

مقاله علمی-پژوهشی

تأثیر خاصیت ویسکوالاستیک لوله بر طراحی بهینه شبکه آبیاری تحت فشار در شرایط ضربه قوچ (مطالعه موردی شبکه آبیاری تحت فشار اسماعیل آباد لرستان)

آتنا حاضری^۱، رسول قبادیان^{۲*}، محمدمهدی حیدری^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۵

چکیده

خاصیت کرنش تأخیری در لوله‌های پلی اتیلن، واکنش آن‌ها را در مقابل ضربه قوچ متفاوت از لوله‌های الاستیک می‌نماید. تحقیق حاضر بر روی تأثیر خاصیت ویسکوالاستیک بر طراحی بهینه سیستم آبیاری تحت فشار با در نظر گرفتن ملاحظات ضربه قوچ تمرکز دارد. بدین منظور سه مدل بهینه‌ساز، شبیه‌ساز جریان ماندگار و محاسبه گر ضربه قوچ کد نویسی و در قالب یک مدل کامپیوتری به همدیگر لینک شدند. در مدل بهینه‌ساز جمعیت اولیه از قطرهای موجود ایجاد می‌شود. سپس برای هر عضو این جمعیت در مدل شبیه‌سازی جریان ماندگار مقادیر فشار در گره‌ها و سرعت در لوله‌ها محاسبه می‌شود. این مقادیر به‌عنوان شرط اولیه به مدل ضربه قوچ ارسال می‌شود. در مدل شبیه‌ساز جریان غیر ماندگار که در آن معادلات حاکم به روش خطوط مشخصه حل شده‌اند با اعمال ضربه قوچ بر روی سیستم حداکثر اضافه فشار در هر گره محاسبه و نتایج به مدل بهینه‌ساز ارسال می‌گردد. در این تحقیق برای بهینه یابی قطر لوله‌های سیستم همچنین نوع و تعداد پمپ بهینه ایستگاه پمپاژ، تابع هدف به‌صورت کمینه نمودن مجموع هزینه‌های جاری و ثابت در طول عمر مفید پروژه ضمن رعایت محدودیت‌های سرعت و فشار در نظر گرفته شده است. مقدار تابع هدف با رعایت قیود برای هر عضو جمعیت اولیه محاسبه می‌شود. با اعمال عملیات جهش، تقاطع، جایگزینی با رویکرد نخبه‌گرایی نهایتاً نسل بعدی محاسبه می‌شود و مراحل مذکور تا رسیدن به شرط توقف محاسبات و تعیین جواب بهینه تکرار می‌گردد. صحت سنجی مدل شبیه‌سازی جریان غیر ماندگار در لوله‌های ویسکوالاستیک با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در کالج سلطنتی لندن و در نظر گرفتن تعداد سه المان کلون-ویت و زمان‌های تأخیر ۰/۰۵، ۱/۵ و ۵ ثانیه برای آن‌ها انجام شده است. نتایج نشان داد برای سرعت انتشار امواج فشاری ۳۹۰ متر بر ثانیه نوسانات فشار اندازه‌گیری شده با محاسباتی تطابق مناسبی دارند. پس از اطمینان به نتایج مدل شبیه‌سازی جریان غیر ماندگار شبکه اسماعیل آباد در وضع موجود که مرکب از لوله‌های GRP و HDPE است، با و بدون در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک برای لوله‌های پلی اتیلن انجام شد. نتایج این مرحله نشان داد که میانگین اضافه فشار ایجاد شده در گره‌ها پس از اعمال ضربه قوچ در حالت ویسکوالاستیک ۳۷ درصد حالت الاستیک است و دامنه نوسانات نسبت اضافه فشار حالت ویسکوالاستیک به حالت الاستیک بین ۲۰ تا ۷۲ درصد متغیر هست. در ادامه طراحی بهینه شبکه مورد مطالعه تحقیق حاضر انجام شده است، نتایج نشان داد بعد از رسیدن به جواب بهینه مقدار هزینه خرید و اجرای لوله‌های شبکه به حدود ۷۴۶۷۹۵ دلار و مقدار تابع هدف یا همان مجموع هزینه‌های جاری و ثابت سالانه در طول عمر مفید ۲۰ ساله پروژه برابر با ۲۳۴۹۷۷ دلار می‌شود. این مقادیر به ترتیب ۹/۴۲ و ۷/۱۵ درصد کمتر از مقادیر وضع موجود هست.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، خاصیت ویسکوالاستیک، شبکه آبیاری تحت فشار، ضربه قوچ

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: r_ghobadian@razi.ac.ir)

مقدمه

پلی اتیلن را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. همچنین مدل‌های یک‌بعدی و شبه-دو بعدی را توسعه دادند. نتایج عددی این مدل‌ها نشان داد که مدل ویسکوالاستیک افت موج فشار را در لوله‌های پلاستیکی بهتر تشریح می‌کند و مدل الاستیک با دقت کافی بیشینه و کمینه نوسانات ناشی از اولین پیک فشار را تخمین می‌زند. نتایج این تحقیقات نشان داد که تفاوت مدل یک‌بعدی و دو بعدی چندان زیاد نیست (Covas et al., 2004). در تحقیقی دیگر کوواس و همکاران رفتار ویسکوالاستیک دیواره لوله در معادلات حاکم بر جریان گذرا را با استفاده از روش خطوط مشخصه مدل کردند. در این تحقیقات نتایج یک مدل خطی شده ویسکوالاستیک با و بدون اثر افت غیر ماندگار با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان داد که سهم اثر اصطکاک غیر ماندگار روی میرایی موج فشاری نسبت به کرنش‌های محیطی دیواره لوله ناچیز است (Covas et al., 2005). سوارس و همکاران جریان غیر ماندگار در لوله‌های PVC را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تابع خزش تطابقی لوله‌های PVC را با استفاده از حل معکوس جریان غیر ماندگار تعیین کردند. نتایج آن‌ها نشان داد تابع خزش لوله‌های PVC ولوله‌های پلی اتیلن خصوصیات متفاوتی از هم دارند (Soares et al., 2008). احمدی و همکاران به ارائه مدل ریاضی و حل عددی مسئله تداخل سیال - سازه ناشی از ضربه قوچ در یک شبکه توزیع سیال ساخته شده از مواد ویسکوالاستیک، با در نظر گرفتن پدیده جدایی ستون مایع پرداخت. معادلات حاکم برای اولین بار در تحقیقاتشان مطرح شده و جهت حل آن‌ها دو روش حل عددی تماماً خطوط مشخصه (Full MOC) و خطوط مشخصه - اجزای محدود (MOC-FEM) پیشنهاد گردید (Ahmadi and Keramat., 2010). کرامت و همکاران با در نظر گرفتن ضریب پواسون به صورت تابعی از زمان پدید ضربه قوچ در لوله‌های ویسکوالاستیک را بررسی کردند. مدل‌های ریاضی ارائه شده پیشین در مطالعه ضربه قوچ در لوله‌های ویسکوالاستیک، نسبت پواسون را ثابت فرض می‌کردند در حالی که در مدل ریاضی اصلاح شده ایشان، نسبت پواسون لوله نسبت به زمان متغیر در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاکی از این است که با در نظر گرفتن نسبت پواسون متغیر مواد ویسکوالاستیک در مدل ریاضی ارائه شده سبب یافتن پاسخ‌هایی با دقت بالا در پدیده ضربه قوچ در مواد ویسکوالاستیک برای دبی‌های مختلف با استفاده از یک منحنی خزش کالیبره شده، می‌گردد (Keramat et al. 2013). زنگنه و همکاران به بررسی تأثیر تکیه‌گاه ویسکوالاستیک بر اندرکنش سیال-سازه در پدیده ضربه قوچ پرداختند. بررسی‌های انجام شده نشان داد که استفاده از تکیه‌گاه‌های ویسکوالاستیک با مشخصات و تعداد مناسب در میرایی و کاهش جابه‌جایی دیواره لوله، ارتعاشات هد فشار

طراحان شبکه‌های آبیاری و زهکشی به دنبال این موضوع هستند که طراحی خود را به اقتصادی‌ترین طرح ممکن نزدیک نمایند تا علاوه بر تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان به بهترین شکل هزینه نیز تا حد ممکن کاهش یابد. علاوه بر این محدودیت‌هایی از قبیل فشار در گره‌های شبکه و سرعت در لوله‌ها نیز وجود دارد که می‌بایست در طراحی شبکه رعایت شوند. از طرفی یکی از عوامل مخرب که اغلب منجر به وقوع خسارات و تخریب یک شبکه آبرسانی می‌شود، پدیده ضربه قوچ در خط لوله است؛ بنابراین معیار مهم دیگری که می‌توان به عنوان محدودیت در نظر گرفت، فشار مازاد ناشی از ضربه قوچ است. فشار مازاد ناشی از ضربه قوچ در یک خط لوله نه تنها به جنس لوله از نقطه نظر الاستیک یا ویسکوالاستیک بلکه به نحوه ارتباط خط لوله با دیگر لوله‌های شبکه (آرایش شبکه) بستگی دارد. تاکنون تحقیقات نسبتاً مناسبی در خصوص شبیه‌سازی ضربه قوچ در لوله‌های ویسکوالاستیک به صورت آزمایشگاهی، عددی و حتی تحلیلی انجام شده است. با این وجود تحقیقات نسبتاً اندکی در خصوص تأثیر این پارامترها بر طراحی بهینه سیستم آبیاری تحت فشار صورت گرفته است. فن و همکاران یک مدل ویسکوالاستیک برای شبکه غیرخطی ارائه کردند. آن‌ها یک معادله سازه‌ای غیرخطی برای مذاب‌های پلیمری و محلول‌های غلیظ که از نظریه شبکه Lodge-Yamamoto مشتق شده است را بیان کردند. فرضیات مسئله بر این اصل استوار بود که (۱) اتصالات شبکه بدون تغییر به روشی کاملاً مشخص حرکت می‌کنند. (۲) شکل عملکردی سرعت ایجاد و تخریب اتصالات به میانگین توسعه مجرای شبکه و دمای مطلق بستگی دارد به گونه‌ای که اصل برهم‌نهی دما-زمان را مجاز می‌داند. این تئوری توافق خوبی را با تمام داده‌های بررسی شده نشان می‌دهد. نتایج حاکی از اعتبار مدل در این رژیم جریان است (Phan-Thien., 1978). کروز و همکاران به معرفی یک مدل $k-\epsilon$ جدید برای کاهش کشش ویسکوالاستیک جریان در لوله‌ها پرداختند. ترم تنش جدید در معادله مومنت میانگین زمانی که برای مدل مایع نیوتونی تعمیم یافته و توسط کروز و پیانو اصلاح شده برای پیش‌بینی جریان‌های ویسکوالاستیک آشفته مدل شده است. مدل نیوتنی تعمیم یافته و اصلاح شده توسط کروز و پیانو برای تقلید اثرات ویسکوالاستیک سیالاتی که کاهش درگ را در جریان لوله آشفته نشان می‌دهند، معرفی شده است (Cruz et al., 2004). ترم تنش جدید ارتباط بین نوسان ویسکوزیته و نرخ نوسان کرنش را بیان می‌کند و در مدل $k-\epsilon$ عدد رینولدز پایین که در ابتدا توسط کروز و پیانو توسعه یافته نادیده گرفته شده بود (Cruz et al., 2005). کوواس و همکاران با اندازه‌گیری آزمایشگاهی و مطالعات تحلیلی رفتار الاستیک خطی و ویسکوالاستیک، لوله‌های

جنس پلی اتیلن با چگالی زیاد (HDPE) و یک قطعه از جنس پلی اتیلن با چگالی کم (LDPE) تشکیل می‌شود. معادلات ضربه قوچ بر اساس روش خطوط مشخصه با در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک و افت اصطکاک غیر ماندگار بیان شده است. نتایج نشان داد که وقتی قطعه HDPE در بالای پنستاک و قطعه LDPE در قسمت پایین و متصل به لوله فولادی باشد کاهش بیشتر هد موج فشاری و دوره نوسان موج رخ می‌دهد. علاوه بر این، نشان داده شده است که بهترین مبادله بین میزان میرایی هد فشار و گسترش دوره نوسان هد فشار نیز بستگی به طول و قطر پنستاک کوتاه دارد (Chaker and Triki 2020).

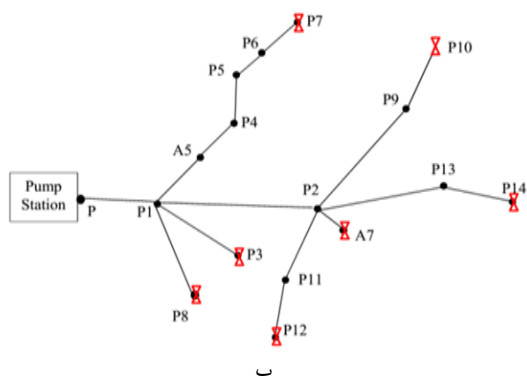
در نرم‌افزارها و مدل‌های تجاری پیشرفته‌ای مانند HYTRAN، WHAMO و HAMMER تأثیر خاصیت الاستیک و ویسکوالاستیک لوله‌ها به صورت هم‌زمان بر تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های تحت فشار دیده نمی‌شود. علاوه بر این بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد در متون علمی نیز تأثیر خاصیت ویسکوالاستیک بر طراحی بهینه بررسی نشده است هرچند در تحلیل هیدرولیکی شبکه به فراوانی دیده می‌شود. از طرفی تحقیقات قبلی بیشتر بر روی تأثیر این خاصیت بر انتشار امواج فشاری در سیستم تک لوله تمرکز داشته‌اند و تعداد تحقیقاتی که تأثیر این خاصیت را در یک سیستم متشکل از لوله‌های متعدد و با آرایش مختلف دیده باشند انگشت‌شمار هستند. در تحقیق حاضر به عنوان یک نوع آوری تأثیر خاصیت ویسکوالاستیک لوله‌ها در تحلیل و طراحی بهینه یک سیستم آبیاری بارانی متشکل از لوله‌های الاستیک و ویسکوالاستیک و در مقیاس واقعی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه: محدوده مورد مطالعه شبکه آبیاری و زهکشی اسماعیل آباد و خلیفه آباد می باشد، که در فاصله هفت کیلومتری شمال شرقی شهرستان نورآباد لرستان در مختصات $34^{\circ} 5'$ شمالی و $42^{\circ} 0' 48''$ واقع گردیده است. منبع تأمین کننده آب طرح رودخانه بادآور است. سطح حوزه آبریز این رودخانه 462 کیلومتر مربع و مساحت اراضی تحت پوشش این طرح در حدود هزار هکتار است. در شکل (۱) تصویر ماهواره‌ای ایستگاه پمپاژ و آرایش خطوط لوله شبکه اصلی اسماعیل آباد نشان داده شده است. همچنین در جدول (۱) اطلاعات خطوط اصلی و نیمه اصلی شبکه اسماعیل آباد در شرایط موجود است ارائه شده است و در جدول (۲) اطلاعات مربوط به لوله‌های تجاری موجود در بازار به همراه هزینه‌های واحد طولشان که در این بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، آورده شده است (قبادیان و همکاران، ۱۳۹۷).

ناشی از پدیده تداخل سیال - سازه (FSI) و میرایی هد فشار باگذشت زمان به‌ویژه در لوله‌های الاستیک بسیار مؤثر و کارآمد است. همچنین می‌تواند موجب کاهش تنش و تغییرات آن باگذشت زمان در میله و تکیه‌گاه‌ها و بهبود عملکرد سازه-لوله در برابر پدیده خستگی گردد (Zanganeh and Ahmadi., 2013). منصور و همکاران به شبیه‌سازی ضربه قوچ در لوله‌های ویسکوالاستیک پرداختند. در این تحقیق، یک مدل ریاضی برای شبیه‌سازی ضربه قوچ در لوله‌های ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن رفتار ویسکوالاستیک دیوارهای لوله، با استفاده از مدل کلوین-ویت، توسعه داده شده است. مدل توسعه یافته با استفاده از روش مشخصه (MOC)، نادیده گرفتن فعل‌وانفعالات مایع و ساختار (FSI) و اثرات اصطکاک ناپایدار حل شد (Mansour et al., 2013). مصفا تأثیر فونداسیون ویسکوالاستیک بر روی پایداری دینامیکی یک لوله انتقال دهنده سیال را بررسی کرد. هدف از این کار روشن ساختن این است که آیا سرعت بحرانی جریان بستگی به میزان سختی فونداسیون، میرایی پی، طول لوله، ضخامت لوله و چگالی سیال برای لوله‌ای دارد که سیال را بر روی پایه ویسکوالاستیک منتقل می‌کند (مدل وینکلر اصلاح شده). نتایج نشان می‌دهد که (۱) سختی فونداسیون منجر به افزایش سرعت بحرانی سیال می‌شود، درحالی که میرایی پایه آن را کاهش می‌دهد (۲) مقادیر متفاوتی از طول لوله برای هر یک از ویژگی‌های فونداسیون وجود دارد که به نظر می‌رسد بیشتر تحت تأثیر ویژگی‌های فونداسیون قرار می‌گیرد (۳) جزء کوریولیس هنوز نقش عمده‌ای در رفتار دینامیکی لوله به‌ویژه با طول بیشتر و مایع سنگین‌تر دارد (۴) نسبت میرایی سیستم با افزایش سرعت سیال به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد (Mostafa., 2014). آنجل به بررسی آزمایشگاهی انتقال و انعکاس موج فشاری جریان گذرا در شبکه لوله شاخه‌ای ویسکوالاستیک پرداخت. برای این کار دو مدل آزمایشگاهی شبکه لوله شاخه‌ای Y شکل با مشخصات مختلف ساخته شد. نتایج نشان داد که امواج فشاری انتقالی و منعکس شده تا ۱۲ درصد با مقادیر تئوری فرض شده برای لوله‌های الاستیک متفاوت است. همچنین علاوه بر تغییرات سطح مقطع و سرعت موج فشاری، رفتار رئولوژیکی اتصالات لوله‌ها بر ضریب انتقال و بازتاب تأثیر می‌گذارد (Engel., 2017). تریکی و چاکر برای کنترل ضربه قوچ از یک قطعه لوله پلاستیکی متشکل از دو قسمت با چگالی کم و با چگالی زیاد است که به صورت خطی در سیستم قرار می‌گیرد استفاده نمودند و باحالتی که لوله تماماً دارای چگالی زیاد و یا دارای چگالی کم باشد مقایسه شد (Triki and Chaker 2019). چاکر و تریکی از یک پنستاک کوتاه عمود بر لوله اصلی فلزی برای کنترل ضربه قوچ استفاده نمود. این لوله کوتاه از دو قطعه مساوی شامل یک قطعه از

¹ Fluid Structure Interaction (FSI)



شکل ۱- الف) تصویر ماهواره‌ای ایستگاه پمپاژ و ب) آرایش خطوط لوله شبکه اصلی اسماعیل‌آباد.

جدول ۱- اطلاعات خطوط اصلی و نیمه‌اصلی شبکه‌ی اسماعیل‌آباد در شرایط موجود

لوله	طول لوله (m)	قطر اسمی (mm)	قطر داخلی (mm)	دبی (L/s)	رقوم ابتدا (m)	رقوم انتها (m)
PP ₁	۱۱۱۶	۹۰۰	۹۰۰	۸۵۶/۵۶	۱۷۹۱	۱۸۴۲/۰۸
P ₁ P ₈	۹۵۵	۲۵۰	۲۱۳/۲	۵۲/۹	۱۸۴۲/۰۸	۱۸۳۸/۷۱
P ₁ P ₃	۱۱۰۰	۳۵۵	۳۰۲/۸	۱۲۸/۹۴	۱۸۴۲/۰۸	۱۸۵۶/۵۲
P ₁ A ₅	۲۰۰	۵۰۰	۴۲۶/۴	۲۴۴/۹۲	۱۸۴۲/۰۸	۱۸۴۷/۰۵
A ₃ P ₄	۲۰۱	۵۰۰	۴۲۶/۴	۱۹۰/۳۴	۱۸۴۷/۰۵	۱۸۴۶/۳۲
P ₄ P ₅	۳۹۰	۴۰۰	۳۴۱/۲	۱۲۸/۹۴	۱۸۴۶/۳۲	۱۸۴۱/۱۸
P ₅ P ₆	۸۰۶	۲۵۰	۲۱۳/۲	۵۸/۳۳	۱۸۴۱/۱۸	۱۸۱۱/۳۲
P ₆ P ₇	۵۷۵	۱۶۰	۱۳۶/۴	۲۱/۴۹	۱۸۱۱/۳۲	۱۸۱۰/۹۴
P ₁ P ₂	۱۴۳۰	۷۰۰	۷۰۰	۴۲۹/۸	۱۸۴۲/۰۸	۱۸۴۷/۵۷
P ₂ P ₉	۶۷۰	۳۱۵	۲۶۸/۶	۹۸/۲۴	۱۸۴۷/۵۷	۱۸۲۱/۴۸
P ₉ P ₁₀	۸۴۰	۲۰۰	۱۷۰/۶	۳۳/۷۷	۱۸۲۱/۴۸	۱۸۱۴/۴۳
P ₂ P ₁₃	۷۲۰	۴۰۰	۳۴۱/۲	۱۱۹/۷۳	۱۸۴۷/۵۷	۱۸۲۶/۴۷
P ₁₃ P ₁₄	۶۶۰	۲۵۰	۲۱۳/۲	۴۹/۱۲	۱۸۲۶/۴۷	۱۸۴۷/۹۵
P ₂ A ₇	۱۱۰	۱۶۰	۱۳۶/۴	۴۶/۰۵	۱۸۴۷/۵۷	۱۸۴۷/۵۷
P ₂ P ₁₁	۵۵۰	۴۰۰	۳۴۱/۲	۱۶۵/۸	۱۸۴۷/۵۷	۱۸۵۳/۲۱
P ₁₁ P ₁₂	۷۰۰	۳۱۵	۲۶۸/۶	۱۳۲	۱۸۵۳/۲۱	۱۸۶۱/۸۹

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \sigma_0 \frac{t}{\mu} \quad (2)$$

در این رابطه σ تنش محیطی، E_0 مدول الاستیک یانگ، σ_0 تنش ثابت اعمال شده، t متغیر زمان و μ ویسکوالاسیسیته میراگر با تعریف تابع خزش تطابقی $J(t)$ به صورتی تابعی از رفتار مصالح ویسکوالاستیک، بر اساس اصل برهم‌نهی بولتزمن برای کرنش‌های کوچک، تنش‌هایی که به طور مستقل بر یک سیستم اعمال می‌شود، موجب ایجاد کرنش‌هایی می‌شوند که می‌توانند به صورت خطی جمع شوند، داریم:

$$\varepsilon(t) = J_0 \sigma(t) + \int_0^t \sigma(t-t') \frac{\partial J(t')}{\partial t'} dt' \quad (3)$$

در این رابطه $\varepsilon(t)$ کرنش زمانی، $\frac{1}{E_0} = J_0$ خزش تطابقی آنی و

معادلات حاکم و نحوه گسسته سازی: شبیه‌سازی عددی

رفتار لوله‌های ویسکوالاستیک با استفاده از مدل مکانیکی کلوین - ویت و معرفی تابع خزش جهت معرفی رابطه تنش کرنش در مواد پلی‌اتیلن صورت می‌گیرد. به بیانی ساده خواص ویسکوالاستیک مواد پلیمری در حین ضربه قوچ سبب ایجاد یک تنش پسماند در جداره لوله می‌شوند و تغییر شکل‌های ایجاد شده ناشی از آن پس از باربرداری به حالت اولیه بازمی‌گردند. بر اساس این مدل، کرنش مواد ویسکوالاستیک $\varepsilon(t)$ به یک کرنش آنی الاستیک ε_e و کرنش تأخیری ε_r تجزیه می‌شود (Covas et al, 2005):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_r \quad (1)$$

بر اساس قانون هوک و قانون نیوتون می‌توان نوشت:

$$\sigma = \frac{\alpha PD}{2e}$$

(۴)

$J(t')$ تابع خزش در زمان t'

تنش محیطی رابطه‌ای مستقیم با فشار سیال دارد که می‌توان آن

را با معادله زیر بیان کرد:

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و هزینه‌ی لوله‌های قابل استفاده در طرح

ردیف	قطر خارجی (mm)	قطر داخلی (mm)	نوع لوله	هزینه واحد طول لوله‌ها (دلار)
۱	۱۱۰	۹۳/۸	PE80	۵/۸۹۵
۲	۱۲۵	۱۰۶/۶	PE80	۷/۸۹۵
۳	۱۴۰	۱۱۹/۴	PE80	۹/۴۹۵
۴	۱۶۰	۱۳۶/۴	PE80	۱۲/۳۷۵
۵	۱۸۰	۱۵۳/۴	PE80	۱۵/۷۰۵
۶	۲۰۰	۱۷۰/۶	PE80	۱۹/۳۰۵
۷	۲۲۵	۱۹۱/۸	PE80	۲۴/۵۲۵
۸	۲۵۰	۲۱۳/۲	PE80	۳۰/۱۱۵
۹	۲۸۰	۲۳۸/۸	PE80	۳۷/۸
۱۰	۳۱۵	۲۶۸/۶	PE80	۴۷/۷
۱۱	۳۵۵	۳۰۲/۸	PE80	۶۰/۵۲۵
۱۲	۴۰۰	۳۴۱/۲	PE80	۷۶/۷۲۵
۱۳	۴۵۰	۳۸۳/۸	PE80	۹۷/۲
۱۴	۵۰۰	۴۲۶/۴	PE80	۱۰۸/۸۲
۱۵	۶۰۰	۶۰۰	GRP	۱۱۱/۳۲۳
۱۶	۷۰۰	۷۰۰	GRP	۱۳۷/۹۹۷
۱۷	۸۰۰	۸۰۰	GRP	۱۷۰/۶۳۳
۱۸	۹۰۰	۹۰۰	GRP	۲۰۴/۲۸۹

در روابط بالا $H = H(x, t)$ ارتفاع پیزومتریک لحظه‌ای و $Q = Q(x, t)$ دبی لحظه‌ای است. V سرعت جریان، a سرعت انتشار موج در لوله، g شتاب ثقل، A سطح مقطع لوله، h_f افت انرژی در واحد طول، x مختصات در محور لوله، t زمان و ε_r کرنش تأخیری لوله است. روابط (۶) و (۷) با تبدیل به معادلات دیفرانسیل کامل طبق رابطه (۸) به روش خطوط مشخصه حل می‌شود:

$$C^\pm: \frac{dH}{dt} \pm \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{2a^2}{g(V \pm a)} \left(V \frac{d\varepsilon_r}{dt} \pm a \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} \right) \pm ah_f = 0 \quad (۸)$$

با صرف نظر کردن از سرعت سیال در مقایسه با سرعت موج الاستیک، ترم انتقالی $V(d\varepsilon_r / dt)$ از معادله (۸) حذف شده و دو معادله C^+ و C^- به صورت زیر در گره‌های میانی ساده شده‌اند:

$$C^\pm: \frac{dH}{dt} + \frac{a^2}{gA} \frac{dQ}{dx} + \frac{2a^2}{g} \frac{d\varepsilon_r}{dt} \pm ah_f = 0 \quad (۹)$$

که در طول خطوط مشخصه مستقیم $dx / dt = \pm a$ معتبر هستند. با استفاده از شبکه‌های محاسباتی مستطیلی با رویکرد تفاضل محدود معادله دیفرانسیل (۹) به شکل معادله جبری زیر حاصل می‌شود:

$$C^\pm: [H_{(i,j)} - H_{(i \pm 1, j-1)}] \pm \frac{a}{gA} [Q_{(i,j)} - Q_{(i \pm 1, j-1)}] \pm \frac{2a^2 \Delta t}{g} \left(\frac{d\varepsilon_r}{dt} \right)_{i, i \pm 1} + a \Delta t h_f = 0 \quad (۱۰)$$

که در آن α پارامتری بدون بعد است که به ابعاد مقطع و محدودیت‌های محوری لوله بستگی دارد. P فشار سیال داخل لوله، D قطر لوله و e ضخامت جدار لوله می‌باشد. نهایتاً کرنش پیرامونی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon(t) = \frac{\alpha_0 D_0}{2e_0} [P(t) - P_0] J_0 + \int_0^t \frac{\alpha(t-t') D(t-t')}{2e(t-t')} [p(t-t') - p_0] \frac{\partial J(t')}{\partial t'} dt' \quad (۵)$$

اولین عبارت سمت راست این معادله مربوط به کرنش الاستیک ε_e و عبارت انتگرال، بیانگر کرنش تأخیری ε_r است. در این معادله P_t فشار در هر لحظه، P_0 فشار اولیه حالت ماندگار، J_0 خزش آنی، D_t و D_0 قطر داخلی لوله در زمان t و $t=0$ ، e_t و e_0 ضخامت دیواره لوله در زمان t و $t=0$ و α_t و α_0 ضریب محدودیت دیواره لوله در زمان t و $t=0$ است.

بر این اساس معادلات سازگاری برای خواص ویسکوالاستیک بازنویسی شده است، روابط (۶) و (۷) با به کارگیری روش خطوط مشخصه تحلیل خواهند شد:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{2a^2}{g} \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} = 0 \quad (۶)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{Q|Q|}{2AD} = 0 \quad (۷)$$

توسط رویکرد ضمنی با دقت مرتبه اول به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\varepsilon_{rk}(x, t) = J_k F(x, t) - J_k e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} F(x, t - \Delta t) - J_k \tau_k (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}}) \frac{F(x, t) - F(x, t - \Delta t)}{\Delta t} + e^{-\frac{\Delta t}{\tau_k}} \varepsilon_{rk}(x, t - \Delta t) \quad (۱۹)$$

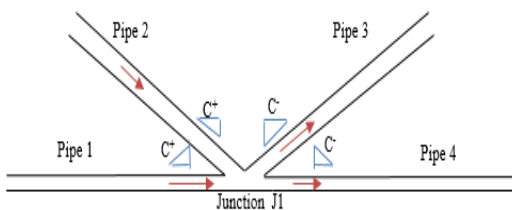
پارامترهای جریان Q و H برای همه نقاط داخلی لوله (در مقطع i و در زمان j) با حل معادلات مشخصه محاسبه می‌شوند. مشتق زمانی کرنش تأخیری $\partial \varepsilon_r / \partial t$ در این معادلات به وسیله مجموع مشتق زمانی کرنش هر المان کلونین ویت k رابطه (۱۷) به دست می‌آید. عبارات ε_{rk} و $\frac{\partial \varepsilon_{rk}}{\partial t}$ برای هر المان کلونین ویت k بر اساس تابع $F(x, t)$ که با معادله (۱۸) تعریف شده است، به ترتیب از معادلات (۱۷) و (۱۹) به دست می‌آید.

شرایط مرزی حاکم: حل عددی معادلات حاکم بدون تعریف

شرایط مرزی مناسب امکان پذیر نیست. در یک سیستم متشکل از لوله‌های انتقال ابتدا و انتهای لوله‌ها که مرز نامیده می‌شود فقط یک خط مشخصه (مثبت و منفی) عبور می‌کند؛ بنابراین با کمک اطلاعات دیگری از شرایط مرزی بایستی معادله دومی تشکیل داد و استفاده از این دو معادله مقادیر سرعت و هد فشار در زمان آینده را محاسبه کرد. با توجه به نوع اتصال و یا سازه روی مرز رابطه کمکی مختص به آن به دست می‌آید. شرایط مرزی به دودسته شرایط داخلی و شرایط مرزی خارجی تقسیم می‌شوند:

الف) شرایط مرزی داخلی: شرط مرزی داخلی شامل انواع

شیرها در مسیر لوله‌ها، بوستر پمپ‌ها، محفظه‌های فشار، سرچ تانک‌ها و محل اتصال لوله‌ها و غیره باشد. با توجه به مشخصات شبکه اسماعیل آباد در این تحقیق مرزهای داخلی فقط شامل محل اتصال لوله‌ها است. در این محل ممکن است دبی خروجی نیز وجود داشته باشد. شکل (۲) نمونه شماتیک از اتصال چند لوله‌ای بدون خروجی دبی را نشان می‌دهد. در این سیستم مجهولات عبارت‌اند از هد فشار در محل گره و دبی لوله‌ها در زمان بعد که اگر تعداد لوله‌های موجود در اتصال برابر m باشد تعداد مجهولات m+1 خواهد بود.



شکل ۲- محل اتصال چند لوله بدون دبی خروجی

برای لوله‌های ۱ و ۲ معادله C^+ ، برای لوله‌های ۳ و ۴ معادله- C^- بر روی گره معادله‌ی پیوستگی حاکم است:

این معادله در طول $\Delta x / \Delta t = \pm a$ معتبر است. در معادلات (۱۰) دو ترم شیب خط انرژی و مشتق زمانی کرنش تأخیری به صورت مستقیم قابل محاسبه نیستند و باید به صورت عددی گسسته سازی شوند. عبارت‌های $\partial \varepsilon_r / \partial t$ و ε_r می‌توانند به صورت جمع ترم‌های جزئی برای هر المان کلونین ویت K محاسبه شوند:

$$\varepsilon_r(x, t) = \sum_{k=1 \dots n_{kv}} \varepsilon_{rk}(x, t) \quad (۱۱)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} \Big|_{(x,t)} = \sum_{k=1 \dots n_{kv}} \frac{\partial \varepsilon_{rk}}{\partial t} \Big|_{(x,t)} \quad (۱۲)$$

و با مشتق‌گیری از تابع خزش نسبت به زمان، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial J(t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[J_0 + \sum_{k=1}^{n_{kv}} J_k \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right) \right] = \sum_{k=1}^{n_{kv}} \frac{J_k}{\tau_k} e^{-\frac{t}{\tau_k}} \quad (۱۳)$$

با اعمال معادله (۱۳) در کرنش تأخیری که به وسیله ترم دوم معادله (۵) بیان شد، کرنش تأخیری مجموع برابر است با:

$$\varepsilon_r(x, t) = \int_0^t \frac{\alpha D}{2e} [p(x, t - t') - p(x, 0)] \left(\sum_{k=1}^{n_{kv}} \frac{J_k}{\tau_k} e^{-\frac{t'}{\tau_k}} \right) dt' \quad (۱۴)$$

و کرنش تأخیری برای هر المان کلونین ویت K برابر است با:

$$\varepsilon_{rk}(x, t) = \int_0^t \frac{\alpha D}{2e} [p(x, t - t') - p(x, 0)] \frac{J_k}{\tau_k} e^{-\frac{t'}{\tau_k}} dt' \quad (۱۵)$$

مشتق کرنش زمان می‌تواند به صورت مستقیم به وسیله مشتق‌گیری زمانی از معادله قبلی برای هر المان کلونین ویت به صورت زیر محاسبه شود:

$$\frac{\partial \varepsilon_{rk}}{\partial t} \Big|_{(x,t)} = \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{\alpha D}{2e} [p(x, t - t') - p(x, 0)] \frac{J_k}{\tau_k} e^{-\frac{t'}{\tau_k}} dt' \quad (۱۶)$$

و بعد از یکسری عملیات ریاضی به صورت رابطه (۱۷) ساده می‌شود (Covas et al., 2005):

$$\frac{\partial \varepsilon_{rk}(x, t)}{\partial t} = -\frac{\varepsilon_{rk}(x, t)}{\tau_k} + \frac{J_k}{\tau_k} F(x, t) \quad (۱۷)$$

در معادله بالا تابع $F(x, t)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F(x, t) = \frac{\alpha D}{2e} \gamma [H(x, t) - H(x, 0)] \quad (۱۸)$$

اگرچه هدف، محاسبه مشتق زمانی کرنش در معادله (۱۷) است، این ترم به کرنش تأخیری بستگی دارد. این کرنش با معادله (۱۶) تعریف می‌شود و می‌تواند با تقسیم انتگرال معادله (۱۶) به دو جزء و محاسبه آن‌ها به صورت جداگانه حل شوند، بعد از انجام چندین عملیات ریاضی، روی این دو جزء، کرنش تأخیری هر المان کلونین ویت K

شیر یک طرفه نصب می‌شود. هدف اصلی از نصب این شیر مانع شدن از برگشت آب بر روی پمپ و جلوگیری از دوران معکوس آن می‌باشد. چنانچه خواسته شود یکی از شدیدترین شرایط اعمال ضربه قوچ یعنی قطع ناگهانی ایستگاه پمپاژ به سیستم معرفی شود لازم است شیر یک طرفه بلافاصله بسته شود بنابراین سرعت جریان در گره ابتدای خط انتقال برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود و تنها به یک معادله‌ی دیگر برای محاسبه‌ی هد فشار نیاز است که آن همان معادله‌ی C^- است.

$$V_1^{n+1} = 0 \quad (۲۷)$$

$$V_1^{n+1} = A_{v1} + \frac{g}{a_1} hp_1^{n+1} = 0 \quad (۲۸)$$

شیر قطع و وصل: با فرض اینکه شیر قطع و وصل در انتهای خط لوله در طول زمان T_c بسته شود معادلات حاکم در این گره شامل

$$\text{معادله‌ی } C^+ \text{ رابطه (۲۹) و معادله کمکی روابط (۳۰) یا (۳۱) است:}$$

$$hp_{end}^{n+1} = A_p - \frac{a}{g} V_{end}^{n+1} \quad (۲۹)$$

$$V_{end}^{n+1} = V_0 \left(1 - \frac{t}{T_c}\right) \sqrt{\frac{hp_{end}^{n+1}}{h_0}} \quad \text{و} \quad t < T_c \quad (۳۰)$$

$$V_{end}^{n+1} = 0 \quad \text{و} \quad t \geq T_c \quad (۳۱)$$

که در آن V_{end}^{n+1} و hp_{end}^{n+1} به ترتیب سرعت و فشار در انتهای لوله بلافاصله قبل از شیر است. V_0 و h_0 به ترتیب سرعت و فشار در انتهای لوله قبل از اعمال ضربه قوچ، t زمان از شروع محاسبات و T_c زمان بسته شدن شیر است. با استفاده از روابط بالا سرعت و فشار در گره انتهایی در گام زمانی بعد به دست می‌آید.

ایستگاه پمپاژ: برای شرایط مرزی ایستگاه پمپاژ زمان پارامتر بسیار مهم است به صورتی که زمان خاموش شدن پمپ کم باشد شدت ضربه قوچ بیشتر خواهد بود. پس خاموش شدن پمپ از لحظه شروع تا رسیدن به دوران صفر لازم است نمودار یا جدول تغییرات دور پمپ نسبت به زمان در اختیار باشد. با تقسیم دبی پمپاژ بر مربع سرعت دوران و همچنین تقسیم ارتفاع پمپاژ بر سرعت دوران و ترسیم این دو نسبت در مقابل همدیگر منحنی مشخصه‌ای برای پمپ حاصل می‌شود که دیگر تابع قطر پروانه نیست و سرعت دوران نیز در آن منظور شده است. با این شرایط روابط زیر برای گره ایستگاه پمپاژ صادق است.

$$H_{PUMP} = H_d - H_s \quad (۳۲)$$

$$C^+: H_s^{n+1} + \frac{c}{g} v_s^{n+1} = A \quad (۳۳)$$

$$C^-: H_d^{n+1} - \frac{c}{g} V_d^{n+1} = B \quad (۳۴)$$

$$V_s^{n+1} \times D_s^2 = V_d^{n+1} D_d^2 = Q_{pump}^{n+1} \quad (۳۵)$$

$$Q_{pump}^{n+1} / N^2 = f(H_{pump}^{n+1} / N) \quad (۳۶)$$

معادله (۳۶) تا زمانی صادق است که Q_{pump} مثبت باشد. اگر Q_{pump} منفی باشد دریچه یک طرفه بعد از پمپ بسته می‌شود و شرایط مرزی نیز تغییر کرده و به صورت زیر نوشته می‌شود:

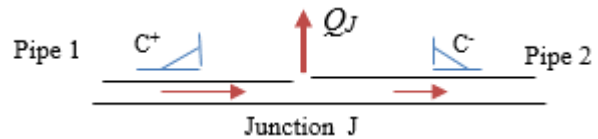
$$C^+ \left\{ \begin{aligned} hp_j^{n+1} &= A_{p1} - \frac{a_1}{g} V_1^{n+1} \\ hp_j^{n+1} &= A_{p2} - \frac{a_2}{g} V_2^{n+1} \end{aligned} \right\} \quad (۲۰)$$

$$C^- \left\{ \begin{aligned} v_3^{n+1} &= A_{v3} + \frac{g}{a_3} hp_j^{n+1} \\ v_4^{n+1} &= A_{v4} + \frac{g}{a_4} hp_j^{n+1} \end{aligned} \right\} \quad (۲۱)$$

$$\sum_{i=1}^4 Q = 0 \quad \text{یا} \quad D_1^2 v_1^{n+1} + D_2^2 v_2^{n+1} = D_3^2 v_3^{n+1} + D_4^2 v_4^{n+1} \quad (۲۲)$$

دستگاه ۵ معادله ۵ مجهولی فوق به روش تکراری یا مستقیم حل می‌شود. در این تحقیق در محل گره‌هایی که دبی خروجی ندارند دستگاه معادلات خطی است و به روش مستقیم حذف گوس حل می‌شود.

چنانچه همانند شکل (۳) در محل گره جریان خروجی وجود داشته باشد با فرض اینکه دبی خروجی در محل گره با جذر فشار در گره در هر لحظه زمانی ارتباط داشته باشد دستگاه معادلات به صورت زیر به دست می‌آید:



شکل ۳- محل اتصال دو لوله با دبی خروجی

$$hp_j^{n+1} = A_{p1} - \frac{a_1}{g} v_1^{n+1} \quad (۲۳)$$

$$v_2^{n+1} = A_{v2} + \frac{g}{a_2} hp_j^{n+1} \quad (۲۴)$$

$$\sum_{i=1}^4 Q = 0 \quad \text{یا} \quad \frac{\pi}{4} D_1^2 v_1^{n+1} = \frac{\pi}{4} D_2^2 v_2^{n+1} + Q_j^{n+1} \quad (۲۵)$$

که در آن Q_j^{n+1} دبی خروجی از گره در زمان حال است و به صورت زیر در این تحقیق محاسبه شد:

$$Q_j^{n+1} = C_{orf} \sqrt{hp_j^{n+1}} \quad (۲۶)$$

که در آن C_{orf} ضریبی است که بستگی به سطح روزنه خروجی و شکل مقطع آن دارد. در این تحقیق مقدار آن به صورت معکوس بر اساس دبی خروجی و فشار در گره در شرایط ماندگار قبل از اعمال ضربه قوچ به دست آمد و در تمام مدت زمان محاسبات مقدار آن ثابت در نظر گرفته شد هر چند مقداری خطا وارد محاسبات می‌نماید.

ب) شرایط مرزی خارجی: این نوع شرط مرزی که در ورودی‌ها و در خروجی‌های سیستم اعمال می‌شوند انواع مختلفی دارند. در شبکه اسماعیل‌آباد همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است در ابتدای سیستم ایستگاه پمپاژ و شیر یک طرفه و در انتهای خطوط لوله شیر قطع و وصل وجود دارد.

شیر یک طرفه: در خروجی ایستگاه پمپاژ بر روی لوله رانش

رعایت محدودیت‌های سرعت و فشار مورد توجه قرار گرفت. تابع هدف مذکور در رابطه (۴۰) معرفی شده است:

$$\text{Min: } \sum_{i=1}^{NP} CRF \times Li \times Cpi + \sum_{j=1}^{NPU} CRF \times CPUj + \text{Gen} \times Hpj \quad (40)$$

ترم اول رابطه (۴۰) هزینه تمام شده لوله گذاری، ترم دوم هزینه ثابت و ترم سوم هزینه جاری (مانند هزینه‌های تعمیر و نگهداری با در نظر گرفتن نرخ تورم) ایستگاه پمپاژ است. در این رابطه Li طول لوله i ام، Cpi هزینه واحد طول لوله که تابعی از قطر لوله D می‌باشد، Np تعداد لوله‌ها، NPU تعداد پمپ‌ها، $CPUj$ هزینه پمپ j ام که تابعی از توان کل مورد نیاز پمپ است، Cen هزینه انرژی سالیانه در واحد هد پمپ، Hpj هد کل پمپ j ام و CRF ضریب بازگشت سرمایه است که تابعی از عمر مفید پروژه و نرخ بهره سالیانه i است.

$$CRF = \frac{i(1+i)^y}{-1+(1+i)^y} \quad (41)$$

در رابطه بالا y عمر مفید پروژه و i نرخ بهره‌ی سالیانه است.

$$\text{Gen} = \frac{EAE \times cfu \times Q_s \times Q_t}{102 \times \eta e} \quad (42)$$

$$EAE = \frac{(1+e)^y \cdot (1+i)^y}{(1+e) \cdot (1+i)} \left[\frac{i}{(1+i)^y - 1} \right] \quad (43)$$

در رابطه بالا EAE فاکتور هزینه انرژی سالیانه، Q_t تعداد ساعات بهره‌برداری سالانه سیستم، Q_s دبی پمپاژ لیتر بر ثانیه، ηe راندمان کلی پمپ، cfu هزینه سوخت مربوط به یک کیلووات ساعت است.

تعریف قيود مسئله بهینه‌سازی با توجه به محدودیت‌های موجود:

(۱) محدودیت سرعت در لوله‌ها: اگر سرعت حرکت آب در لوله‌ها خیلی کم باشد سبب رسوب گذاری می‌شود، در مقابل زیاد شدن سرعت سبب ایجاد ضربه قوچ می‌گردد بنابراین انتخاب سرعت انتقالی باید به نحوی باشد که سیستم انتقال آب با این مشکلات مواجه نگردد، لذا سرعت در لوله‌های یک شبکه انتقال توزیع آب باید در محدوده‌ی سرعت حداکثر و حداقل طراحی گردد:

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (44)$$

که V_{min} و V_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر سرعت مجاز جریان در شبکه لوله‌ها و i شماره لوله‌ها می‌باشند. در این پروژه 0.7 و 2 متر بر ثانیه به ترتیب حداقل و حداکثر سرعت در نظر گرفته شده است. بنابراین لازم است محدودیت زیر برای تمام لوله‌ها در معادلات محدودیت بهینه‌سازی قرار گیرد:

$$g_1(i) = V_i - V_{max} \leq 0 \quad (45)$$

$$g_2(i) = -V_i + V_{min} \leq 0 \quad (46)$$

(۲) محدودیت فشار در گره‌ها: فشار موجود در هر گره زیاده‌تر از حد مجاز لوله‌ها باید در یک محدوده‌ی معینی قرار گیرد. این محدوده معین دارای یک کرانه پایین (حداقل فشار، h_{min}) و یک

$$Q_{PUMP} < 0 \quad \text{و} \quad \begin{cases} V_d^{n+1} = 0 \\ H_d^{n+1} - \frac{c}{g}(0) = B \end{cases} \quad (37)$$

در معادلات بالا Q دبی پمپاژ، v سرعت و H هد فشار، N سرعت دوران پمپ است. زیر نویس s برای سمت مکش و d برای لوله رانش پمپ است.

مدل بهینه‌سازی: الگوریتم ژنتیک از جمله روش بهینه‌سازی فرا ابتکاری و هوشمند است که برخلاف روش‌های مبتنی بر گرادیان بدون نیاز به مشتق تابع هزینه به دنبال نقطه بهینه آن می‌گردد. این روش چنان جای خود را در مسائل بهینه‌سازی باز کرده است که به عنوان معیاری برای مقایسه عملکرد روش‌های جدید نیز به بکار می‌رود. برای حل مسئله بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک از انتخاب کاملاً تصادفی جواب‌ها از بین فضای شدنی استفاده می‌شود که اصطلاحاً یک نسل نامیده می‌شود، سپس از بین این جمعیت انتخاب شده جواب‌های بهتر انتخاب شده و با استفاده از فرایند "جهش" جواب‌های بهتر باهم تلفیق شده و نسل بهتر از جواب‌ها تشکیل می‌شود و تا رسیدن به بهترین جواب‌های ممکن این روند ادامه پیدا می‌کند. الگوریتم ژنتیک به کاررفته در این مطالعه بر اساس یک سیستم دودویی شامل (۱ و ۰) است به نحوی که پارامترهای مدل به مینای ۰ و ۱ انتقال یافته و به عبارت دیگر رمزار می‌شوند. چنانچه محدوده تغییرات هر پارامتر $a_i \leq x_i \leq b_i$ باشد و میزان دقت اعداد آن پارامتر برابر با Δn_i باشد از رابطه زیر می‌توان تعداد ژن‌ها n_i را محاسبه نمود (قبادیان و همکاران، ۱۳۹۷).

$$2^{n_i-1} \leq (b_i - a_i) \times 10^{\Delta n_i} \leq 2^{n_i} \quad (38)$$

در این تحقیق برای هر خط لوله یک قطر بهینه محاسبه می‌شود. به عبارتی ۱۶ متغیر یا پارامتر باید تعیین شود قطرهای می‌تواند یکی از ۱۸ قطر موجود در بازار باشد که در جدول (۲) ارائه شده است. در این تحقیق برای قطرهای زیر ۵۰۰ میلی‌متر از جنس پلی‌اتیلن، بین ۶۰۰ تا ۹۰۰ میلی‌متر از جنس GRP انتخاب می‌شود (هرچند که مدل می‌تواند هر قطر با هر جنسی را به عنوان بانک اطلاعات بپذیرد). با در نظر گرفتن میزان دقت اعداد برابر یک‌دهم و محدوده قطر بین ۹۳/۸ تا ۹۰۰ میلی‌متر تعداد ژن‌ها (n_i) به ۱۰ دست می‌آید. پس از تعیین طول رشته یا ژن‌های مربوط به هر پارامتر، لازم است طول کروموزوم جامعه تعیین شود. تعداد لوله‌ها (m) در این شبکه که همان متغیر تصمیم است ۱۶ است، بنابراین طول کروموزوم جامعه برابر با ۱۶۰ تعیین گردید:

$$L = \sum_{i=1}^m n_i = 160 \quad (39)$$

تابع هدف: در تحقیق حاضر برای بهینه یابی قطر لوله‌های سیستم همچنین نوع و تعداد پمپ بهینه ایستگاه پمپاژ کمینه نمودن مجموع هزینه‌های جاری و ثابت در طول عمر مفید پروژه ضمن

پارامترهای موجود در تابع خزش تطابقی توسط (Covas et al., 2005) استفاده شد. در این شبیه‌سازی‌ها نیز همانند (Covas et al., 2005) تعداد سه المان کلونین - ویت در نظر گرفته شده است. زمان تأخیر برای این المان‌ها به ترتیب ۰/۰۵، ۱/۵ و ۵ ثانیه در نظر گرفته شد. مطابق پیشنهاد (Covas et al., 2005) حداقل سه المان کلونین - ویت برای شبیه‌سازی لوله‌های جریان غیر ماندگار در لوله‌های پلی‌اتیلن لازم است. زمان تأخیر τ_1 باید کمتر از نصف زمان بسته شدن شیر، زمان تأخیر τ_2 کمتر از دوره تناوب موج فشاری (4L/C) و زمان تأخیر τ_3 باید کمتر از مدت زمان شبیه‌سازی باشد. در جدول (۳) ضرایب خزش استفاده شده برای شبیه‌سازی نشان داده شده ارائه شده است. طول خط لوله به ۵۴ قسمت تقسیم شده است با در نظر گرفتن سرعت انتشار امواج فشاری ۳۹۰ متر بر ثانیه ($J_0 = \frac{1}{390} pa^{-1}$) گام زمانی محاسبات حدود ۰/۰۱۲۸ ثانیه برای شبیه‌سازی به دست آمد.

در شکل زیر نتایج برای دبی جریان ۱/۰۱ لیتر بر ثانیه در محل انتهایی خط لوله (محل T1) نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نوسانات فشار اندازه‌گیری شده با محاسباتی تطابق مناسبی دارند که نشان از دقت مدل عددی حاضر دارد و برای ادامه کار نتایج آن قابل اطمینان می‌باشد. از طرفی در شکل (۴) نوسانات فشار بدون در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک نیز نشان داده شده است. در شرایط ویسکوالاستیک نوسانات فشار شامل دامنه موج فشاری و طول موج نوسانات با شرایط الاستیک متفاوت می‌شود و باگذشت زمان اختلاف آن‌ها بیشتر می‌گردد. به عبارتی در شرایط الاستیک موج فشاری زودتر میرا می‌شود. این نتایج با نتایج ارائه شده توسط (Covas et al., 2005) تطابق دارد.

کرانه بالا (حداکثر فشار، h_{max}) است. حداقل فشار برای محدوده مورد مطالعه برابر فشار نسبی اتمسفر (حدود صفر در انتهای خط لوله) و حداکثر فشار ۱۰۰ متر در شرایط کارکرد عادی در نظر گرفته شد. در شرایط شبیه‌سازی ضربه قوچ حداکثر فشار ۱۶۰ متر برابر فشار ترکیبگی لوله و حداقل فشار به فشار بخار محدود گردید. این محدودیت‌ها به شکل معادلات زیر در مدل تعریف شده‌اند:

$$g_3(j) = h_j - h_{max} \leq 0 \quad (47)$$

$$g_4(j) = -h_j + h_{min} \leq 0 \quad (48)$$

لازم به ذکر است تعداد کل قیود در این تحقیق برابر با ۶۴ می‌باشد.

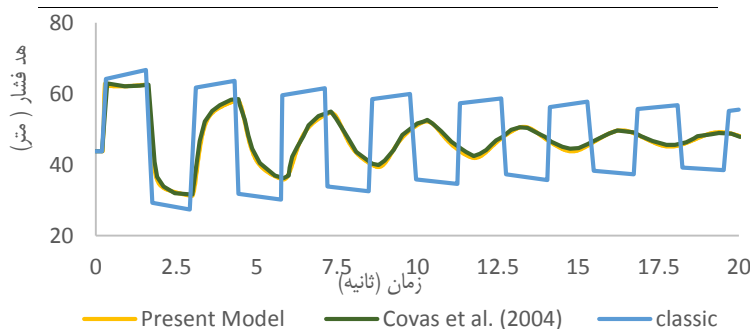
حل مسائل بهینه‌سازی مقید با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک مستلزم به‌کارگیری روش‌های مناسب جهت اعمال قیود مسئله می‌باشد. استفاده از توابع جریمه یکی از معمول‌ترین روش‌ها برای مدل‌سازی مسائل مقید می‌باشد. تحقیقات صورت گرفته برای تعریف و استفاده از توابع جریمه مناسب، نشان‌دهنده اهمیت و تأثیر این روش در عملکرد الگوریتم‌های ژنتیک می‌باشد (البرزی، ۱۳۸۸). با توجه به اینکه در این تحقیق تابع هدف دارای قیود طراحی است، می‌توان به‌وسیله‌ی تابع جریمه مجموعه قیود مساوی و نامساوی را به یک رابطه تبدیل کرد و به بهینه کردن رابطه‌ی مورد نظر پرداخت.

نتایج و بحث

صحت سنجی مدل: به‌منظور صحت سنجی مدل شبیه‌سازی جریان غیر ماندگار در لوله‌های ویسکوالاستیک از داده‌های اندازه‌گیری (Covas et al., 2004) در کالج سلطنتی لندن بر روی مدل مخزن - خط لوله پلی‌اتیلن و همچنین مقادیر پیشنهاد شده برای

جدول ۳- ضرایب خزش استفاده شده برای شبیه‌سازی ضربه قوچ سیستم (Covas et al., 2004)

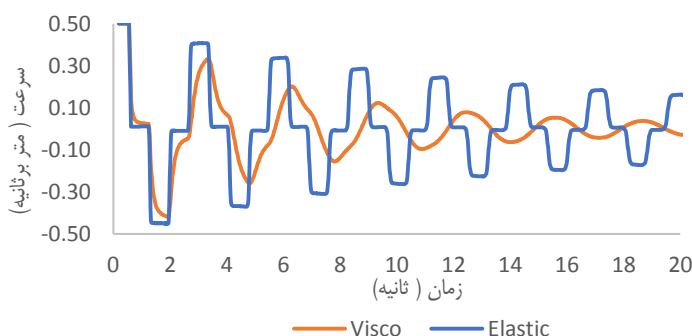
شماره المان کلونین - ویت	τ_k زمان تأخیر (s)	ضریب خزش $(Pa^{-1})(J_k)$
۱	۰/۰۵	$1/06 \times 10^{-10}$
۲	۱/۵	$9/33 \times 10^{-10}$
۳	۵	$1/12 \times 10^{-10}$



شکل ۴- نوسانات فشار اندازه‌گیری شده (Covas et al., 2004) و محاسبه شده توسط مدل حاضر بر روی لوله پلی‌اتیلن (شرایط کلاسیک برای

مقایسه نشان داده شده است)

در حالت الاستیک اتفاق می افتد هم از نظر اندازه و هم از نظر جهت حرکت به ویژه در زمان های انتهایی شبیه سازی بسیار متفاوت است. برای مثال در زمان ۱۹ ثانیه سرعت در وسط لوله حالت الاستیک منفی و حالت ویسکوالاستیک مثبت است. این موضوع در سیستم های خطوط لوله مرکب از لوله های الاستیک و ویسکوالاستیک در ادامه مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۵- بررسی خاصیت ویسکوالاستیک لوله بر روی نوسانات سرعت جریان در وسط خط لوله

همان گونه که نشان داده شده است در همه گره ها مقادیر حداکثر فشار در سیستم ویسکوالاستیک بشدت کمتر از حداکثر فشار مشاهده شده برای شرایط کلاسیک است. همچنین مقدار حداقل فشار مشاهده شده برای سیستم با لوله های ویسکوالاستیک نیز بیشتر از حالت کلاسیک است. علاوه بر این تعداد سیکل های فشار برای شرایط ویسکوالاستیک به مراتب کمتر از حالت الاستیک می باشد و میرا شدن امواج فشاری در بیشتر مواقع زودتر رخ داده است. با این وجود در برخی از گره ها همانند گره های شماره ۱۴ و ۹ مقدار فشار از حد مجاز ترکیدگی لوله بیشتر است.

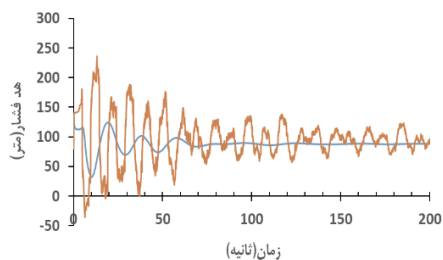
در جدول شماره (۴) حداکثر اضافه فشار ناشی از ضربه قوچ در گره های مختلف شبکه اسماعیل آباد با و بدون در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک لوله های پلی اتیلن در شرایط موجود ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می شود وقتی اثر خاصیت ویسکوالاستیک در نظر گرفته می شود مقادیر اضافه فشار در گره ها خیلی متفاوت از حالت الاستیک است.

در نظر گرفتن حالت ویسکوالاستیک برای لوله های پلی اتیلن در این سیستم نشان می دهد که اضافه فشار ایجاد شده در این حالت به صورت میانگین ۳۷ درصد حالت الاستیک است. نسبت اضافه فشار حالت ویسکو به حالت الاستیک بین ۰/۲ در گره P تا ۰/۷۲ در گره A7 نوسان دارد.

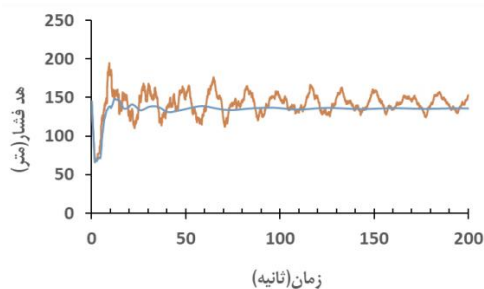
به منظور بررسی بیشتر تأثیر خاصیت ویسکوالاستیک بر روی خصوصیات جریان غیر ماندگار در شکل (۵) نوسانات سرعت جریان محاسبه شده در وسط خط لوله با و بدون در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک ترسیم شده است. همان گونه که ملاحظه می شود خاصیت ویسکوالاستیک باعث می شود که سرعت حرکت رفت و برگشت جریان داخل لوله در اثر بسته شده شیر انتهایی با آنچه

اثر خاصیت ویسکوالاستیک بر نوسانات فشار و سرعت ناشی از ضربه قوچ در سیستم لوله ها

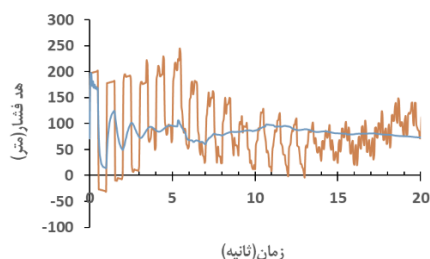
همان گونه که نشان داده شد در سیستم تک لوله - مخزن، در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک باعث می شود دامنه و طول موج امواج فشاری منتشر شده در خط لوله در مقایسه با حالت کلاسیک تغییرات زیادی داشته باشد. به منظور بررسی اثر این خاصیت در یک سیستم متشکل از چندین لوله و ایستگاه پمپاژ، از اطلاعات سیستم آبیاری اسماعیل آباد در شرایط موجود و با همان پارامترهای ارائه شده در جدول (۴) استفاده شد و مدل در دو مرحله با و بدون در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک لوله اجرا شد. سرعت انتشار امواج فشاری برای لوله های با جنس پلی اتیلن ۳۹۰ و لوله های GRP برابر ۴۹۵ متر بر ثانیه بر اساس جداول و محدوددهای ارائه شده توسط شرکت های سازنده در نظر گرفته شد. خاطر نشان می شود در هر دو مرحله خاصیت ویسکوالاستیک برای لوله های GRP لحاظ نشده است و تنها این لوله های پلی اتیلن هستند که خاصیت مذکور را دارا می باشند. مدت زمان شبیه سازی ۵۰۰ ثانیه گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه در نظر گرفته شد. با توجه به این اطلاعات فاصله گره های محاسباتی در لوله های پلی اتیلن ۱۹/۵ و در لوله های GRP ۲۴/۷۵ متر انتخاب شد. فرض شد همه شیرهای انتهایی بلافاصله بسته شوند و ایستگاه پمپاژ در مدت زمان ۵ ثانیه خاموش شود. نوسانات فشار در برخی از گره های شبکه در شکل (۶) نشان داده شده است.



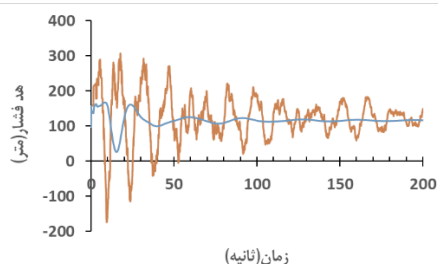
ب) گره ۳



الف) گره ۱



د) گره ۱۴



ج) گره ۹

شکل ۶- مقایسه نوسانات فشار در برخی گره‌ها با در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک لوله‌های پلی اتیلن (منحنی آبی) و بدون در نظر گرفتن آن (منحنی خط چین قرمز) در شرایط موجود شبکه اسماعیل آباد

جدول ۴- حداکثر اضافه فشار ایجاد شده در گره‌های سیستم تحت با و بدون در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک لوله‌ای پلی اتیلن

شماره گره	نام گره	فشار اولیه گره‌ها	اضافه فشار (کلاسیک)	اضافه فشار (ویسکوالاستیک)	نسبت اضافه فشار حالت ویسکو به کلاسیک
۱	p	۱۳۶/۲۰	۵۸/۳۳	۱۱/۵۹	۰/۲۰
۲	p1	۸۳/۸۴	۴۲/۴۳	۱۰/۸۹	۰/۲۶
۳	p8	۸۰/۱۲	۱۵۶/۰۰	۵۹/۰۷	۰/۳۸
۴	p3	۶۱/۷۵	۱۷۸/۱۴	۷۱/۳۰	۰/۴۰
۵	a5	۷۸/۰۱	۴۷/۰۷	۱۱/۷۱	۰/۲۵
۶	p4	۷۸/۱۹	۵۹/۴۹	۱۴/۹۴	۰/۲۵
۷	p5	۸۱/۸۱	۱۱۱/۸۲	۲۵/۰۵	۰/۲۲
۸	p6	۱۰۴/۴۵	۱۶۹/۸۶	۵۷/۳۳	۰/۳۴
۹	p7	۹۷/۶۹	۲۰۸/۷۸	۶۹/۵۸	۰/۳۳
۱۰	p9	۹۷/۸۱	۱۲۰/۱۸	۳۹/۱۴	۰/۳۳
۱۱	p10	۹۶/۷۳	۱۴۷/۶	۶۱/۶۲	۰/۴۲
۱۲	p13	۹۵/۴۲	۹۷/۶۱	۳۳/۱۵	۰/۳۴
۱۳	p14	۶۹/۶۳	۱۳۲/۷	۵۴/۸۶	۰/۴۱
۱۴	A7	۷۱/۲۹	۱۷۳/۹۱	۱۲۶/۰۷	۰/۷۲
۱۵	p2	۷۶/۷۸	۸۳/۴۲	۲۷/۲۳	۰/۳۳
۱۶	p11	۶۷/۷۴	۱۰۴/۱۴	۴۱/۴۶	۰/۴۰
۱۷	p12	۵۰/۰۰	۱۳۴/۹۳	۹۲/۹۳	۰/۶۹

با توجه مطالب ارائه شده در بالا و اهمیت قابل توجه خاصیت ویسکوالاستیک لوله‌های پلی اتیلن بر نوسانات فشار و سرعت در

تأثیر خاصیت ویسکوالاستیک بر طراحی بهینه هنگام در نظر گرفتن ملاحظات ضربه قوچ

شد. کوواس و همکاران سرعت موج فشاری در لوله‌های (PEHD) در محدود ۳۵۰ تا ۴۰۰ بر ثانیه قرار می‌گیرد و در تحقیق ایشان نهایتاً بر اساس اندازه‌گیری آزمایشگاهی عدد ۳۸۵ در نظر گرفته شد (Covas et al., 2004). با توجه به ضعف اطلاعات موجود در خصوص لوله‌های ساخت داخل، با فرض رعایت استانداردهای مربوطه ضرایب خزش استفاده شد برای لوله‌های پلی‌اتیلن همانند مقادیر ارائه شده در جدول (۳) در نظر گرفته شد. با توجه به پارامترهای نهایی الگوریتم ژنتیک ارائه شده در جدول (۵)، پارامترهای اقتصادی ارائه شده در جدول (۶) و اجرای مدل مقادیر قطر بهینه برای تمام لوله‌ها محاسبه شد. به منظور کاهش فضای جستجو نظر به اینکه در این تحقیق خاص آرایش شبکه شاخه‌ای می‌باشد و دبی جریان در لوله‌های از قبل مشخص است، حد بالا و پایین قطرهای معرفی شده برای هر لوله با توجه به محدود حداقل و حداکثر سرعت انتخاب شد. این امر منجر به کاهش حجم قابل توجهی از زمان اجرای برنامه گردید.

جدول ۵- پارامترهای نهایی الگوریتم ژنتیک در مدل بهینه‌سازی

پارامتر	تعداد متغیرها	تعداد کروموزوم	تعداد تکرار	احتمال جهش	احتمال تقاطع	تخطی ضربه جریمه از سرعت مجاز	تخطی ضربه جریمه از فشار مجاز
مقدار	۱۶	۳۲	۶۰	۰/۰۴	۰/۹۹	$6/5 \times 10^{20}$	$6/5 \times 10^{125}$

جدول ۶- پارامترهای اقتصادی

$Q_t(\text{hr})$	i	e	$n(\text{yr})$	$C_{fu}(\$/\text{kw-hr})$	$\text{CPU}(\$/\text{kw})$	EAE	$C_{en}(\$/\text{m})$	CRF	η_e
۲۸۰۰	۰/۲	۰/۰۹	۲۰	۰/۰۱	۵۰	۱/۵۹۴	۴۹۹/۷۷	۰/۲۰۵	۰/۷۵

هزینه ثابت و جاری محاسبه شد و در جدول (۸) ارائه شده است. اعداد و ارقام جدول (۸) نشان می‌دهد بهینه‌سازی سیستم آبیاری تحت فشار اسماعیل‌آباد برای شرایط اعمال ضربه قوچ و در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک لوله‌های پلی‌اتیلن سیستم توانسته است که مقدار هزینه سالیانه سیستم را ۷/۱۵ درصد و هزینه خرید و لوله گذاری را ۹/۴۲ درصد کاهش داده است.

تحقیق قبلی انجام شده توسط شاهی نژاد برای طراحی بهینه شبکه اسماعیل‌آباد خاصیت ویسکوالاستیک لوله‌های پلی‌اتیلن را در نظر نگرفته است. همچنین تابع هزینه را به صورت هزینه ثابت خرید و اجرای لوله‌ها در بهینه‌سازی اعمال نموده است. علاوه بر این از رابطه هیز- ویلیامز برای محاسبه افت اصطکاک در شبیه‌سازی ضربه قوچ استفاده شده است و در خصوص نوع شرط مرزی اعمال شده توضیحی داده نشده است. با این ملاحظات بر اساس تحقیق انجام شده توسط ایشان بهینه‌سازی با در نظر گرفتن ملاحظات ضربه قوچ مقدار هزینه خرید لوله‌ها را ۷۵۵۵۰۸ دلار برآورد نموده که در مقایسه با شرایط موجود ۹ درصد کاهش داشته است. فشار ابتدای سیستم در این حالت برابر با ۱۳۷/۵۹ متر به دست آمده است. قطرهای بهینه ارائه شده در

سیستم تحت فشار، در ادامه به منظور رسیدن به اهداف تحقیق حاضر، طراحی بهینه و با در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک برای لوله‌های پلی‌اتیلن و خاصیت الاستیک برای لوله‌های GRP در هنگام اعمال ضربه قوچ انجام شد. اعمال شدیدترین حالت وقوع ضربه قوچ یعنی خاموش شدن ناگهانی ایستگاه پمپاژ و بسته شدن لحظه‌ای تمام شیرآلات مورد توجه قرار گرفت. این نوع از اعمال ضربه قوچ تا حدودی تخیلی ولی در جهت اطمینان، بدترین حالت در نظر گرفته شده است. لازم به توضیح است که برای اقطار بزرگ‌تر از ۵۰۰ میلی‌متر لوله با جنس GRP انتخاب شد و برای آن‌ها خاصیت ویسکوالاستیک در نظر گرفته نشد در حالی که برای قطرهای کوچک‌تر از آن لوله با جنس پلی‌اتیلن انتخاب و خاصیت ویسکوالاستیک در محاسبات ضربه قوچ برای آن‌ها مدنظر قرار گرفت. علاوه بر این سرعت انتشار امواج فشاری برای لوله‌های GRP حدود ۴۹۵ و برای لوله‌های پلی‌اتیلن ۳۹۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته

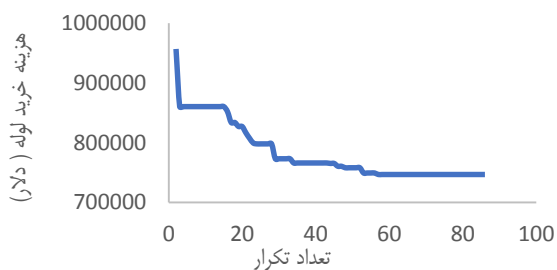
در جدول (۷) مقادیر قطر بهینه محاسبه شده توسط مدل با در نظر گرفتن قیود ضربه قوچ و خاصیت ویسکوالاستیک ارائه شده است. همچنین فشار در گره‌ها و سرعت جریان در لوله‌های سیستم بهینه و وضع موجود سیستم ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود در شرایط بهینه فشار ایستگاه پمپاژ از ۱۳۶/۲۵ متر به ۱۳۲/۷۱ متر کاهش می‌یابد. این کاهش هد فشار می‌تواند هزینه جاری ایستگاه پمپاژ را کاهش دهد. با توجه به پارامترهای اقتصادی لحاظ شده در جدول (۶) یعنی نرخ بهره ۲۰ درصد، نرخ تنزیل ۹ درصد و هزینه هر کیلووات برق مصرفی حدود ۲۴۱ ریال یا تقریباً ۰/۰۱ دلار کاهش ۳/۵۴ متری هد فشار در ایستگاه پمپاژ سالانه حدود ۲۱۷۶ دلار کاهش هزینه در پی خواهد داشت؛ که در طول بیست سال عمر مفید پروژه حدود ۴۳۵۲۰ دلار می‌شود.

همان گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است نهایتاً بعد از رسیدن به جواب بهینه مقدار هزینه خرید و اجرای لوله‌های شبکه به حدود ۷۴۶۷۹۵ دلار و مقدار تابع هدف که همان مجموع هزینه‌های جاری و ثابت سالانه در طول عمر مفید ۲۰ ساله پروژه برابر با ۲۳۴۹۷۷ دلار می‌شود. به منظور مقایسه برای شرایط وضع موجود

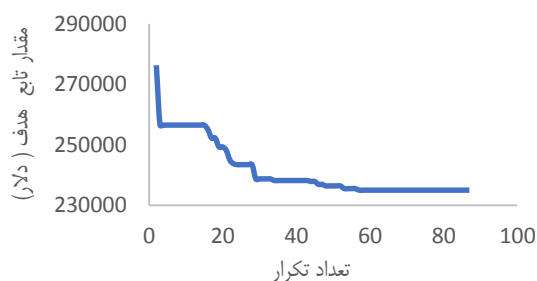
تحقیق مذکور در ستون آخر جدول (۹) ارائه شده است.

جدول ۷- مشخصات هندسی- هیدرولیکی شبکه اسماعیل آباد در شرایط بهینه شده و وضع موجود

نام لوله	طول لوله (m)	دبی (L/s)	قطر لوله (وضع موجود) (mm)	قطر لوله (بهینه) (mm)	سرعت جریان (وضع موجود) (m/s)	سرعت جریان (بهینه) (m/s)	نام گره	فشار در گره‌ها (وضع موجود) (m)	فشار در گره‌ها (بهینه) (m)
PP1	۱۱۱۶	۸۵۶/۵۶	۹۰۰	۸۰۰	۱/۳۴۶	۱/۷۰۴	p	۱۳۶/۱۹۶	۱۳۲/۷۱۳
P1P8	۹۵۵	۵۲/۹	۲۱۳/۲	۱۹۱/۸	۱/۴۸۳	۱/۸۳۲	p1	۸۳/۸۳۶	۷۹/۳۷۲
P1P3	۱۱۰۰	۱۲۸/۹۴	۳۰۲/۸	۳۰۲/۸	۱/۷۹۱	۱/۷۹۱	p8	۸۰/۱۱۸	۷۰/۹۴۶
P1A5	۲۰۰	۲۴۴/۹۲	۴۲۶/۴	۴۲۶/۴	۱/۷۱۶	۱/۷۱۶	p3	۶۱/۷۴۸	۵۷/۲۸۳
A5P4	۲۰۱	۱۹۰/۳۴	۴۲۶/۴	۴۲۶/۴	۱/۳۳۴	۱/۳۳۳	a5	۷۸/۰۰۷	۷۳/۵۴۱
P4P5	۳۹۰	۱۲۸/۹۴	۳۴۱/۲	۳۰۲/۸	۱/۴۱۱	۱/۷۹۱	p4	۷۸/۱۹۴	۷۳/۷۲۹
P5P6	۸۰۶	۵۸/۳۳	۲۱۳/۲	۲۳۸/۸	۱/۶۳۵	۱/۳۰۳	p5	۸۱/۸۰۹	۷۶/۱۵۷
P6P7	۵۷۵	۲۱/۴۹	۱۳۶/۴	۱۳۶/۴	۱/۴۷۱	۱/۴۷۱	p6	۱۰۴/۴۵۳	۱۰۱/۸۳۷
P1P2	۱۴۳۰	۴۲۹/۸	۷۰۰	۶۰۰	۱/۱۱۷	۱/۵۲۱	p7	۹۷/۶۹۳	۹۵/۰۷۷
P2P9	۶۷۰	۹۸/۲۴	۲۶۸/۶	۲۶۸/۶	۱/۷۳۵	۱/۷۳۵	p9	۹۷/۸۰۷	۹۱/۶۰۸
P9P10	۸۴۰	۳۳/۷۷	۱۷۰/۶	۱۵۳/۴	۱/۴۷۸	۱/۸۲۸	p10	۹۶/۷۳۳	۸۵/۱۱۲
P2P13	۷۲۰	۱۱۹/۷۳	۳۴۱/۲	۳۰۲/۸	۱/۳۱	۱/۶۶۳	p13	۹۵/۴۱۷	۸۷/۳۰۳
P13P14	۶۶۰	۴۹/۱۲	۲۱۳/۲	۱۹۱/۸	۱/۳۷۷	۱/۷۰۱	p14	۶۹/۶۳۲	۵۸/۶۶
P2A7	۱۱۰	۴۶/۰۵	۱۳۶/۴	۱۹۱/۸	۳/۱۵۳	۱/۵۹۴	A7	۷۱/۲۹۳	۶۹/۹۳۹
P2P11	۵۵۰	۱۶۵/۸	۳۴۱/۲	۳۴۱/۲	۱/۸۱۴	۱/۸۱۴	p2	۷۶/۷۷۷	۷۰/۵۷۷
P11P12	۷۰۰	۱۳۲	۲۶۸/۶	۳۴۱/۲	۲/۳۳۱	۱/۴۴۴	p11	۶۷/۷۳۶	۶۱/۵۳۶
							P12	۵۰/۰۰۰	۵۰/۰۰۰



ب



الف

شکل ۷- مقادیر الف) تابع هدف یا هزینه کل سالیانه و ب) هزینه خرید و اجرای لوله‌های شبکه در مقابل تعداد تکرار

جدول ۸- مقایسه اقتصادی سیستم بهینه بر اساس ضربه قوچ لوله‌های ویسکوالاستیک و شرایط موجود

حالت بررسی	هزینه خرید لوله و اجرا (دلار)	هزینه سالیانه (دلار)	فشار ابتدای سیستم (متر)
وضع موجود	۸۲۵۹۳۵	۲۵۳۰۹۲	۱۳۶/۱۹۶
بهینه با ضربه قوچ - دیسکو الاستیک	۷۴۶۷۹۵	۲۳۴۹۷۷	۱۳۲/۷۱۳

اتمسفر استفاده نموده و در سناریو بهینه‌سازی با ملاحظات ضربه قوچ از لوله‌های پلی‌اتیلن با فشار اسمی ۱۲/۸ اتمسفر نیز استفاده شده است.

لازم به ذکر است در تحقیق مذکور در سناریو بهینه‌سازی بدون ضربه قوچ قطر تجاری برای لوله‌های پلی‌اتیلن با فشار اسمی ۱۰

با هد ثابت مدل شده است (قبادیان و همکاران، ۱۳۹۷). همانند تحقیق شاهی نژاد در تحقیق مذکور نیز از رابطه افت هیزن ویلیامز استفاده حتی در زمان شبیه‌سازی ضربه قوچ در سیستم و تعیین فشار مازاد در گرہ‌ها استفاده شده است. هزینه خرید و اجرای لوله‌های سیستم در تحقیق مذکور برابر با ۷۷۵۵۱۱ دلار و فشار ابتدای سیستم در این حالت از بهینه‌سازی ۱۳۳/۹۸ متر محاسبه گردید. در جدول (۹) قطرهای بهینه محاسبه شده در تحقیق مذکور ارائه شده است.

از آنجائی که تولید لوله‌های اخیر در حال حاضر کمتر رواج دارد در تحقیق حاضر کلاً لوله‌های پلی‌اتیلن با فشار اسمی ۱۰ اتمسفر مورد توجه قرار گرفته است (شاهی نژاد، ۱۳۹۰).

قبادیان و همکاران با در نظر گرفتن اثر ضربه قوچ به دلیل بسته شدن ناگهانی شیرآلات انتهایی سیستم (در این حالت دبی به سمت لترال‌ها همچنان ادامه دارد) قطرهای بهینه شبکه آبیاری اسماعیل‌آباد را محاسبه کردند. در تحقیق مذکور نیز تنها تابع هزینه ثابت در نظر گرفته شده است. از طرفی ایستگاه پمپاژ به صورت مخزن

جدول ۹- مقایسه قطرهای بهینه محاسبه شده در تحقیق حاضر با تحقیقات قبلی

نام لوله	طول لوله (m)	دبی (L/s)	قطر لوله (وضع موجود) (mm)	قطر لوله (حالت بهینه) (mm)	قطر لوله (حالت بهینه) (mm)	مطالعه قبادیان و همکاران (۱۳۹۷)	مطالعه شاهی نژاد (۱۳۹۰)
PP1	۱۱۱۶	۸۵۶/۵۶	۹۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰
PIP8	۹۵۵	۵۲/۹	۲۱۳/۲	۱۹۱/۸	۱۹۱/۸	۲۳۸/۸	۱۹۱/۸
PIP3	۱۱۰۰	۱۲۸/۹۴	۳۰۲/۸	۳۰۲/۸	۳۰۲/۸	۳۰۲/۸	۳۰۲/۸
PIA5	۲۰۰	۲۴۴/۹۲	۴۲۶/۴	۴۲۶/۴	۴۲۶/۴	۴۲۶/۴	۴۲۶/۴
A5P4	۲۰۱	۱۹۰/۳۴	۴۲۶/۴	۴۲۶/۴	۴۲۶/۴	۳۸۳/۸	۳۸۳/۸
P4P5	۳۹۰	۱۲۸/۹۴	۳۴۱/۲	۳۰۲/۸	۳۰۲/۸	۳۰۲/۸	۳۰۲/۸
P5P6	۸۰۶	۵۸/۳۳	۲۱۳/۲	۲۳۸/۸	۲۳۸/۸	۲۳۸/۸	۲۰۴/۶
P6P7	۵۷۵	۲۱/۴۹	۱۳۶/۴	۱۳۶/۴	۱۳۶/۴	۱۱۹/۴	۱۳۰/۸
PIP2	۱۴۳۰	۴۲۹/۸	۷۰۰	۶۰۰	۶۰۰	۶۰۰	۶۰۰
P2P9	۶۷۰	۹۸/۲۴	۲۶۸/۶	۲۶۸/۶	۲۶۸/۶	۲۶۸/۶	۲۵۷/۸
P9P10	۸۴۰	۳۳/۷۷	۱۷۰/۶	۱۵۳/۴	۱۵۳/۴	۱۵۳/۴	۱۵۳/۴
P2P13	۷۲۰	۱۱۹/۷۳	۳۴۱/۲	۳۰۲/۸	۳۰۲/۸	۳۰۲/۸	۳۰۲/۸
P13P14	۶۶۰	۴۹/۱۲	۲۱۳/۲	۱۹۱/۸	۱۹۱/۸	۲۳۸/۸	۱۸۴
P2A7	۱۱۰	۴۶/۰۵	۱۳۶/۴	۱۹۱/۸	۱۹۱/۸	۲۳۸/۸	۱۹۱/۸
P2P11	۵۵۰	۱۶۵/۸	۳۴۱/۲	۳۴۱/۲	۳۴۱/۲	۳۴۱/۲	۳۸۳/۸
P11P12	۷۰۰	۱۳۲	۲۶۸/۶	۳۴۱/۲	۳۴۱/۲	۳۸۳/۸	۳۰۲/۸

خاصیت کرنش تأخیری در این لوله‌ها، واکنش آن‌ها در مقابل ضربه قوچ متفاوت از لوله‌های الاستیک می‌باشد. در این مطالعه تحلیل پدیده ضربه قوچ در یک شبکه واقعی که متشکل از لوله‌های الاستیک (GRP) و ویسکوالاستیک (HDPE) انجام شد. به منظور مقایسه عمداً خاصیت ویسکوالاستیک لوله‌های پلی‌اتیلن در یک اجرا در نظر گرفته نشد و با نتایج عدم حذف این خاصیت مقایسه شد. در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک برای لوله‌های پلی‌اتیلن در این سیستم نشان داد که میانگین اضافه فشار ایجاد شده در این حالت ۳۷ درصد حالت الاستیک است. نسبت اضافه فشار حالت ویسکو به حالت الاستیک بین ۰/۲ در گرہ P تا ۰/۷۲ در گرہ A7 نوسان از خود نشان داد. در ادامه به منظور رسیدن به اهداف تحقیق حاضر، طراحی بهینه شبکه با در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک برای لوله‌های پلی‌اتیلن و خاصیت الاستیک برای لوله‌های GRP در هنگام اعمال

نکته قابل توجه در مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تحقیقات قبلی این است که در مبحث طراحی بهینه با در نظر گرفتن اثر ضربه قوچ، نوع شرایط مرزی و یا به عبارتی نحوه اعمال ضربه قوچ می‌تواند بر روی نتایج تأثیرگذار باشد. در تحقیق حاضر شرایط اعمال ضربه قوچ به شدت سخت‌گیرانه و متفاوت از تحقیقات قبلی بوده است. به گونه‌ای که بررسی انجام شده و اجرای مدل نشان داد که اگر خاصیت ویسکوالاستیک لوله‌ها در نظر گرفته نشود با تعویض قطر لوله‌ها، امکان مهار اضافه فشار ناشی از ضربه قوچ میسر نبوده و باید از سایر تأسیسات مهار ضربه قوچ استفاده شود.

نتیجه گیری

با توجه به مزایای فراوان لوله‌های ویسکوالاستیک، استفاده از آن‌ها در سیستم‌های آبیاری تحت فشار رو به افزایش است. به خاطر

- Covas, D., Stoianov, I., Mano, J. F., 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. *Journal of Hydraulic Research*. 42 (5):517-532.
- Cruz, D. and Pinho, F. 2007. Fully-developed pipe and planar flows of multimode viscoelastic fluids. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*. 141 (2-3):85-98.
- Cruz, D., Pinho, F. and Resende, P. 2004. Modelling the new stress for improved drag reduction predictions of viscoelastic pipe flow. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*. 121 (2-3):127-141.
- Engel, A. J. 2017. Development of cardiac atrial kick shear wave elastography to assess myocardial stiffness, The University of Nebraska-Lincoln.
- Keramat, A., Kolahi, A. G. and Ahmadi, A. 2013. Waterhammer modelling of viscoelastic pipes with a time-dependent Poisson's ratio. *Journal of fluids and structures*. 43:164-178.
- Mansour, H., Safwat, M., Djebedjian, B. and Tawfik, M. 2013. SIMULATION OF WATER HAMMER IN VISCOELASTIC PIPES. *Mansoura Engineering Journal*. 9:38.
- Mostafa, N. H. 2014. Effect of a viscoelastic foundation on the dynamic stability of a fluid conveying pipe. *International Journal of Applied Science and Engineering*. 12 (1):59-74.
- Phan-Thien, N. 1978. A nonlinear network viscoelastic model. *Journal of Rheology*. 22 (3):259-283.
- Soares, A. K., Covas, D. and Reis, L. F. 2008. Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer. *Journal of Hydraulic Engineering* 134. (9):1389-1394.
- Triki, A. and Chaker, M. A. 2019. Compound technique-based inline design strategy for water-hammer control in steel pressurized-piping systems. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 169:188-203.
- Triki, A. and Fersi, M. 2018. Further investigation on the water-hammer control branching strategy in pressurized steel-piping systems. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 165:135-144.
- Zanganeh, R. and Ahmadi, A. 2013. Axial vibration of a rod with viscoelastic support. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 3 (1):67-79.
- ضربه قوچ انجام شد. اعمال شدیدترین حالت وقوع ضربه قوچ یعنی خاموش شدن ناگهانی ایستگاه پمپاژ و بسته شدن لحظه‌ای تمام شیرآلات موردتوجه قرار گرفت. مقادیر قطرهای بهینه به دست آمده در این حالت در جدول (۷) آورده شده است. در شرایط بهینه فشار ایستگاه پمپاژ از ۱۳۶/۲۵ متر به ۱۳۲/۷۱ متر کاهش می‌یابد. این کاهش هد فشار می‌تواند هزینه جاری ایستگاه پمپاژ را سالانه حدود ۲۱۷۶ دلار کاهش دهد. نهایتاً بعد از رسیدن به جواب بهینه مقدار هزینه خرید و اجرای لوله‌های شبکه به حدود ۷۴۶۷۹۵ دلار و مقدار تابع هدف که همان مجموع هزینه‌های جاری و ثابت سالانه در طول عمر مفید ۲۰ ساله پروژه برابر با ۲۳۴۹۷۷ دلار می‌شود.

منابع

البرزی، م. ۱۳۸۸. کتاب الگوریتم ژنتیک. انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.

شاهی نژاد، ب. ۱۳۹۰. طراحی بهینه سیستم‌های انتقال و توزیع شبکه‌های تحت فشار با استفاده از برنامه‌ریزی خطی مختلط اعداد حقیقی و صحیح. رساله دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

قبادیان، ر.، حاضری، آ. و فاطمی، ا. ۱۳۹۷. بهینه‌سازی قطر لوله‌های شبکه آبیاری تحت فشار با استفاده از جستجوی ژنتیکی اعداد صحیح (مطالعه موردی: شبکه اسماعیل‌آباد لرستان). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۵(۴):۲۰۷-۲۲۴.

قبادیان، ر.، حاضری، آ. و فاطمی، ا. ۱۳۹۷. بررسی عددی تأثیر ضربه قوچ بر طراحی بهینه سیستم آبیاری تحت فشار. مجله تحقیقات منابع آب ایران. ۱۴(۲):۴۷-۶۱

Ahmadi, A. and Keramat, A. 2010. Investigation of fluid-structure interaction with various types of junction coupling. *Journal of fluids and structures*. 26 (7-8):1123-1141.

Chaker, M. A. and Triki, A. 2020. Investigating the branching redesign strategy for surge control in pressurized steel piping systems. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 180:104044.

Covas, D., Stoianov, I., Mano, J. F., 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. *Journal of Hydraulic Research*. 43 (1):56-70.

The effect of Pipe Viscoelasticity on the Optimal Design of Pressurized Irrigation Network under Water Hammer Conditions (Case Study of Ismail Abad Lorestan Pressurized Irrigation Network)

A. Hazeri¹, R. Ghobadian^{2*}, M.M. Heidari³

Received: Jan.25, 2022

Accepted: Apr.04, 2022

Abstract

The delayed strain property of polyethylene pipes makes their reaction to water hammer different from that of elastic pipes. The present study focuses on the effect of viscoelastic properties on the optimal design of pressurized irrigation system taking into account the impact of water hammer. For this purpose, the three models, the optimizer, the hydraulic steady solver (HSS), and hydraulic transient solver (HTS) were coded together in the form of a computer model. In the optimizer model, the initial population is created from the available diameters. Then, for each member of this population, in the HSS, the values of pressure in the nodes and velocity in the pipes are calculated. These values are sent to HTS as an initial condition. In the HTS, by applying a water hammer condition on the system, the maximum overpressure in each node is calculated and the results are sent to the optimizer model. Here the value of the objective function is calculated by observing the constraints for each member of the initial population and relative compatibility is obtained for all members. By applying the operation of mutation, intersection, replacement with the elitist approach, the next generation is finally calculated and the mentioned steps are repeated until the condition of stopping the calculations and determining the optimal answer is reached. Validation of the HTS in viscoelastic pipes using data measured at the Imperial College (London, UK) and considering three Kelvin-Voigt elements and retardation times of 0.05, 1.5 and 5 seconds for these three elements are done. The results showed that for wave speed of 390 m / s, the measured pressure fluctuations are in good agreement with the calculations. After confirming the model results, water hammer simulation of Ismailabad network in the current situation, which is composed of GRP and HDPE pipes, was performed with and without considering the viscoelastic properties for polyethylene pipes. The results of this step showed that the overpressure created in the nodes after applying the water hammer in the viscoelastic state is on average 37% of the elastic state and the range of its fluctuations varies between 20 and 72%. Following the optimal design of the network studied in the present study, the results showed that after reaching the optimal answer, the cost of purchasing and implementing network pipes to about \$ 745,590 and the amount of the objective function or the sum of current and fixed annual costs over the life of the project equivalent to \$ 212,760. These values are 9.57% and 9.3% less than the current status values, respectively.

Keywords: Optimization, Viscoelasticity, Pressurized irrigation network, Water hammer

1- PhD Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

3- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

(*- Corresponding Author Email: r_ghobadian@razi.ac.ir)