در پاسخ سیستم بخصوص در فرکانس‌های طبیعی دارد. این تأثیر مشابه اثر استهلاک سازه‌ای و رفتار میراگرها در سیستم‌های مکانیکی می‌باشد. صرف‌نظر کردن از مدل‌سازی لوله ویسکوالاستیک و بکارگیری مدل الاستیک بجای آن، باعث می‌شود نتایج دست بالا به دست آیند.

اندرکنش جامد و سیال در شکل ۹ (ب) جهت مقایسه نمایش داده شده است. هر دو گراف نتیجه‌گیری‌های حاصل از نمودارهای قبلی را تأیید می‌کند. اگرچه در توضیحات گراف‌های قبلی هم به مشابهت مقدار فرکانس‌های طبیعی در دو حالت الاستیک و ویسکوالاستیک اشاره شده، با این حال در بررسی دقیق‌تر اختلاف جزئی در مقادیر فرکانس‌ها مشاهده می‌شود. در شکل ۹ این اختلاف قابل مشاهده است و مقدار فرکانس طبیعی برای حالت ویسکوالاستیک کمتر از حالت الاستیک است. باید توجه داشت مقدار دامنه متناظر با فرکانس‌های طبیعی شدت تغییر کرده که عمدتاً به دلیل وجود خواص میرایی نهفته در ماده ویسکوالاستیک است. می‌توان نتیجه گرفت خزش و کرنش تاخیری در مواد ویسکوالاستیک منتج به فرکانس‌های طبیعی پایین‌تر در سیستم می‌گردد. مقدار این اختلاف می‌تواند به مشخصات هندسی و مکانیکی ماده ویسکوالاستیک مرتبط باشد و نیاز به مطالعه جامع‌تری دارد. لازم به ذکر است در تمام تحلیل‌های انجام شده که نتایج آن در گراف‌های بالا ارائه شد از مدل سه پارامتری کلون-ویت برای ماده ویسکوالاستیک استفاده شده است. برای بررسی میزان دقت مدل سه پارامتری کلون-ویت در مقایسه با مرتبه‌های بالاتر در شکل ۱۰ نتایج آخرین تحلیل که شامل هر دو کوپل پواسون و اتصال است برای مدل‌های ۳، ۵ و ۷ پارامتری کلون-ویت ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مدل سه پارامتری برای ماده پلی وینیل کلراید مورد بررسی در این مسئله، دقت قابل قبولی دارد. با مقایسه منحنی‌ها می‌توان استنتاج نمود با افزایش

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
سرعت موج، m/s	c
قطر داخلی لوله، m	D
مدول یانگ لوله، Pa	E
ضخامت جداره لوله، m	e
اندرکنش سیال سازه	FSI
ضریب اصطکاک	f
شتاب گرانش، m/s	g
هد فشار، m	H
کرنش محوری تاخیری	I_{σ_z}
کرنش محیطی تاخیری	I_H
تابع خزش برای مصالح لوله، Pa ⁻¹	J
مدول الاستیسیته بالک، Pa	K
مدل کلونین-ویت	KV
طول، m	L
جرم لوله در مقطع $z=l$ ، kg	m_l
فشار، Pa	p
ضرایب در مدل کلونین-ویت	P, q_0, q_1
شعاع داخلی لوله، m	R
سیستم مخزن-لوله-شیر	RPV
پارامتر لاپلاس (فرکانس مختلط)، s ⁻¹	s
زمان، s	t
روش ماتریس انتقال	TMM
جابجایی لوله، m	u
سرعت لوله، m/s	\dot{u}
سرعت متوسط سیال، m/s	V
ماده ویسکوالاستیک	VE
علائم یونانی	
کرنش	ε
زاویه محور لوله نسبت به افق، rad	θ
مقدار ویژه، m/s	λ
ضریب لزجت مولکولی، Pa	μ
نسبت پواسون	ν
ضریب میرایی	ξ
چگالی، m ³ /s	ρ
تنش نرمال، Pa	σ
زمان خزش، s	τ

۲- فرکانس‌های طبیعی در حالت ویسکوالاستیک در مقایسه با حالت الاستیک کاهش یافته است. اگرچه برای لوله پلی وینیل کلراید در نظر گرفته شده در این مسئله این اختلاف ناچیز است. میزان تأثیر ویسکوالاستیسیته و کرنش تاخیری بر کاهش فرکانس‌های طبیعی می‌تواند به پارامترهای هندسی و مکانیکی سیستم نیز وابسته باشد که نیازمند مطالعه بیشتر است.

۳- صرف‌نظر کردن از کوپل پواسون باعث جابجایی قابل توجه منحنی پاسخ فرکانسی در امتداد محور فرکانس می‌شود. عدم احتساب این مکانیزم تداخلی فرکانس‌های طبیعی بزرگتری را به دست می‌دهد. بنابراین برای حصول نتیجه قابل استناد مکانیزم‌های اندرکنشی اثرگذار در مسئله باید شناسایی و در مدل اعمال شوند.

۴- علاوه بر کوپل پواسون، کوپل اتصال نیز بسته به شرایط مرزی در مسئله می‌تواند تأثیر قابل توجهی در خروجی مدل‌ها داشته باشد و تأثیر آن با افزایش جرم در مقطع آزاد لوله کاهش می‌یابد.

۵- عملکرد مدل ۳ پارامتری کلونین-ویت اعمال شده در مسئله حاضر و برای لوله پلی وینیل کلراید مورد بررسی در مقایسه با مدل‌های مرتبه بالاتر قابل قبول می‌باشد. اختلاف جزئی در مقادیر دامنه نوسان پارامترها در فرکانس‌های طبیعی مشاهده شد که با افزایش دقت مدل، منحنی‌های ملایم‌تری به دست آمد. البته در خصوص سایر مواد ویسکوالاستیک از جمله لوله‌های پلی اتیلن نیاز به مطالعه مستقل در باب تأثیر افزایش مرتبه مدل می‌باشد.

بر اساس مدل‌سازی ارائه شده در این تحقیق، آنالیز در حوزه فرکانس می‌تواند نسبت به تحلیل‌های حوزه زمان در زمینه پیش بینی رفتار جریان گذرا در لوله ویسکوالاستیک سریع و در عین حال دقیق باشد. یک مزیت کلیدی روش تحلیل در حوزه فرکانس امکان مطالعه پارامتری راحت‌تر در قالب مدل به دست آمده است. در تکمیل پژوهش حاضر، بررسی تأثیر پارامترهای هندسی، مکانیکی و ضرایب خزش در رفتار کلی سیستم به سهولت قابل انجام است.

منابع

- [1] Y.L. Zhang, K. Vairavamoorthy, Analysis of transient flow in pipelines with fluid-structure interaction using method of lines, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 63 (2005) 1446-1460.
- [2] D. Ferràs, P.A. Manso, A.J. Schleiss, D.I.C. Covas, Fluid-structure interaction in straight pipelines: Friction coupling mechanisms, *Computers & Structures*, 175 (2016) 74-90.
- [3] A. Keramat, A. Ahmadi, Axial wave propagation in viscoelastic bars using a new finite-element-based method, *Journal of Engineering Mathematics*, 77 (2012) 105-117.
- [4] A. Bergant, Simpson, A.R., Pipeline column separation flow regimes, *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 125 (1999) 835-848.
- [5] a. Ahmadi, a. Keramat, Investigation of fluid-structure interaction with various types of junction coupling, *Journal of Fluids and Structures*, 26 (2010) 1123-1141.
- [6] S.C. Tentarelli, Propagation of Noise and Vibration in Complex Hydraulic Tubing Systems, U.M.I. Dissertation Information Service, 1990.
- [7] M.H. Afshar, M. Rohani, Water hammer simulation by implicit method of characteristic, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85 (2008) 851-859.
- [8] R. Zanganeh, A. Ahmadi, A. Keramat, Fluid-structure interaction with viscoelastic supports during waterhammer in a pipeline, *Journal of Fluids and Structures*, 54 (2015) 215-234.
- [9] L. Zhang, S.A. Tijsseling, E.A. Vardy, Fsi Analysis of Liquid-Filled Pipes, *Journal of Sound and Vibration*, 224 (1999) 69-99.
- [10] P.J. Lee, H.-F. Duan, M. Ghidaoui, B. Karney, Frequency

اپراتور لاپلاس	\mathcal{L}
ماتریس‌ها و بردارها	
ماتریس ضرایب	A, \bar{A}
ماتریس ضرایب	B
ماتریس ضرایب اصطکاک و میرایی	C
ماتریس ضرایب شرایط مرزی	D
ماتریس قطری ضرایب نمایی	E
تابع تحریک	F
ماتریس تعریقی شده در رابطه (۲۴)	K
ماتریس ضرایب اولیه	Q
بردار تعریف شده در رابطه (۲۵)	\bar{q}
ماتریس نوع شرایط مرزی	R
ماتریس حاوی بردارهای ویژه	S
ماتریس تبدیل	T
بردار مجهولات	Y
بردار تحریک خارجی	r
ماتریس قطری ضرایب	Λ
بردار شرایط مرزی	V_0
زیرنویس‌ها	
جنس سیال	f
شماره المان در بردار یا ماتریس	i
شماره المان در بردار یا ماتریس	k
موقعیت محوری $z=l$	L, l
جنس مصالح لوله	t
جهت محور لوله	z

۷- تقدیر و تشکر

این فعالیت حاصل تحقیق رساله دکتری نویسنده نخست مقاله در دانشگاه صنعتی شاهرود است که با حمایت‌ها و مشاوره‌های ارزنده استاد راهنما جناب آقای دکتر احمدی و نیز با مشورت‌های مؤثر جناب آقای دکتر کرامت به سرانجام رسیده است. هر دو این بزرگواران در مباحث تحلیل جریان‌های گذرا و تأثیر مصالح ویسکوالاستیک سال‌ها دارای سوابق تحقیقاتی ارزشمند و یکتا در سطح کشور هستند. این فعالیت که به نوبه خود یک مدلسازی نوین مبتنی بر حوزه فرکانس از لوله‌های ویسکوالاستیک ارائه کرده است، دریچه‌ای برای ورود به انبوه تحقیقات کاربردی خواهد بود و به همه متخصصان و محققان دلسوز کشور تقدیم می‌شود.

- Water Hammer, Task Quarterly, 11 (2007) 383-395.
- [21] D. Covas, Stoianov, I., Mano, J., Ramos, H., Graham, N., and Maksimovic, C., The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part I— Experimental analysis and creep characterization, Journal of Hydraulic Research, 42 (2004) 516-530.
- [22] M. Prek, Analysis of wave propagation in fluid-filled viscoelastic pipes, Mechanical Systems and Signal Processing, 21 (2007) 1907-1916.
- [23] H.-F. Duan, M. Ghidaoui, P.J. Lee, Y.-K. Tung, Unsteady friction and visco-elasticity in pipe fluid transients, Journal of Hydraulic Research, 48 (2010) 354-362.
- [24] A. Keramat, A.S. Tijsseling, Q. Hou, A. Ahmadi, Fluid-structure interaction with pipe-wall viscoelasticity during water hammer, Journal of Fluids and Structures, 28 (2012) 434-455.
- [25] S. Meniconi, B. Brunone, M. Ferrante, Water-hammer pressure waves interaction at cross-section changes in series in viscoelastic pipes, Journal of Fluids and Structures, 33 (2012) 44-58.
- [26] S. Meniconi, B. Brunone, M. Ferrante, C. Massari, Energy dissipation and pressure decay during transients in viscoelastic pipes with an in-line valve, Journal of Fluids and Structures, 45 (2014) 235-249.
- [27] J. Gong, A. Zecchin, M. Lambert, A. Simpson, Study on the frequency response function of viscoelastic pipelines using a multi-element Kelvin-Voigt model, Procedia Engineering, 119 (2015) 226-234.
- [28] J.D. Ferry, J.D. Ferry, Viscoelastic Properties of Polymers, Wiley, 1980.
- [29] A.S. Wineman, K.R. Rajagopal, Mechanical Response of Polymers: An Introduction, Cambridge University Press, 2000.
- domain analysis of pipe fluid transient behaviour, Journal of Hydraulic Research, 51 (2013) 609-622.
- [11] H. Duan, Investigation of factors affecting transient pressure wave propagation and implications to transient based leak detection methods in pipeline systems, Hong Kong University of Science and Technology, 2011.
- [12] A. D'souza, R. Oldenburger, Dynamic response of fluid lines, ASME Journal of Basic Engineering, 86 (1964) 589-598.
- [13] C.A. de Jong, Analysis of pulsations and vibrations in fluid-filled pipe systems, TNO Institute of Applied Physics, 1994.
- [14] E. Pestel, F.A. Leckie, Matrix methods in elastomechanics, McGraw-Hill, 1963.
- [15] M.H. Chaudhry, Applied Hydraulic Transients, Springer New York, 2013.
- [16] Q.S. Li, K. Yang, L. Zhang, N. Zhang, Frequency domain analysis of fluid-structure interaction in liquid-filled pipe systems by transfer matrix method, International Journal of Mechanical Sciences, 44 (2002) 2067-2087.
- [17] H. Karimian Aliabadi, A. Ahmadi, A. Keramat, Study of Fluid Structure Interaction in viscoelastic pipe based on a new extension of Transfer Matrix Method, Modares Mechanical Engineering, 16 (2016) 330-338.
- [18] E.M. Wahba, On the two-dimensional characteristics of laminar fluid transients in viscoelastic pipes, Journal of Fluids and Structures, 68 (2017) 113-124.
- [19] D. Covas, I.S. Técnico, A.R. Pais, The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients . Part II — model development , calibration and verification, Journal of Hydraulic research, 43(1) (2005) 56-70.
- [20] K. Weinerowska-bords, Accuracy and Parameter Estimation of Elastic and Viscoelastic Models of the

- [33] L. Gaul, The influence of damping on waves and vibrations, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13 (1999) 1-30.
- [34] E. Barkanov, W. Hufenbach, L. Kroll, Transient response analysis of systems with different damping models, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192 (2003) 33-46.
- [35] M. Prek, Wavelet analysis of sound signal in fluid-filled viscoelastic pipes, *Journal of Fluids and Structures*, 19 (2004) 63-72.
- [30] A. Vardy, D. Fan, A. Tijsseling, Fluid-structure Interaction in a T-piece Pipe, *Journal of Fluids and Structures*, 10 (1996) 763-786.
- [31] A. Keramat, A. Haghighi, Straightforward Transient-Based Approach for the Creep Function Determination in Viscoelastic Pipes, *Journal of Hydraulic Engineering*, (2014) 1-9.
- [32] A.K. Soares, D.I. Covas, L.F. Reis, Analysis of PVC Pipe-Wall Viscoelasticity during Water Hammer, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134 (2008) 1389-1394.

