

Transient Flow Modeling in Viscoelastic Pipes and Determination of Optimal Parameters Based on Experimental Data

Mohammad Reza Gooran Orimi, Rouzbeh Shafaghat*^{ID}, Saeid Mohammadzade Negharchi

Babol Noshirvani University of Technology, Sea Based Energy Research Group, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: June 03, 2026

Revised: June 16, 2026

Accepted: July 11, 2026

ePublished: September 03, 2026

ABSTRACT

Transient phenomena, especially water hammer, are among the fundamental challenges in fluid transmission systems, causing damage to water distribution networks due to severe pressure fluctuations. In this research, transient flow behavior was modeled by simultaneously considering viscoelasticity and unsteady friction. Given the effectiveness of the Kelvin–Voigt model for plastic pipes, this model was implemented in MATLAB and calibrated with experimental data. The innovation is an optimization framework based on the genetic algorithm for simultaneous calibration of viscoelastic parameters, including coefficients θ and α , creep compliance (J), retardation time (τ), wave speed (a), and the number of spring–dashpot elements. Results showed that the model achieves low RMSE values (0.2320 and 0.4315 for flow rates of 1.06 and 2 L/s), confirming high accuracy in reproducing transient flow behavior. Increasing α and J improved agreement between numerical and experimental results. Parameter interaction analysis determined optimal θ and element number as 0.8 and 2 units, respectively. The retardation time exhibited significant sensitivity to flow rate, rising from 0.454 to 0.959 seconds when the flow rate increased from 1.06 to 2 L/s. Finally, accurate determination of cycle time and optimal selection of spring–dashpot elements were found to play a decisive role in enhancing both accuracy and reliability of transient flow modeling.

Keywords: Transient Flow, Water Hammer, Viscoelastic Pipe, Kelvin–Voigt, Retardation Time.

How to cite this article

Gooran Orimi M.R., Shafaghat R., Mohammadzade Negharchi S., Transient Flow Modeling in Viscoelastic Pipes and Determination of Optimal Parameters Based on Experimental Data. Modares Mechanical Engineering, 2026;26(11):899-916.

*Corresponding author's email: rshafaghat@nit.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0003-4827-5727



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



مدلسازی جریان گذرا در لوله‌های ویسکوالاستیک و تعیین پارامترهای بهینه بر پایه داده‌های تجربی

محمدرضا گوران اوریمی، روزبه شفقت*^{id}، سعید محمدزاده نقارچی

دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، آزمایشگاه تحقیقاتی سیستم‌های انتقال آب، ایران

چکیده

پدیده‌های گذرا، به‌ویژه ضربه قوچ، از چالش‌های اساسی در سیستم‌های انتقال سیالات هستند که به دلیل نوسانات شدید فشار، موجب آسیب به شبکه آبرسانی می‌شوند. در این پژوهش، رفتار جریان گذرا با در نظر گرفتن همزمان اثرات ویسکوالاستیسیته و اصطکاک ناپایا مدل‌سازی شد. با توجه به کارایی مدل «کلین-ویت» در توصیف رفتار لوله‌های پلاستیکی، این مدل در محیط نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی و با داده‌های تجربی کالیبره شد. نوآوری این مطالعه ارائه یک چارچوب بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای کالیبراسیون همزمان پارامترهای ویسکوالاستیک شامل ضرایب α ، θ ، λ ، τ ، زمان تأخیر τ ، سرعت موج a و تعداد المان‌های فنر و میراگر است. نتایج نشان داد که این مدل با دستیابی به مقادیر پایین RMSE (0.23320 و 0.43150 برای دبی‌های $1/0.6$ و 2 لیتر بر ثانیه)، دقت بالایی در بازتولید رفتار جریان گذرا دارد. تحلیل‌ها نشان داد که افزایش ضرایب α و λ ، انطباق نتایج عددی با داده‌های تجربی را بهبود می‌بخشد. بر اساس تحلیل اندرکنش پارامترها، مقدار بهینه‌ی پارامتر تطبیقی θ و ویژگی‌های المان‌های فنر و میراگر در دبی‌های مورد مطالعه، به‌ترتیب برابر با 0.8 و 2 واحد تعیین گردید. همچنین پارامتر «زمان تأخیر» حساسیت بالایی به تغییرات دبی نشان داد؛ به‌طوری که با افزایش دبی از $1/0.6$ به 2 لیتر بر ثانیه، مقدار بهینه‌ی آن از 0.454 به 0.959 ثانیه افزایش یافت. در نهایت، مشخص شد که تعیین دقیق زمان سیکل و انتخاب تعداد بهینه‌ی المان‌های فنر و میراگر، نقشی تعیین‌کننده در افزایش دقت و قابلیت اطمینان مدل‌سازی ایفا می‌کند.

کلیدواژه‌ها: جریان گذرا، ضربه قوچ، لوله ویسکوالاستیک، کلین-ویت، زمان تأخیر.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۱۲

نحوه ارجاع به این مقاله

گوران اوریمی محمدرضا، شفقت روزبه، محمدزاده نقارچی سعید، مدلسازی جریان گذرا در لوله‌های ویسکوالاستیک و تعیین پارامترهای بهینه بر پایه داده‌های تجربی، مهندسی مکانیک مدرس، ۹۱۷-۸۹۹:۱۴۰۵:۲۶(۱۱).

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rshafaghat@nit.ac.ir

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0000-0003-4827-5727



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

یکی از موضوعات مهم در حوزه مکانیک سیالات، مطالعه جریان گذرا است. در جریان گذرا یه سری از پارامترها نظیر سرعت و فشار سیال با گذشت زمان تغییر می‌کنند و وابسته به زمان هستند [۱، ۲]. در واقع می‌توان گفت که هر گونه اختشاش در سیستم-های انتقال آب می‌تواند جریان را از حالت دائم خارج و وارد جریان گذرا کند. از کاربردهای جریان گذرا می‌توان به شناسایی نشت، انسداد جزئی و آسیب‌های دیواره داخلی بعد حرکت در طول لوله و ایجاد فشار منعکس شده اشاره کرد [۳]. این روش به این صورت انجام می‌گیرد که بعد مدلسازی جریان گذرا، اگر نشت، انسداد جزئی و آسیب دیواره داخلی در لوله وجود داشته باشد، نمودار حاصل از جریان مدلسازی شده با نمودار حالت بدون این مشکلات متفاوت است [۴]. به همین دلیل مطالعه جریان گذرا اهمیت زیادی دارد. یکی از پدیده‌های مخرب جریان گذرا، ضربه قوچ است [۵]. ضربه قوچ با بستن سریع شیر هنگام حرکت جریان در لوله به وجود می‌آید و باعث آسیب‌های جدی به سیستم‌های انتقال سیال می‌شود. برای مدلسازی بسته به جنس لوله از روش‌های مختلف خطوط مشخصه استفاده می‌شود. برای لوله‌های با جداره الاستیک، مانند بتنی و فلزی، از روش‌های اصطکاک دائم و غیردائم استفاده می‌شود، در حالی که برای لوله‌های پلاستیکی مانند پلی‌اتیلن و پی‌وی‌سی از روش‌های ویسکوالاستیک خطی بهره می‌برند. رفتار ویسکوالاستیکی نسبت به رفتار الاستیکی باعث تضعیف بیشتر سرعت موج به دلیل داشتن خاصیت ویسکوز در جریان گذرا می‌شود [۶]. روش ویسکوالاستیک خطی، یکی از روش‌های مدلسازی جریان گذرا در لوله‌های با خواص جداره ویسکوالاستیک است. مهم‌ترین و دقیق‌ترین روش ویسکوالاستیک خطی، روش کلوین-ویت به شمار می‌آید. در روش کلوین-ویت یه سری از پارامترها بر مقدار جریان مدلسازی شده موثر هستند. با این حال می‌بایست مقدار مناسب و بهینه این پارامترها را بدست آورد تا از انحراف دقت حل جریان گذرا تا حدودی جلوگیری نمود. یکی از روش‌های مناسب برای پیدا کردن مقدار بهینه پارامترها، الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک است. این الگوریتم نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که از تکنیک فرگشتی مانند وراثت، جهش زیست شناسی و اصول انتخابی داروین برای یافتن مقادیر بهینه پارامترها استفاده می‌شود.

در سال‌های اخیر، محققان زیادی تلاش کرده‌اند تا با مدلسازی جریان گذرا در لوله‌های با خواص ویسکوالاستیک (مثل پلی اتیلن و پی وی سی)، از خطرات پدیده ضربه قوچ بکاهند.

در دسته اول تلاش شد که با مدلسازی جریان گذرا به روش کلوین-ویت، تاثیرات خواص لوله‌های ویسکوالاستیک را مورد ارزیابی قرار دهند. در این راستا، دیدیا کواس و همکاران (۲۰۰۵) مدلی ریاضی پیشرفته معرفی کردند که قادر به شبیه‌سازی جریان

گذرا با لحاظ کردن هم‌زمان اثرات اصطکاک ناپایا و ویسکوالاستیسیته بود [۷]. متعاقباً، سوآرز و همکاران (۲۰۰۸) به تحلیل جنبه‌های ویسکوالاستیک لوله‌ها در پدیده ضربه قوچ پرداختند [۸]. لندری و همکاران در سال ۲۰۱۲ اصطکاک ناپایدار و میرایی ویسکوالاستیک را در سیستم‌های لوله کشی بدون کاویتاسیون را مطالعه کردند [۹]. سوآرز و همکاران در سال ۲۰۱۲ بر تجزیه و تحلیل جریان گذرا با کاویتاسیون در لوله‌های پلی اتیلن را مورد مطالعه قرار دادند [۱۰]. کرامت و همکاران (۲۰۱۴) بر تعیین تابع خزش در لوله‌های ویسکوالاستیک در شرایط جریان گذرا تمرکز داشتند [۱۱].

قابلیت اطمینان و دقت شبیه‌سازی‌های گذرا در لوله‌های ویسکوالاستیک، موضوعی بود که فرانت و همکاران (۲۰۱۷) به آن پرداختند [۱۲]. وهبا (۲۰۱۷) نیز در همان سال، با توسعه یک مدل عددی دوبعدی، رفتار گذرای سیال در این نوع لوله‌ها را مورد مطالعه قرار داد [۱۳]. در ادامه، فیرکوفسکی و همکاران (۲۰۱۸) با اصلاح معادله پیوستگی، امکان در نظر گرفتن تأثیر ویسکوالاستیسیته دیواره لوله بر جریان دوفازی را فراهم آوردند [۱۴]. اشمیت و همکاران (۲۰۱۸) به طور مشخص، اثر ویسکوالاستیسیته لوله‌های پلی‌اتیلنی را بر پدیده جریان گذرا در یک لوله طولانی بررسی نمودند [۱۵].

فرایندهای کالبراسیون و توسعه مدل‌های عددی بر اساس داده‌های تجربی نیز از دیگر رویکردهای مهم بوده است؛ فتحی‌مقدم (۲۰۱۹) مدلی عددی را بر مبنای نتایج تجربی جریان گذرا در شبکه‌های لوله پلی‌اتیلن کالبره کرد [۱۶]. مرت و همکاران (۲۰۲۰) با تلفیق مدل اصطکاک ناپایا و ویسکوالاستیسیته خطی، جریان گذرا را مدلسازی کرده و اعتبار آن را با داده‌های تجربی سنجیدند [۱۷]. چگینی زاده و همکاران در سال ۲۰۲۱ به مدلسازی اثرات همزمان ضربه قوچ و کاویتاسیون بر روی لوله پرداختند [۱۸]. محمدرزاده و شفتت در سال ۲۰۲۱ روش خطوط مشخصه را برای شبکه شیدار آزمایشگاه دانشگاه نوشیروانی توسعه دادند [۱۹]. این گروه همچنین روی ارزیابی استراتژی تنظیم فشار سرویس بر شبکه آب آب روستایی بر اساس تقاضای پالسی با استفاده از روش خطوط مشخصه‌ها کار کردند [۲۰]. جوادی و همکاران در سال ۲۰۲۲ به بررسی رفتار غیرخطی یک لوله با خاصیت ویسکوالاستیک هنگام ایجاد پدیده ضربه قوچ پرداختند [۲۱].

در حوزه تشخیص و مدیریت عواقب جریان گذرا، موسوی فرد و همکاران (۲۰۲۲) مدلی معکوس برای تشخیص نشت در لوله‌های پلاستیکی توسعه دادند [۲۲]. آندراد و همکاران (۲۰۲۳) مدلی گذرا ارائه کردند که توانایی مدیریت رفتار ویسکوالاستیک لوله را دارد [۲۳]. پژوهش اخیر یزینگا و همکاران (۲۰۲۴) یک روش یکپارچه برای حل جریان کاویتاسیون گذرا در لوله‌های ویسکوالاستیک ارائه داده است [۲۴]. وفایی راد و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده مدل کلوین-ویت سه عنصره که پارامترهای زمان تاخیر، ضربه خزش و

سرعت موج متغیرهای تصمیم بودند، تابع خزش را محاسبه کردند [۲۵]. کرامت و همکاران (۲۰۲۶) با در نظر گرفتن رفتار تاخیری دیواره لوله ویسکوالاستیک پاسخی خزشی را با سرعت موج‌های مختلف با استفاده الگوریتم بهینه سازی ژنتیک بدست آوردند [۲۶].

در دومین دسته از پژوهش‌های انجام شده، تمرکز بر کاهش شدت موج ضربه قوچ از طریق شناسایی و بررسی پارامترهای مؤثر بر رفتار گذرا بوده است. برگانت و همکاران (۲۰۰۸) به طور مشخص پارامترهای کلیدی تأثیرگذار بر شکل‌دهی موج ضربه را ارزیابی کردند [۲۷]. تایب و همکاران در سال ۲۰۰۹ یک مدل ریاضی برای محاسبه جریان گذرا در لوله‌های ویسکوالاستیک با کاویتاسیون ایجاد کردند [۲۸]. کرامت و همکاران در سال ۲۰۱۰ به مطالعه پدیده ضربه قوچ در لوله‌های ویسکوالاستیک زمانی که فشار سیال به به فشار بخار می‌رسد، پرداختند [۲۹]. در سال ۲۰۱۴، منیکونی و همکاران به مطالعه اثرات ترکیبی یک شیر خطی نیمه‌بسته، خواص ویسکوالاستیک لوله و همچنین اصطکاک ناپایا بر رفتار گذرای لوله تحت فشار پرداختند [۳۰]. اوانگلیستا و همکاران (۲۰۱۵) به تحلیل فرایندهای بازتاب و انتقال موج گذرا در لوله‌های ویسکوالاستیک پرداختند [۳۱]. در حالی که فرانته‌آ و همکاران (۲۰۱۵) به طور ویژه، دینامیک پیک‌های فشار را در طول یک لوله ویسکوالاستیک دارای نشتی مورد بررسی قرار دادند [۳].

در سال ۲۰۱۶، یائو و همکاران با توسعه یک تقریب تحلیلی چندمقیاسی و به صورت شکل بسته از مدل ویسکوالاستیک کلون-ویت، به توصیف تضعیف موج فشار ناشی از ضربه قوچ در لوله‌های پلیمری پرداختند [۶]. تریکی (۲۰۱۷) در همین راستا، راهکارهایی برای بازطراحی سیستم‌های هیدرولیکی لوله‌کشی فولادی با هدف کنترل نوسانات شدید ناشی از ضربه قوچ ارائه داد [۳۲]. گنگ و همکاران (۲۰۱۸) با بهره‌گیری از یک مدل چندعنصری، تحلیل حساسیت تضعیف موج وابسته به فرکانس را در لوله‌های پلاستیکی انجام دادند [۳۳]. متعاقباً، رحیمی و همکاران (۲۰۲۰) نقش مواد ویسکوالاستیک را در جذب انرژی پدیده ضربه قوچ مورد ارزیابی قرار دادند [۳۴]. وانگ و همکاران (۲۰۲۰) یک روش نوین مبتنی بر موج گذرا را برای تخمین پارامترهای ویسکوالاستیک در لوله‌هایی با نشتی ناشناخته معرفی کردند [۳۵]. در همان سال، کریمیان و همکاران به مطالعه اندرکنش سیال-ساختار هنگام وقوع ضربه قوچ در حوزه فرکانس پرداختند. وو و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از رویکرد انرژی کل انتگرالی، یک مدل اصطکاک شبه‌دوبعدی را توسعه داده و نقش اصطکاک و رفتار ویسکوالاستیک را در اعداد رینولدز مختلف تحلیل نمودند [۳۶]. موسوی‌فرد در سال ۲۰۲۲ یک مدل دو بعدی از کاویتاسیون توزیع شده برای جریان گذرا در یک خط لوله با جنس پلی اتیلن را توسعه

دادند [۳۷]. وو و همکاران در سال ۲۰۲۲ یک مدل اصطکاک شبه دو بعدی را که با استفاده از یک روش انرژی کل انتگرال ایجاد می‌کند و کار ناشی از شرایط اصطکاک و ویسکوالاستیک را در مقادیر مختلف Re بررسی می‌کند، مطالعه کردند [۳۸]. در پژوهش‌های اخیر، ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) رفتار موج گذرا را با هدف تشخیص نشت در لوله‌های ویسکوالاستیک مطالعه کردند [۳۹] و سرانجام در سال ۲۰۲۴، همین گروه پژوهشی تأثیر مدل‌های مختلف اصطکاک بر جریان گذرا در لوله‌های ویسکوالاستیک را در اعداد رینولدز متفاوت و با استفاده از رویکرد تحلیل انرژی ارزیابی نمودند [۴۰]. بهرام و همکاران (۲۰۲۵) برای کنترل ضربه قوچ در قسمتی اصلی لوله، لوله پلاستیکی جایگزین کردند و تأثیر این لوله بر فشار بیش از حد ضربه قوچ را بررسی کردند [۴۱]. بهرام و همکاران (۲۰۲۵) یک مدل جریان گذرای یک بعدی بهبود یافته ارائه کردند که اثرات FSI را با در نظر گرفتن نسبت پواسون، ویسکوالاستیسیته و رفتار ترمومکانیکی مواد پلیمری را ادغام می‌کند [۴۲].

در سومین دسته از مطالعات، تلاش بر آن بود تا با مقایسه نتایج عددی و تجربی، پارامترهای بهینه مدل کلون-ویت شناسایی شده و از این طریق، خطاهای حل در مدل‌سازی جریان گذرا کاهش یابد. برگانت و همکاران (۲۰۱۱) به تجزیه و تحلیل ضربه قوچ در مقیاس بزرگ در دستگاه خط لوله از جنس PVC پرداختند [۴۳]. در سال ۲۰۱۴، پزینگا و همکاران با استفاده از الگوریتم میکروژنتیک، پارامترهای مکانیکی لوله پلی‌اتیلن با چگالی بالا را تعیین کردند [۴۴]. نلسون و همکاران (۲۰۱۶) عدم قطعیت‌های مرتبط با مدل‌سازی معکوس گذرا را در حضور اصطکاک ناپایدار و ویسکوالاستیسیته دیواره لوله مورد بررسی قرار دادند [۴۵]. جواد و همکاران (۲۰۲۱) با به کارگیری دو روش تابع خزش و تحلیل فشار گذرا، به کالیبراسیون ضرایب خزش پرداختند [۴۶]. حاضری و همکاران (۲۰۲۲) خواص ویسکوالاستیک لوله را به منظور طراحی بهینه شبکه آبیاری در شرایط وقوع ضربه قوچ ارائه دادند [۴۷]. پزینگا (۲۰۲۳) پارامترهای ویسکوالاستیک مؤثر بر لوله‌های پلیمری را برای تحلیل جریان گذرا مورد بررسی قرار داد [۴۸]. سان و همکاران در سال ۲۰۲۴ کالیبراسیون پارامترهای خزش به روش گام به گام بر اساس نتایج تحلیل حساسیت ارائه را ارائه دادند [۴۹]. شریفی‌فرد و همکاران در سال ۲۰۲۴ به تعیین عملکرد خزش لوله‌های ویسکوالاستیک با استفاده از فشار گذرا در حوزه زمان و فرکانس پرداختند [۵۰].

همان‌طور که بیان شد، مطالعات متعددی در زمینه مدل‌سازی جریان گذرا در لوله‌های ویسکوالاستیک انجام شده است. بخش عمده‌ای از پژوهش‌ها بر توسعه مدل‌های ویسکوالاستیک و تحلیل رفتار خزش متمرکز بوده‌اند. همچنین اثرات اصطکاک گذرا در مطالعات مختلف بررسی شده‌اند. برخی پژوهش‌ها نیز بر تحلیل

روش کلوین-ویت ضروری است. یکی از نقاط ضعف تحقیقات پیشین، تعیین مقدار بهینه برخی از پارامترهای روش کلوین-ویت مثل ضریب θ ، ضریب α ، ضریب خزش (J)، زمان تأخیر (τ)، سرعت موج (a) و تعداد المان فنر و میراگر با توجه به مقایسه با نتایج تجربی، با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک بوده‌است. همچنین یکی از مواردی که در مقالات گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بدست آوردن مقدار مناسب ضریب خزش، زمان تأخیر، سرعت موج و تعداد المان فنر و میراگر بوده است. نوآوری در این مقاله، پیدا کردن مقدار بهینه پارامترهای کلوین-ویت با طول گام‌های مختلف برای پی بردن به میزان حساسیت مقدار هر پارامتر در نتایج عددی از طریق مقایسه با نتایج تجربی ستاپ آزمایشگاهی دانشگاه نوشیروانی بابل بوده است. همچنین می‌توان گفت هدف از نوآوری در این مقاله کاهش خطا نتایج عددی نسبت به تجربی با تعیین مناسب پارامترهای کلوین-ویت بوده است.

با توجه به اهمیت پارامترهای مدل کلوین-ویت در دقت مدل‌سازی جریان گذرا در لوله‌های ویسکوالاستیک، شناسایی دامنه تغییرات معتبر این پارامترها بر اساس منابع علمی، گامی اساسی در جهت بهینه‌سازی نتایج محسوب می‌شود. در گام نخست، تعیین طول گام‌های مناسب برای هر پارامتر در بازه‌های مشخص شده، امکان ارزیابی میزان حساسیت نتایج مدل‌سازی به تغییرات مقادیر پارامترها را فراهم می‌آورد. متعاقباً، با به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، مقادیر بهینه این پارامترها شناسایی خواهد شد. این مقادیر بهینه‌سازی شده، سپس با داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل مقایسه خواهند شد تا دقت و صحت مدل مورد تأیید قرار گیرد. هدف غایی این پژوهش، دستیابی به مقادیر پارامتری بهینه برای ارتقاء دقت مدل‌سازی و کاهش اثرات نامطلوب ناشی از جریان گذرا است. الگوریتم ژنتیک به دلیل توانایی‌اش در شناسایی کارآمد پارامترهای بهینه، نقش کلیدی در این فرآیند ایفا می‌کند. در این پژوهش، مدل‌سازی جریان گذرا در لوله‌های ویسکوالاستیک با استفاده از مدل کلوین-ویت انجام شد و نتایج عددی حاصل با داده‌های تجربی برای دی‌های ۱/۰۶ و ۲ لیتر بر ثانیه مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور کالیبراسیون مدل، شش پارامتر کلیدی شامل ضریب θ ، ضریب α ، ضریب خزش (J)، زمان تأخیر (τ)، سرعت موج (a) و تعداد المان‌های فنر-میراگر با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک تعیین شدند. نتایج نشان داد که استفاده از دو المان کلوین-ویت برای بازتولید مناسب رفتار ویسکوالاستیک لوله کفایت داشته و مقادیر بهینه سرعت موج در محدوده ۷۷/۲ تا ۷۷/۶ متر بر ثانیه قرار می‌گیرد. همچنین مقادیر RMSE حاصل از مقایسه نتایج عددی و تجربی برای دو دی مورد بررسی به ترتیب برابر با ۰/۲۳۲۰ و ۰/۴۲۱۵ به دست آمد که بیانگر دقت قابل قبول مدل و کارایی

میرایی موج، جذب انرژی و بازتاب موج تمرکز داشته‌اند. در سال‌های اخیر، موضوعاتی نظیر کالیبراسیون پارامترها، تحلیل حساسیت، تشخیص نشتی و اندرکنش سیال-سازه نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. با وجود پیشرفت‌های انجام‌شده، هنوز توسعه مدل‌های جامع که بتوانند اثرات ویسکوالاستیسیته و اندرکنش دینامیکی سامانه را به‌صورت همزمان در نظر بگیرند، یکی از چالش‌های اصلی این حوزه محسوب می‌شود. مقایسه تحقیقات گذشته به همراه روندنمایی فعالیت‌های پژوهشی در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱ دسته‌بندی مطالعات انجام شده در زمینه جریان گذرا در لوله‌های ویسکوالاستیک

Table 1 Classification of studies conducted in the field of transient flow in viscoelastic pipes

Research focus	Selected references	The most important topics examined
Viscoelastic modeling	[۲۳، ۱۷، ۱۵، ۹، ۷]	Development of viscoelastic models, nonlinear behavior, combination models and creep effects
Cavitation and two-phase flow	[۳۷، ۲۹، ۲۸، ۲۴، ۱۴، ۱۰]	Modeling cavitation, cavitation flow and two-phase behavior
Wave damping and transient friction	[۴۰، ۳۴، ۳۱، ۲۷]	Analysis of wave attenuation, transient friction, wave reflection and energy absorption
Calibration and optimization of parameters	[۵۰، ۴۶، ۴۵، ۱۱]	Parameter estimation, sensitivity analysis, optimal design and model calibration
Leak detection and analysis	[۳۹، ۳۵، ۲۲، ۳]	Leak detection, pressure analysis and inverse methods
Structure-Fluid Interaction	[۳۶]	Fluid-structure interaction analysis
Numerical methods and engineering applications	[۳۲، ۱۸، ۱۳]	Development of numerical models and water hammer control

جدول ۲ ماتریس خلاصه نکات کلیدی

Table 2 Key points summary matrix

references	VE modeling	Cavitation	Wave attenuation	Parameter calibration	Leak detection	FSI
[۷]	*		*			
[۱۰]	*	*				
[۲۸]		*				
[۳۰]	*		*			
[۳۵]	*		*	*	*	
[۳۶]	*		*			*
[۴۴]	*			*		
[۳۷]	*	*				
[۳۹]	*		*	*	*	
[۵۰]	*	*	*	*		

بر اساس توضیحات مقالات پیشین، تمامی مقالات بر اهمیت استفاده از فرمول کلوین-ویت برای مدل‌سازی جریان گذرا در لوله‌های پلاستیکی تأکید کرده‌اند. همچنین بیان شده است که برای نزدیک شدن نتایج مدل‌سازی به نتایج نتایج تجربی، استفاده از

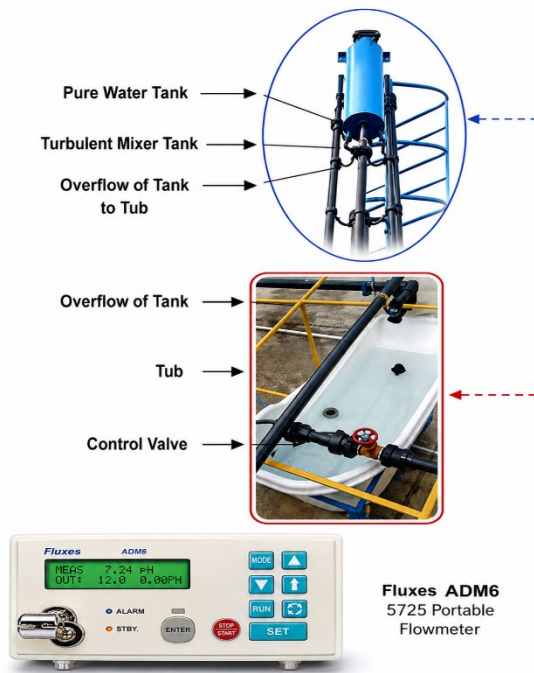
مناسب روش پیشنهادی در شبیه‌سازی جریان گذرا و کالبراسیون پارامترهای ویسکوالاستیک است.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ابتدا جریان گذرا در ستاپ آزمایشگاهی دانشگاه نوشیروانی بابل که از یک شبکه حلقوی انتقال آب با لوله پلی اتیلن ساخته شده است، تست گرفته می‌شود و سپس با استفاده روش عددی کلون-ویت مقایسه می‌شود.

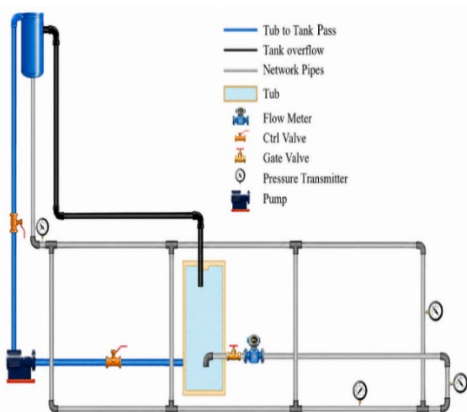
۲-۱- ساختار کلی شبکه تجربی

یکی از خلاءهای اساسی در کارهای مهندسی، بدست آوردن ضریب افت هد اصطکاکی لوله‌های پلی اتیلن می‌باشد. برای این منظور برای تعیین افت هد اصطکاکی از شبکه آزمایشگاهی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل استفاده شده‌است. این شبکه قابلیت تست جریان غیردائم و همین طور مقدار افت هد اصطکاکی در دبی و دماهای مختلف را دارد. ساختار این شبکه به صورت حلقوی می‌باشد که از سه حلقه مربعی به ابعاد ۲ در ۲ متر تشکیل شده‌است. تعداد لوله‌های اصلی ۱۲ تا و تعداد گره ۱۰ تا می‌باشد. جنس لوله‌ها از پلی اتیلن با قطر نامی ۴۲/۶ میلی‌متر و ضخامت ۳/۶۸ می‌باشد. برای ثابت نگه داشتن مقدار افت هد ورودی به سیستم، از یک مخزن هوایی به ارتفاع ۶/۸ متر استفاده می‌شود. تجهیزات و ساختار کلی شبکه آزمایشگاهی در شکل‌های ۱(الف) و برخی از اجزا شبکه آزمایشگاهی در ۱(ب) نشان داده شده‌است.



شکل ۱ (ب) برخی از اجزا شبکه آزمایشگاهی
Fig. 1(b) Some components of the laboratory network

شماتیک کلی شبکه آزمایشگاهی در شکل (۲) نشان داده شده‌است. مطابق شکل (۲) وقتی پمپ شروع کار کردن می‌کند، آب از وان به مخزن در ارتفاع ۶/۸ متری فرستاده می‌شود. بعد از اینکه آب در مدار شبکه جریان یافت، دبی خروجی شبکه با استفاده از دبی سنج توربینی خوانده و ثبت می‌شود. برای کنترل جریان آب در شبکه از شیر مخروطی شکل در انتهای شبکه استفاده شده‌است.



شکل ۲ شماتیک کلی شبکه آزمایشگاهی نوشیروانی بابل
Fig. 2 General schematic of the Noshirvani laboratory network in Babol

۲-۱-۱- تجهیزات

برای گرفتن مربوط مقدار افت هد اصطکاکی بر اساس تغییرات دبی اولیه در جریان گذرا، از تجهیزان مختلفی استفاده می‌شود. در زیر



شکل ۱(الف) شبکه آزمایشگاهی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
Fig. 1(a) Laboratory Network of Noshirvani University of Technology, Babol

تجهیزات استفاده شده و خطوط انتقال در شبکه توضیح داده می-شود:

(۱) مخزن تحت فشار: یک مخزن از جنس فولاد زنگ نزن در ارتفاع ۶/۸ متری از سطح شبکه جهت ثابت نگه داشتن افت هد اصطکاکی در کل شبکه استفاده شده است.

(۲) دبی سنج: یک دبی سنج توربینی جهت تخمین دبی گذرنده از سطح مقطع لوله، به صورت ۴ روش اندازه-گیری حجم عبوری از مقطع در واحد زمان استفاده شده است.

(۳) پمپ سانتریفیوژ: یک پمپ جابجایی مثبت جهت تامین هد مورد نیاز برای شبکه. حداکثر هد قابل تامین برای این پمپ ۱۲ متر می-باشد.

(۴) سنسور: برای اندازه-گیری مقدار فشار در شبکه از سنسورهای مبدل استفاده شده است که داده های خروجی آن بر حسب متر می-باشد.

(۵) دستگاه اندازه-گیری: سنسورهای متصل به شبکه قابلیت داده برداری به صورت همزمان از سنسورها با فرکانس ۱۰۰۰ هرتز را دارا می-باشند. ذخیره سازی اطلاعات ضبط شده در این دستگاه به صورت فایل xls یا csv در نرم افزار اکسل می-باشد [۵۱].

۲-۲- معادلات حاکم

دو معادله بقای جرم (پیوستگی) و بقای مومنوم برای توصیف پارامترهای جریان گذرا در هر مکان و هر زمان مورد نیاز است. این معادلات اثرات اصطکاک ناماندار و اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله ها را در نظر می-گیرند و به صورت معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی هستند. برای مدلسازی مواد ویسکوالاستیک چندین مدل تعمیم یافته پیشنهاد شده که مهم ترین آن روش کلوین-ویت هست. در مدل کلوین-ویت چندین المان فنر و میراگر به صورت سری بهم متصل شده و با یه مدل فنری ترکیب شده است. با فرض حجم کنترل و با استفاده از قضیه انتقال رینولدز، این معادلات به صورت معادلات (۱) و (۲) نوشته می-شوند.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + (a_0^2)/gA \frac{\partial Q}{\partial x} + (2*a_0^2)/g \left(\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + 1/gA \frac{\partial Q}{\partial t} + hf = 0 \quad (2)$$

x امتداد محور لوله، t زمان، H هد پیژومتریک، Q دبی، a سرعت موج، g شتاب گرانش، A سطح مقطع لوله، ε_r کرنش تاخیری و hf افت هد در واحد طول است. معادلات دیفرانسیل (۱) و (۲) با روش خطوط مشخصه (MOC) حل می-شوند.

۲-۲-۳ روش خطوط مشخصه

در روش خطوط مشخصه معادلات پیوستگی و مومنوم بازنویسی شده و در ادامه با اعمال ضریب مقاومت لوله، معادلات دیفرانسیلی با مشتقات جزئی ساده می-شوند. از دیدگاه فیزیکی، خطوط مشخصه مسیر امواج گذرا در امتداد خط لوله در هر مرحله زمانی را نشان می-دهد. با تقسیم گام مکانی در لوله به صورت Δx ، گام زمانی به صورت $\Delta t = \frac{\Delta x}{a}$ بدست می-آید. این بدان معناست که در محاسبات فعلی عدد کورانت برابر یک خواهد بود. در این مقاله به

منظور بهبود مدسازی از عدد کورانت یک استفاده شده است. معادلات جبری برای مجراهای الاستیکی و ویسکوالاستیکی را می-توان به ترتیب در جهت مثبت و منفی به صورت معادلات (۳) و (۴) نوشت.

$$C^+: Q(i,j) = CP - Ca \times H(i,j) \quad (3)$$

$$C^-: Q(i,j) = CP - Ca \times H(i,j) \quad (4)$$

CP و Cn ثابت هایی هستند که به روش عددی مورد استفاده برای بیان اصطکاک دائم، اصطکاک غیردائم و مدل ویسکوالاستیک خطی بستگی دارد. مقدار این ثابت ها به صورت معادلات زیر بدست می-آیند:

$$CP = (Q(i-1,j-1) + B \times H(i-1,j-1) + CP1' + CP1'' + CP1''') / (1 + CP2' + CP2'') \quad (5)$$

$$CN = (Q_-(i+1,j-1) + B \times H(i+1,j-1) + CN1' + CN1'' + CN1''') / (1 + CN2' + CN2'') \quad (6)$$

$$Ca = (B + CP2''') / (1 + CP2'' + CP2''') \quad (7)$$

$$Ca = (B + CN2''') / (1 + CN2'' + CN2''') \quad (8)$$

در معادلات بالا، علامت ' برای حالت اصطکاک دائم، علامت '' برای حالت اصطکاک غیر دائم و علامت ''' برای رفتار ویسکوالاستیک لوله هستند. فرمول های مرتبط با ضرایب بالا در جدول (۲) آورده شده است.

پارامتر B به صورت تابعی از سیال است که به صورت معادله (۹) است. R ضریب مقاومت لوله است و برای هر نوع جریان (آرام و آشفته) به صورت معادله (۱۰) بدست می-آید.

$$B = \frac{g \times a}{a_0} \quad (9)$$

$$R = \frac{f}{2gDA^2} \quad (10)$$

مقدار دبی و افت هد در در زمان و مکان مشخص به صورت معادلات زیر بدست می-آید:

جدول ۳ تعیین ضرایب CP1، CP2، CN1 و CN2

Table 3 Determining the coefficients CP1, CP2, CN1 and CN2

Steady state friction (')		
Frictionless	CP1'=CP2'=0	CN1'=CN2'=0
First-order friction	CP1' = -RΔt Q _{-(i-1,j-1)} CP1'' = 0	CN1' = -RΔt Q _{+(i+1,j-1)} CN1'' = 0
Second-order friction	CP1' = 0 CP2' = -RΔt Q _{-(i-1,j-1)}	CN1' = 0 CN2' = -RΔt Q _{+(i+1,j-1)}
Unsteady state friction ('')		
No non-permanent friction	CP1''=CP2''=0	CN1''=CN2''=0
$CP1'' = k' \theta Q_{-(i,j-1)} - k' (1-\theta) (Q_{-(i-1,j-1)} - Q_{-(i-1,j-2)} - k'' \text{SGN}(Q_{-(i-1,j-1)})) Q_{-(i,j-1)} $ $CN1'' = k' \theta Q_{+(i,j-1)} - k' (1-\theta) (Q_{+(i+1,j-1)} - Q_{+(i+1,j-2)} - k'' \text{SGN}(Q_{+(i+1,j-1)})) Q_{+(i,j-1)} $ $CP2'' = CN2'' = k' \theta$		
Viscoelastic behavior of the pipe wall (''')		
Linear elastic	CP1'''=CP2'''=0	CN1'''=CN2'''=0
Linear viscoelastic	$CP1''' = -CN1''' = -2a\Delta t \sum_{k=1}^n (n_{KV}) \left[\frac{C_0}{J_k} \frac{k}{\Delta t} (1 - e^{-(\Delta t)/\tau_k}) \right] H_{-(i,j-1)} + C_0 \frac{k}{\Delta t} e^{-(\Delta t)/\tau_k} (H_{-(i,j-1)} - H_{-(i,0)}) - e^{-(\Delta t)/\tau_k} \frac{k}{\tau_k} \varepsilon_{rk}(i,j-1) \right]$ $CP2''' = CN2''' = 2a\Delta t \sum_{k=1}^n (n_{KV}) \left[\frac{J_k}{k} \frac{k}{\Delta t} (1 - e^{-(\Delta t)/\tau_k}) \right] H_{+(i,j-1)} + C_0 \frac{k}{\Delta t} e^{-(\Delta t)/\tau_k} (H_{+(i,j-1)} - H_{+(i,0)}) - e^{-(\Delta t)/\tau_k} \frac{k}{\tau_k} \varepsilon_{rk}(i,j-1) \right]$ $C_0 = (\alpha_0 D_0 \gamma) / (2e_0)$	

محدوده مناسب برای J در بین 10^{-11} تا 10^{-8} قرار دارد که این محدوده در پژوهش حاضر نیز لحاظ گردیده است.

۴. زمان تأخیر (τ)

زمان تأخیر (τ)، که نسبت ویسکوزیته به مدول یانگ است، پارامتر دیگری از مدل کلویین-ویت محسوب می‌شود. مشابه ضریب خزش، مقدار τ برای هر نوع جریان ثابت است، اما با توجه به جنس لوله و ویژگی‌های مدول یانگ و ویسکوزیته، می‌تواند مقادیر متفاوتی را برای لوله‌های ویسکوالاستیک بپذیرد. مطالعات پیشین [۷، ۸، ۱۱، ۵۷، ۵۸، ۶۱، ۶۶، ۷۰]، بازه بین ۰/۰۵ تا ۵ ثانیه را به عنوان مقدار مناسب برای τ معرفی کرده‌اند که این محدوده در این پژوهش نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

۵. سرعت موج (a)

سرعت موج (a) به خصوصیات و جنس لوله ویسکوالاستیک وابسته است و مقادیر آن برای لوله‌های مختلف، متفاوت اما برای هر دبی مشخص، ثابت است. برای بدست آوردن سرعت موج ممکن است یک مقدار ثابت با توجه به فرمول $a = 4L/T$ (برابر طول لوله و T برابر زمان رفت و برگشت موج) بدست نیاید و مقادیر مختلفی از سرعت موج نزدیک هم حاصل شود [۵۴]. با این حال باید مقدار سرعت موج رو در یک بازه در نظر گرفت. با محاسبه فرمول $a = 4L/T$ و مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی، سرعت موج مناسب در این پژوهش بین ۷۵/۸ متر بر ثانیه تا ۷۷/۶ متر بر ثانیه خواهد بود. لازم به ذکر است که اگرچه بازه سرعت موج برای هر لوله ثابت است، ممکن است برای دبی‌های متفاوت، مقادیر نهایی سرعت موج کمی تغییر کند.

۶. تعداد المان‌ها

در تحلیل رفتار مکانیکی لوله‌های ویسکوالاستیک با استفاده از مدل کلویین-ویت، تعداد المان‌ها (معادل فنرها و میراگرهای موازی که به صورت سری مدلسازی می‌شوند) بسته به جنس و ویژگی‌های لوله متغیر است، اما برای هر نوع جریان مشخص، ثابت در نظر گرفته می‌شود [۷، ۱۱، ۱۶، ۲۸، ۵۹، ۶۵، ۶۸، ۶۹، ۷۱]. در این پژوهش، تعداد المان‌ها در بازه [۱، ۱۰] مورد بررسی قرار گرفت تا امکان ارزیابی تأثیر این پارامتر بر رفتار لوله‌های ویسکوالاستیک و انتخاب مدل بهینه فراهم گردد.

مقدارهای ماکزیمم و مینیمم به همراه طول گام و تعداد حالات پارامترهای کلویین با توجه به منابع معتبر و شرایط آزمایش در جدول (۴) آورده شده است.

مطابق جدول (۳) پارامترهای ضریب θ ، ضریب α ، ضریب خزش (J)، زمان تأخیر (τ)، سرعت موج (a) و تعداد المان و فنر و میراگر بر مقدار جواب فرمول کلویین-ویت تأثیرگذار هستند. در ادامه این پارامترها و مقدار بازه‌ها آن‌ها تعریف خواهد شد [۸، ۵۲].

۳-۲- تعریف پارامترهای کلویین-ویت و مقدار بازه آن‌ها

در این پژوهش، مدل کلویین-ویت به عنوان چارچوبی برای تحلیل جریان گذرا در لوله‌های ویسکوالاستیک به کار گرفته شده است. پارامترهای کلیدی این مدل و محدوده معتبر آن‌ها به شرح زیر تعیین گردیده‌اند:

۱. ضریب تعدیل (θ)

ضریب تعدیل (θ) یکی از پارامترهای درون فرمول اصطکاک غیرماندگار است که طبق فرمول جدول ۲ روی مقدار ضریب "CPI و "CN1 تأثیر دارد. ضریب تعدیل (θ) [۵۳]، که مقادیر آن در بازه [۰، ۱] قرار دارد، برای ارزیابی جریان در لوله‌ها استفاده می‌شود. بر اساس مطالعات پیشین و نتایج تجربی حاصل از این پژوهش، مقدار بهینه و معتبر این ضریب برابر با ۰/۸۵ تعیین گردید [۵۲ و ۵۳]. توجه به این مقدار، بازه مناسب برای θ در این مطالعه [۰/۸، ۰/۹] در نظر گرفته شد تا دامنه تغییرات آن با دقت بیشتری پوشش داده شود.

۲. ضریب α

ضریب α به عنوان یک پارامتر بدون بعد، در مطالعه جریان گذرا لوله‌های ویسکوالاستیک نقش دارد و همچنین مقدار آن به مقطع و قیدهای محوری لوله وابسته است. این ضریب برای هر نوع جریان مقداری ثابت دارد، اما ماهیت ویسکوالاستیک لوله‌ها، شامل قیدهای محوری و ویژگی‌های مقطع، می‌تواند منجر به مقادیر متفاوتی برای α شود [۵۲]. ضریب α در مقدار ترم ویسکوالاستیک روش کلویین-ویت موثر است. بر اساس مقایسه نتایج تجربی و عددی، بازه [۰/۸، ۰/۹] برای α تعیین گردید. این محدوده به محققان امکان می‌دهد تا تأثیر عوامل مختلف بر جریان در لوله‌های ویسکوالاستیک را به طور مؤثرتری بررسی کنند.

۳. ضریب خزش (J)

ضریب خزش (J) معکوس مدول یانگ است که مدول یانگ در مقاومت مصالح برابر نسبت تنش به کرنش است. همچنین یکی از پارامترهای اساسی در مدل کلویین-ویت برای توصیف رفتار مواد ویسکوالاستیک تحت بارگذاری زمانی است و به ویژگی‌های مکانیکی ماده وابستگی دارد. ضریب خزش همانند ضریب α در مقدار ترم ویسکوالاستیک روش کلویین-ویت موثر است مقدار این ضریب به جنس لوله ویسکوالاستیک و مدول یانگ آن بستگی دارد. بر اساس مراجع [۷، ۸، ۱۱، ۱۶، ۲۸، ۲۹، ۴۵، ۵۵-۶۹] معتبر،

جدول ۴ مقادیر ماکزیمم و مینیمم به همراه طول گام و تعداد حالات هر پارامتر

Table 4 Maximum and minimum values along with step length and number of states for each parameter

Parameters	min	max	Step length	Number of states
Factor θ	0/8	0/9	0/005	21
Factor α	0/1	0/9	0/01	81
Factor creep (J)	10^{-11}	10^{-8}	$4/995 \times 10^{-11}$	21
Re time (τ)	0/05	5	0/1010	50
Wave speed (a)	75/8	77/6	0/2	10
Nuber of element	1	10	1	10

۲-۴- بهینه سازی

برای پیدا کردن پارامترهای بهینه از روش الگوریتم بهینه سازی ژنتیک استفاده می شود. برای این کار ابتدا تابع هدف مطابق فرمول (۱۰) باید تعریف شود. RMSE جذر میانگین مربعات خطا است که در این رابطه H_m و H_p به ترتیب برابر مقدار افت هد تجربی و افت هد عددی در نقاط تعیین شده هستند. N هم برابر تعداد نقاط انتخاب شده است. پارامترهایی که باید بهینه شوند همان شش پارامتر بالا هستند که عبارت اند از ضریب θ ، ضریب α ، ضریب خزش (J)، زمان تاخیر (τ)، سرعت موج (a) و تعداد المان فنر و میراگر می باشد. یا به بیانی دیگر در فرایند بهینه سازی این شش پارامتر به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شدند. الگوریتم ژنتیک با هدف کمینه کردن RMSE بین افت هد تجربی و عددی، مقادیر بهینه این پارامترها را تعیین می کند. در بخش قبل دامنه تغییرات هر کدام از پارامترها به همراه طول گام آنها در جدول ۴ آورده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N [(H_p)_i - (H_m)_i]^2 \right]} \quad (10)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج

در بخش قبل پارامترهای فرمول کلونین-ویت همراه با مقدار آنها تعریف شد. در ادامه، باید مقدار بهینه هریک از این پارامترها برای دبی های ۱/۰۶ و ۲ لیتر بر ثانیه توسط الگوریتم بهینه سازی ژنتیک بدست آید و با توجه به مقادیر حاصل شده، تفسیر پارامترها انجام شود و نمودار مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی رسم شود. در ادامه کانتور سه بعدی مقادیر ضریب θ ، زمان تاخیر به همراه مقدار جذر مربعات خطا متناسب با آن ها رسم می شود. الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در این پژوهش شامل مراحل استاندارد تولید جمعیت اولیه، محاسبه تابع هدف برای هر کروموزوم، انتخاب والدین، تبادل ژنی و تولید فرزندان و جهش می باشد. در روند بهینه سازی از ۵۰ تا کروموزوم به عنوان جمعیت اولیه، ۲۰ تا کروموزوم برای نسل های تکاملی، تعداد نسل ها برابر ۱۵۰ و نرخ جهش برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است. همانطور که در ابتدای بخش قبل گفته شد، فرایند تست در دو مرحله از دبی صورت گرفت. جریان گذرای ۱/۰۶ به صفر لیتر بر ثانیه و ۲ به صفر لیتر بر ثانیه ارزیابی شد.

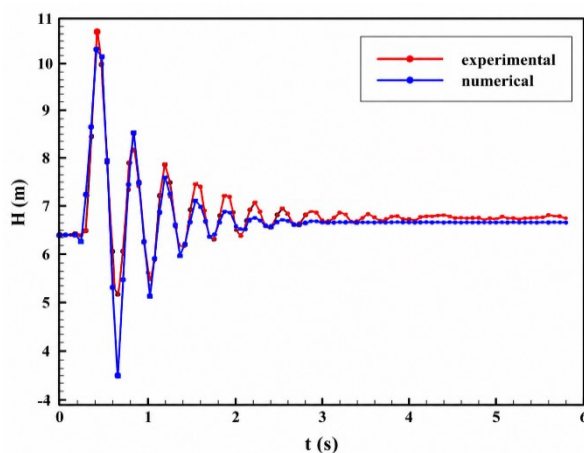
برای ارزیابی دبی ۱/۰۶ لیتر بر ثانیه کد نتایج عددی متلب با نتایج تجربی ستاپ آزمایشگاه دانشگاه نوشیروانی بابل مقایسه شد. مقادیر بهینه هریک از پارامترها در جدول ۵ نشان داده شده است. مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) با توجه به مقدارهای جدول ۴ برابر ۰/۲۳۲۰ می باشد.

جدول ۵ پارامترهای بهینه برای دبی ۱/۰۶ لیتر بر ثانیه

Table 5 Optimal parameters for flow rate 1.06 liters/second

Factor θ	Factor α	Factor creep (J)	Re time (τ)	Wave speed (a)	Nuber of element
0/8	0/9	10^{-8}	0/454	77/6	2

در شکل ۳ نمودار مقایسه نتایج عددی و تجربی برای مقادیر پارامترهای جدول ۵ آورده شده است.



شکل ۳ نمودار مقایسه نتایج تجربی و نتایج عددی در دبی ۱/۰۶ لیتر بر ثانیه

Fig. 3 Comparison chart of experimental results and numerical results at a flow rate of 1.06 liters per second

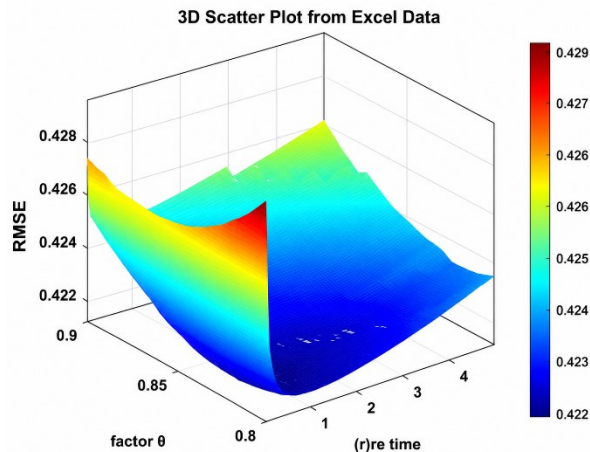
برای ارزیابی دبی ۲ لیتر بر ثانیه کد نتایج عددی متلب با نتایج تجربی ستاپ آزمایشگاه دانشگاه نوشیروانی بابل مقایسه شد. مقادیر بهینه هریک از پارامترها در جدول ۶ (الف) نشان داده شده است. مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) با توجه به مقدارهای جدول ۶ برابر ۰/۴۲۱۵ می باشد.

جدول ۶ پارامترهای بهینه برای دبی ۲ لیتر بر ثانیه

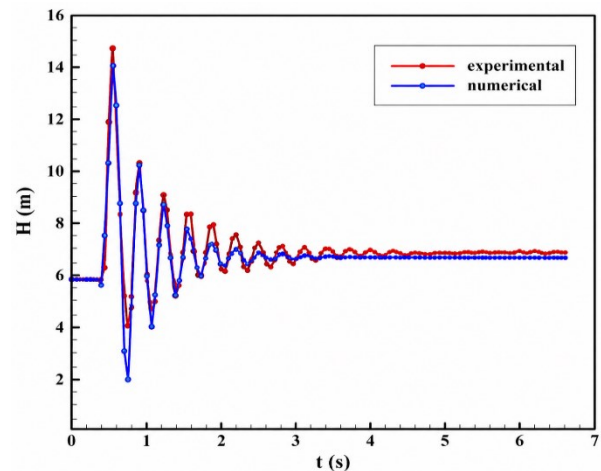
Table 6 Optimal parameters for flow rate 2 liters/second

Factor θ	Factor α	Factor creep (J)	Re time (τ)	Wave speed (a)	Nuber of element
0/825	0/9	10^{-8}	0/959	77/2	2

در شکل ۴ نمودار مقایسه نتایج عددی و تجربی برای مقادیر پارامترهای جدول ۶ آورده شده است.



شکل ۶ کانتور سه بعدی برای دبی ۲ لیتر بر ثانیه
Fig. 4(b) 3D contour for a flow rate of 2 liters/second



شکل ۴ نمودار مقایسه نتایج تجربی و نتایج عددی در دبی ۲ لیتر بر ثانیه
Fig. 4 Comparison chart of experimental results and numerical results at a flow rate of 2 liters per second

مطابق نمودار سه بعدی شکل‌های ۵ و ۶ که تغییرات پارامترهای زمان تاخیر، ضریب θ و مقدار جذر میانگین مربعات خطا است، نشان می‌دهد که هر دو دبی به نقطه بهینه برای هر دو مقدار پارامترهای زمان تاخیر و ضریب θ وجود دارد که مقدار جذر میانگین مربعات خطا متناسب با مقدار پارامترها کمترین مقدار را دارد. طبق این دو نمودار سه بعدی ابتدا اون چهار پارامتر دیگر مقادیر ثابت برایشان لحاظ شده و در ادامه تغییرات پارامترهای زمان تاخیر و ضریب θ متناسب با بازه و طول گام تعریف شده اعمال شد و مقدار RMSE متناظر با مقدار پارامترها در نمودار رسم شده‌است.

۲-۳- بحث

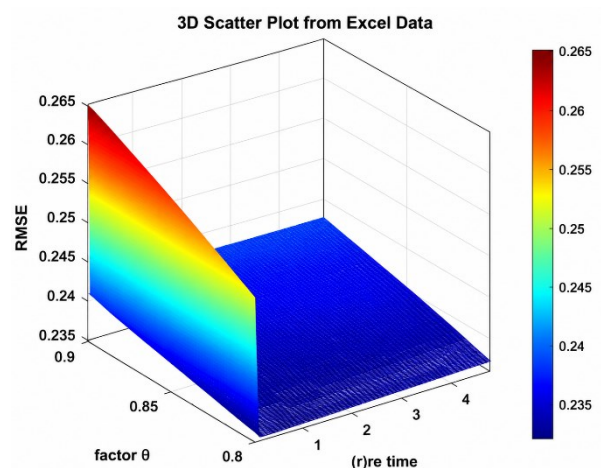
در قسمت قبل، مقادیر بهینه پارامترها با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک برای دبی‌های ۱/۰۶ و ۲ لیتر بر ثانیه تعیین شد. در این قسمت، نتایج بدست آمده از هر یک از پارامترها مورد بحث و تفسیر قرار می‌گیرد.

الف) ضریب θ

اولین پارامتر مورد بررسی ضریب θ است. با توجه به مقادیر RMSE ضرایب θ بدست آمده در نمودار شکل‌های ۷ و ۸ در حالت‌های مختلف و همین طور کانتور سه بعدی رسم شده در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب برای دبی‌های ۱/۰۶ و ۲ لیتر بر ثانیه می‌توان گفت که اختلاف RMSE ضرایب θ در بازه ۰/۸ تا ۰/۹ بسیار کم است و ممکن است برای شرایط مختلف، مقدار θ تغییر کند. با توجه به نمودارها و کانتورها به این نتیجه می‌توان رسید که با افزایش ضریب θ در بازه مشخص شده، مقدار RMSE، افزایش می‌یابد و نتایج عددی از تجربی دورتر می‌شود. طبق بیان بخش قبل مقدار θ بهینه برای مقایسه نتایج تجربی و نتایج عددی در دبی‌های

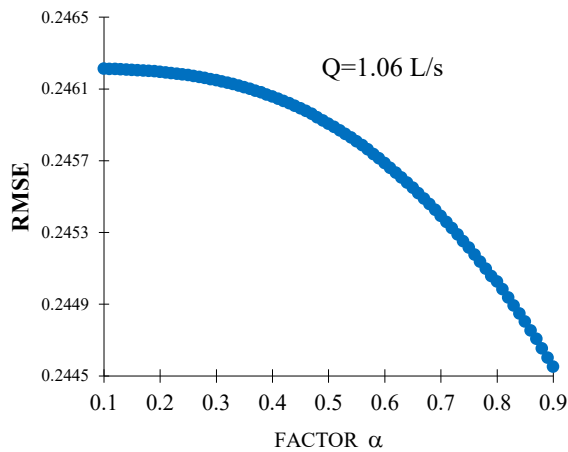
مطابق نمودار شکل‌های ۳ و ۴ مقدار افت هد جریان گذرا در زمان‌های مختلف برای هر دو دبی است که نشان می‌دهد بخاطر اصطکاک و خاصیت میرایی لوله‌های ویسکوالاستیک مقدار افت هد با گذشت زمان کاهش پیدا می‌کند و در نهایت بعد نوسان‌های پشت هم به مقدار ثابت می‌رسد. در حقیقت می‌توان از این نمودار فهمید که هرچه اصطکاک و خاصیت میرایی لوله‌های ویسکوالاستیک بیشتر باشد، مقدار پیک‌های افت هد کمتر و در آخر زودتر به مقدار ثابت افت هد خواهد رسید.

نمودار سه بعدی زمان تاخیر، ضریب θ و مقدار جذر میانگین مربعات خطا با بازه‌ها و طول گام‌های مشخص در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب برای دبی ۱/۰۶ و ۲ لیتر بر ثانیه رسم شده است.



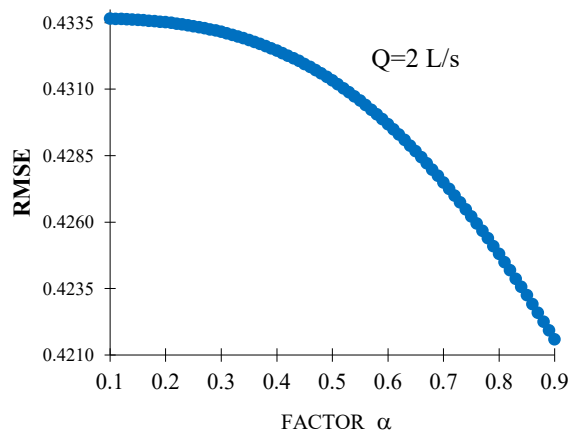
شکل ۵ کانتور سه بعدی برای دبی ۱/۰۶ لیتر بر ثانیه
Fig. 4(a) 3D contour for a flow rate of 1.06 liters/second

بهینه برای مقایسه نتایج تجربی و نتایج عددی در دبی‌های ۱/۰۶ و ۲ لیتر بر ثانیه با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقدار ۰/۹ برای هر دو حالت دبی بدست آمده بود.



شکل ۹ نمودار مقایسه مقدار میانگین RMSE ضریب α در حالت‌های مختلف برای دبی ۱/۰۶ لیتر بر ثانیه

Fig. 9 Comparison chart of the average RMSE value of the factor α in different cases for a flow rate of 1.06 liters per second.



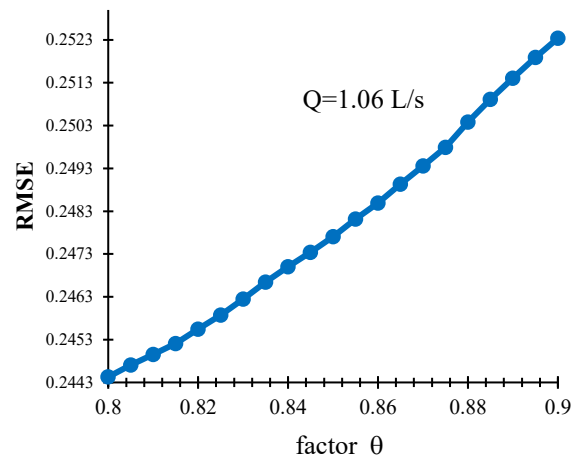
شکل ۱۰ نمودار مقایسه مقدار میانگین RMSE ضریب α در حالت‌های مختلف برای دبی ۲ لیتر بر ثانیه

Fig. 10 Comparison chart of the average RMSE value of the factor α in different cases for a flow rate of 2 liters per second.

ج) ضریب خزش J

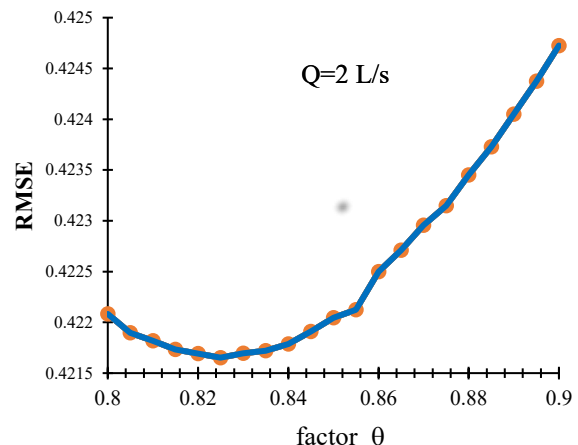
پارامتر سوم ضریب خزش است. با توجه به مقادیر بدست آمده این ضریب در حالت‌های مختلف در نمودار شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب برای دبی‌های ۱/۰۶ و ۲ لیتر بر ثانیه این نتیجه حاصل شد که هرچه قدر ضریب خزش بیشتر باشد، مقدار RMSE کمتر می‌شود و در نهایت نتایج عددی به نتایج تجربی نزدیک‌تر می‌شود، زیرا به دلیل اینکه ترم ویسکوالاستیک معادله جریان گذرا افزایش می‌یابد و باعث کاهش مقدار RMSE می‌گردد و باعث شدن نتایج عددی به نتایج تجربی می‌شود. مقدار ضریب خزش بهینه برای

۱/۰۶ و ۲ لیتر بر ثانیه با استفاده از الگوریتم ژنتیک به ترتیب ۰/۸ و ۰/۸۲۵ بدست آمده بود.



شکل ۷ نمودار مقایسه مقدار میانگین RMSE ضریب θ در حالت‌های مختلف برای دبی ۱/۰۶ لیتر بر ثانیه

Fig. 7 Comparison chart of the average RMSE value of the factor θ in different cases for a flow rate of 1.06 liters per second



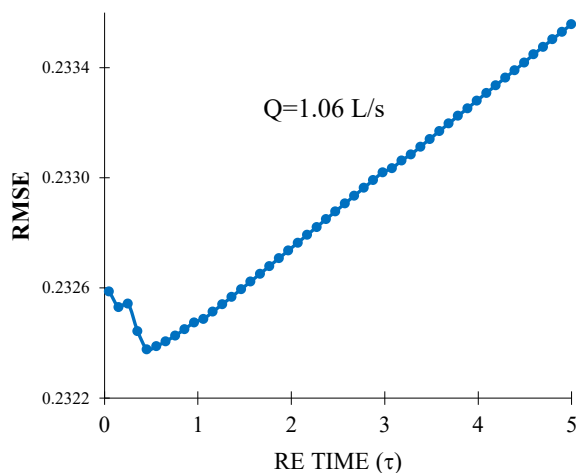
شکل ۸ نمودار مقایسه مقدار میانگین RMSE ضریب θ در حالت‌های مختلف برای دبی ۲ لیتر بر ثانیه

Fig. 8 Comparison chart of the average RMSE value of the factor θ in different cases for a flow rate of 2 liters per second

ب) ضریب α

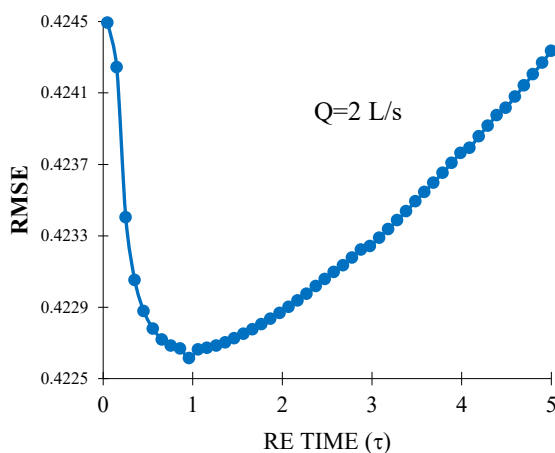
پارامتر دوم ضریب α است. با توجه به مقادیر بدست آمده حالت‌های مختلف این ضریب در نمودار شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب برای دبی‌های ۱/۰۶ و ۲ لیتر بر ثانیه، هرچه قدر مقدار ضریب α در بازه ۰/۱ تا ۰/۹ بیشتر باشد، مقدار RMSE کمتر و در نهایت نتایج عددی به نتایج تجربی نزدیک‌تر می‌شود، زیرا ضریب α رو فرمول کلوی-ویت تاثیر دارد و باعث می‌شود که ترم مقدار ویسکوالاستیک بیشتر شود و به همین خاطر درصد خطا کاهش پیدا می‌کند. مقدار ضریب α

گرفته شد می‌توان گفت که با افزایش دبی سیال، یک نقطه بهینه برای مقدار زمان تاخیر به وجود می‌آید که درصد خطا در آن کمترین مقدار است. یا عبارتی دیگر با افزایش دبی تاثیر ویسکوزیته نسبت داده شده به لوله در مدل کلویین-ویت بیشتر می‌شود و همین امر باعث افزایش تاثیر پارامتر زمان تاخیر در فرمول کلویین-ویت می‌شود و در نهایت نتایج عددی به نتایج تجربی نزدیک تر می‌شود. مقدار زمان تاخیر بدست آمده به وسیله الگوریتم ژنتیک برای دبی های ۱/۰۶ و ۲ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۰/۴۵۴ و ۰/۹۵۹ ثانیه بدست آمده بود.



شکل ۱۳ مقایسه مقدار میانگین RMSE زمان تاخیر در حالت‌های مختلف برای دبی ۱/۰۶ لیتر بر ثانیه

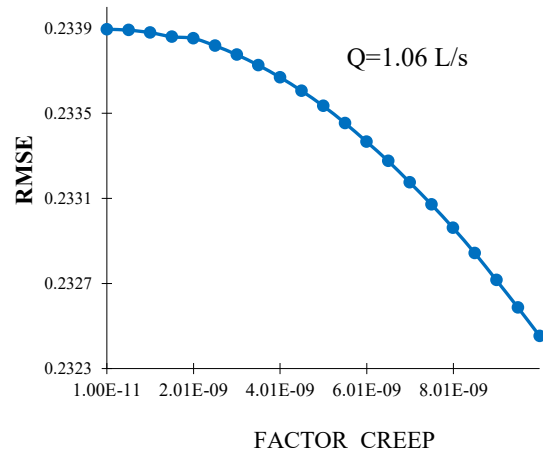
Fig. 13 Comparison of the average RMSE value of the re time in different modes for a flow rate of 1.06 liters/second



شکل ۱۴ مقایسه مقدار میانگین RMSE زمان تاخیر در حالت‌های مختلف برای دبی ۲ لیتر بر ثانیه

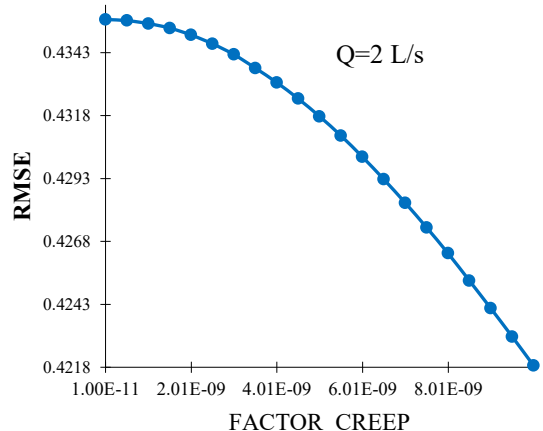
Fig. 14 Comparison of the average RMSE value of the re time in different modes for a flow rate of 2 liters/second

مقایسه نتایج تجربی و نتایج عددی در دبی‌های ۱/۰۶ و ۲ لیتر بر ثانیه با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقدار 10^{-8} برای هر دو حالت بدست آمده بود.



شکل ۱۱ مقایسه مقدار میانگین RMSE ضریب J در حالت‌های مختلف برای دبی ۱/۰۶ لیتر بر ثانیه

Fig. 11 Comparison of the average RMSE value of the factor J in different cases for a flow rate of 1.06 liters per second

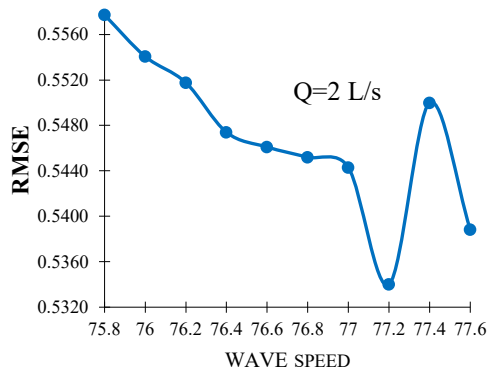


شکل ۱۲ مقایسه مقدار میانگین RMSE ضریب J در حالت‌های مختلف برای دبی ۲ لیتر بر ثانیه

Fig. 12 Comparison of the average RMSE value of the factor J in different cases for a flow rate of 2 liters per second

(د) زمان تاخیر τ

پارامتر چهارم زمان تاخیر است. با توجه به مقادیر RMSE نمودار شکل‌های ۱۳ و ۱۴ زمان‌های تاخیر بدست آمده در حالت‌های مختلف و همین‌طور کانتور سه بعدی رسم شده در شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان گفت که اختلاف RMSE در زمان‌های مختلف بسیار کم است و ممکن است برای شرایط مختلف، مقدار زمان‌های تاخیر تغییر کند. با نتیجه‌ای که از کانتور سه بعدی شکل‌های ۵ و ۶

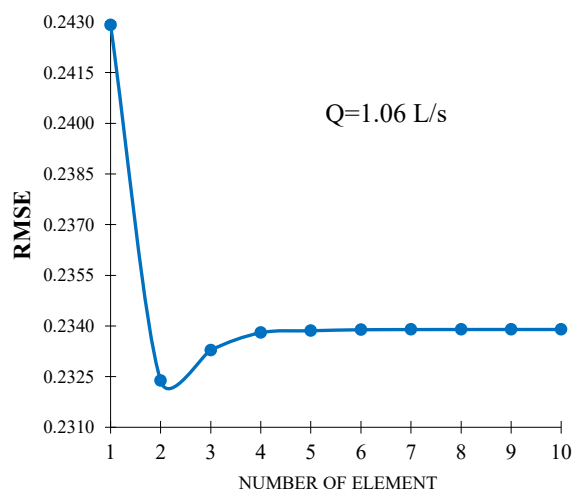


شکل ۱۶ مقایسه مقدار میانگین RMSE سرعت موج a در حالت های مختلف دبی ۲ لیتر بر ثانیه

Fig. 16 Comparison of the average RMSE value of wave speed a in different flow modes of 2 liters/second

ی) تعداد المان

پارامتر هفتم تعداد المان است. با توجه به مقادیر بدست آمده در تعداد المان های مختلف نمودار شکل های ۱۷ و ۱۸ برای هر دو دبی ۱/۰۶ و ۲ لیتر بر ثانیه این نتیجه حاصل شد که تعداد دو المان فنر و میراگر کمترین مقدار RMSE را دارد و نتایج عددی به نتایج تجربی نزدیک تر است. همچنین به این نتیجه رسید که تعداد المان یک فنر و میراگر، مقدار RMSE بیشتری نسبت به بقیه دارد و این تعداد کافی نیست. در ادامه با استفاده از مقدار RMSE های تعداد المان از سه تا بیشتر می توان نتیجه گرفت که با زیاد کردن تعداد المان، اختلاف نتایج عددی و نتایج تجربی تغییر نمی کند. مقدار تعداد المان بهینه برای مقایسه نتایج تجربی و نتایج عددی با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقدار دو المان بدست آمده بود.

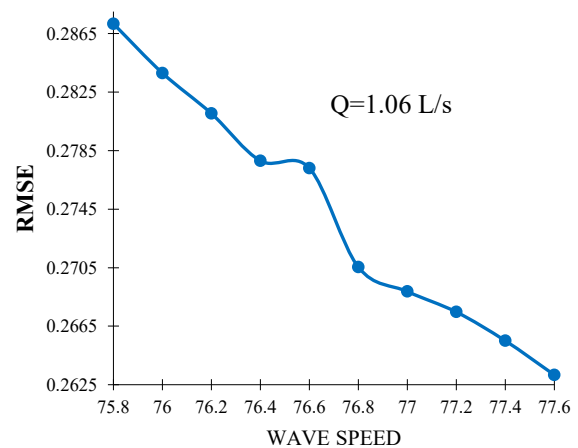


شکل ۱۷ مقایسه مقدار میانگین RMSE تعداد المان در حالت های مختلف برای دبی ۱/۰۶ لیتر بر ثانیه

Fig. 17 Comparison of the average RMSE value of the number of elements in different modes for a flow rate of 1.06 liters per second

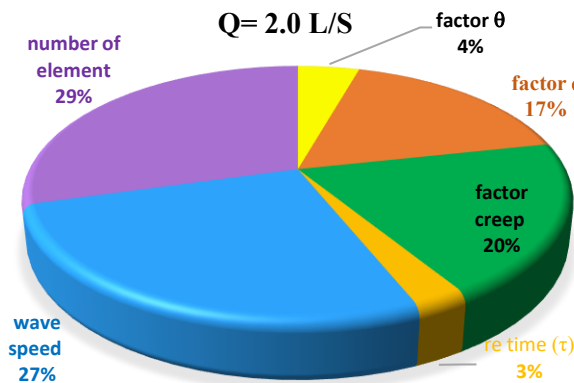
ه) سرعت موج a

پارامتر پنجم سرعت موج a است. همان طور که بیان شد، سرعت موج به جنس و اندازه لوله وابسته هست. همانطور که گفته شد برای بدست آوردن سرعت موج ممکن است یک مقدار ثابت با توجه به فرمول $a = 4L/T$ حاصل نشود و مقادیر مختلفی از سرعت موج نزدیک هم بدست آید. با این حال باید مقدار سرعت موج رو در یک بازه در نظر گرفت. همچنین برای هر دبی مقدار بازه سرعت موج مقدار ثابتی است اما برای هر دبی ممکن است مقدار سرعت موج نهایی برابر نباشد. با توجه به مقادیر بدست آمده از سرعت موج در هر حالت های مختلف شکل های ۱۵ و ۱۶ به این نتیجه رسید که سرعت موج در دبی های ۱/۰۶ و ۲ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۷۷/۶ و ۷۷/۲ متر بر ثانیه، RMSE کمترین مقدار را دارد و نتایج عددی به نتایج تجربی نزدیک تر است. مقدار سرعت موج بهینه برای مقایسه نتایج تجربی و نتایج عددی در دبی های ۱/۰۶ و ۲ لیتر بر ثانیه با استفاده از الگوریتم ژنتیک به ترتیب مقادیر ۷۷/۶ و ۷۷/۲ ثانیه بدست آمده بود. در نمودار دبی ۲ لیتر بر ثانیه مقدار سرعت موج بهینه ۷۷/۲ است و بخاطر همین در این مقدار به طور ناگهانی RMSE کم شد و نمودار پرش پیدا کرد. در حقیقت سرعت در این نقطه با مقدار سرعت موج کمتر و بیشتر از این مقدار خیلی اختلاف دارد و باعث پرش در نمودار شده است. یکی از نتایجی که از سرعت موج می توان رسید این است که مقدار سرعت موج بر تعداد نوسانات جریان جریان گذرا تاثیر می گذارد.



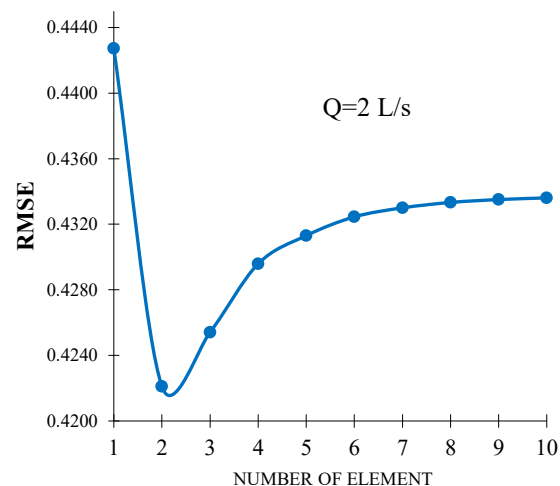
شکل ۱۵ مقایسه مقدار میانگین RMSE سرعت موج a در حالت های مختلف دبی ۱/۰۶ لیتر بر ثانیه

Fig. 15 Comparison of the average RMSE value of wave speed a in different flow modes of 1.06 liters/second



شکل ۲۰ نمودار دایره‌ای مقایسه بیشترین و کمترین مقدار RMSE هر پارامتر برای دبی ۲ لیتر بر ثانیه

Fig. 20 Pie chart comparing the highest and lowest RMSE values for each parameter for a flow rate of 2 liters/second.



شکل ۱۸ مقایسه مقدار میانگین RMSE تعداد المان در حالت‌های مختلف برای دبی ۲ لیتر بر ثانیه

Fig. 18 Comparison of the average RMSE value of the number of elements in different modes for a flow rate of 2 liters per second

با توجه نمودارهای دایره‌ای شکل‌های ۱۹ و ۲۰ سرعت موج و تعداد المان بیشترین اختلاف را در بین بقیه پارامترها دارند و با تغییر مقدار آن‌ها مقدار RMSE بیشتر از پارامترهای دیگر دچار تغییر می‌شود. این اختلافات در نمودارهای مقایسه مقدار میانگین RMSE هر کدام با وجود پرش در نمودار مشهود است.

با تعیین مقادیر بهینه پارامترها و تحلیل RMSE، کارایی الگوریتم ژنتیک در کالیبراسیون سریع و کم‌هزینه مدل، اثبات شد. همچنین، تحلیل کانتورهای سه‌بعدی نشان می‌دهد که ضرایب θ و زمان تأخیر، بیشترین تأثیر را بر دقت نتایج دارند؛ لذا تمرکز بر این دو پارامتر در پژوهش‌های آتی، پتانسیل بالایی برای بهبود عملکرد مدل‌های مشابه خواهد داشت.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جریان گذرا در لوله‌های پلاستیکی با استفاده از مدل «کلوین-ویت» شبیه‌سازی و با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شد. سپس، پارامترهای بهینه این مدل برای دبی‌های ۱.۰۶ و ۲ لیتر بر ثانیه با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک استخراج گردید. نتایج حاصل از مدل‌سازی جریان گذرا و کالیبراسیون پارامترها شامل موارد زیر است:

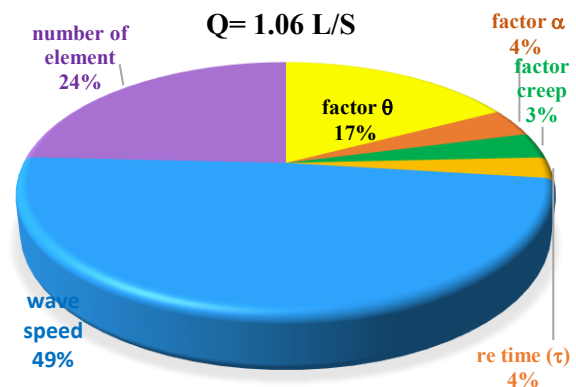
(۱) تحلیل‌ها نشان داد که با ضریب θ در بازه ۰.۸ تا ۰.۹، دارای نقطه بهینه می‌باشد.

(۲) افزایش مقدار ضریب α موجب بهبود دقت شبیه‌سازی و نزدیکی بیشتر نتایج عددی به داده‌های تجربی می‌شود.

(۳) با افزایش مقدار ضریب خزش (J) و تقویت ترم ویسکوالاستیک در معادلات کلوین-ویت، خطای مدل کاهش یافته و نتایج عددی به داده‌های تجربی همگرا تر می‌شوند.

(۴) پارامتر زمان تأخیر وابستگی مستقیمی به دبی دارد. با افزایش دبی از ۱.۰۶ به ۲ لیتر بر ثانیه، مقدار بهینه زمان تأخیر از ۰.۴۵۴ به

در ادامه نمودار دایره‌ای مقایسه اختلاف بیشترین و کمترین مقدار RMSE هر پارامتر در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ آورده شده است.



شکل ۱۹ نمودار دایره‌ای مقایسه بیشترین و کمترین مقدار RMSE هر پارامتر برای دبی ۱/۰۶ لیتر بر ثانیه

Fig. 19 Pie chart comparing the highest and lowest RMSE values for each parameter for a flow rate of 1.06 liters/second.

منابع

- [۱] Chamani, *habakeh Tozi'e Ab Shahri [Urban Water Distribution Network]*. 1379.
- [۲] riyahi, "Mechanism for Identification of Transient Flows in Pipelines Using the Transfer Method in the Frequency Domain," *Modarres*, vol. 18, p. 2, 2018.
- [۳] B. Brunone, S. Meniconi, C. Capponi, and M. Ferrante, "Leak-induced pressure decay during transients in viscoelastic pipes. Preliminary results," *Procedia Engineering*, vol. 119, pp. 243-252, 2015. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.882.
- [۴] S. Mohammadzade Negharchi and R. Shafaghat, "3D criteria to improve real-time pressure control in water distribution network system architecture," *Water Supply*, vol. 24, no. 8, pp. 2795-2816, 2024. doi: 10.2166/ws.2024.166.
- [۵] D. Damavandi, Zadeh, R., and Riasi, "Barrasi-ye Asar-e Looleh Polyethyleni Mowze'i dar System-e Enteghal-e Ab ba Khat-e Looleh Fooladi bar Roo-ye Padideh-ye Zarbeh-ye Ghouch," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 13, 2013. doi:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001104.
- [۶] E. Yao, G. Kember, and D. Hansen, "Water hammer analysis and parameter estimation in polymer pipes with weak strain-rate feedback," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 142, no. 8, p. 04016052, 2016. doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001104.
- [۷] D. Covas, I. Stoianov, J. F. Mano, H. Ramos, N. Graham, and C. Maksimovic, "The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part II—Model development, calibration and verification," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 43, no. 1, pp. 56-70, 2005. doi:10.1080/00221680509500111.
- [۸] A. K. Soares, D. I. Covas, and L. F. Reis, "Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 134, no. 9, pp. 1389-1394, 2008. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:9(1389).
- [۹] C. Landry, C. Nicolet, A. Bergant, A. Müller, and F. Avellan, "Modeling of unsteady friction and viscoelastic damping in piping systems," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2012, vol. 15, no. 5, p. 052030. doi: 10.1088/1755-1315/15/5/052030.
- [۱۰] A. K. Soares, D. I. Covas, and N. J. Carriço, "Transient vaporous cavitation in viscoelastic pipes," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 50, no. 2, pp. 228-235, 2012. doi: 10.1080/00221686.2012.669143.
- [۱۱] A. Keramat and A. Haghighi, "Straightforward transient-based approach for the creep function determination in viscoelastic pipes," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 140, no. 12, p. 04014058, 2014. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.00009.
- [۱۲] M. Ferrante and C. Capponi, "Viscoelastic models for the simulation of transients in polymeric pipes," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 55, no. 5, pp. 599-612, 2017. doi: 10.1080/00221686.2017.1354935.

۰.۹۵۹. ثانیه افزایش می‌یابد؛ این تغییر، ناشی از افزایش اثر ویسکوزیته در لوله است که منجر به بهبود انطباق نتایج می‌گردد.

(۵) سرعت موج بر اساس رابطه $a = 4L/T$ محاسبه شد. دقت در تعیین زمان سیکل (T) مستقیماً بر دقت سرعت موج و در نتیجه بازتولید تعداد نوسانات جریان گذرا تأثیرگذار است.

(۶) نتایج ارزیابی نشان داد که استفاده از یک المان فنر و میراگر با بیشترین میزان خطا همراه است. مدل با ۲ المان به کمترین مقدار RMSE دست یافت. همچنین افزایش تعداد المان‌ها به بیش از ۳ واحد، تأثیر معناداری بر بهبود نتایج عددی و کاهش RMSE نداشت.

پیشنهاد پژوهشی: مطابق با تحلیل کانتورهای سه‌بعدی، پارامترهای θ و زمان تأخیر دارای حساسیت بالایی هستند؛ زیرا مقادیر RMSE در دامنه‌های مختلف برای این دو پارامتر به یکدیگر نزدیک است و پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تمرکز بیشتری بر تحلیل رفتار آن‌ها معطوف گردد.

اظهارنامه استفاده از هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرآیند آماده سازی مقاله: در این مقاله از هوش مصنوعی استفاده نشده است.

تقدیر و تشکر: تقدیر و تشکر از آزمایشگاه انرژی‌های دریاییپایه دانشگاه نوشیروانی بابل و همین دکتر شفقت سرپرست آزمایشگاه و دکتر محمدزاده سرپرست واحد سیستم‌های انتقال آب آزمایشگاه

تامین مالی: این پژوهش هیچ گونه گرنت مشخصی از آژانس‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

نقش و مسئولیت نویسندگان: محمدرضا گوران (نویسنده اول): ایده‌پردازی پژوهش، انجام مطالعات، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، نگارش اولیه مقاله و تهیه نسخه نهایی بر پایه پژوهش انجام شده در پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دکتر شفقت (نویسنده مسئول): استاد راهنمای پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول، هدایت و نظارت علمی بر پژوهش، مشارکت در تدوین روش تحقیق، بررسی و اصلاح علمی مقاله و تأیید نسخه نهایی. دکتر محمدزاده: استاد مشاور پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول، مشارکت در هدایت علمی پژوهش، ارائه مشاوره‌های تخصصی در طول انجام تحقیق، بررسی نتایج و بازبینی علمی مقاله.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: هر سه نویسنده منافع یکسانی از این مقاله ندارند.

- [۲۵] N. Vafaei-Rad, M. S. Bejestan, M. Rahmanshahi, and M. Bahrami-Yarhamadi, "A comprehensive evaluation of transient-test-based approaches for determining creep function in heterogeneous polymer pipes," *Applied Water Science*, 2026.
- [۲۶] A. Keramat and B. W. Karney, "Significance of Creep Behavior of the Pipe Wall on Optimal Sizing of an Air Chamber in Long-Distance Viscoelastic Pipes," *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, vol. 17, no. 1, p. 04025082, 2026. doi: 10.1061/JPSEA2.PSENG-1800.
- [۲۷] A. Bergant, A. S. Tijsseling, J. P. Vitkovský, D. I. Covas, A. R. Simpson, and M. F. Lambert, "Parameters affecting water-hammer wave attenuation, shape and timing—Part 1: Mathematical tools," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 46, no. 3, pp. 373-381, 2008. doi: 10.3826/jhr.2008.2848.
- [۲۸] L. Hadj-Taïeb and E. Hadj-Taïeb, "Numerical simulation of transient flows in viscoelastic pipes with vapour cavitation," *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 29, no. 2, pp. 206-213, ۲۰۰۹, doi: 10.1080/02286203.2009.11442526.
- [۲۹] A. Keramat, A. S. Tijsseling, and A. Ahmadi, "Investigation of transient cavitating flow in viscoelastic pipes," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2010, vol. 12, no. 1, p. 012081. doi: 10.1088/1755-1315/12/1/012081.
- [۳۰] S. Meniconi, B. Brunone, M. Ferrante, and C. Massari, "Energy dissipation and pressure decay during transients in viscoelastic pipes with an in-line valve," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 45, pp. 235-249, 2014. doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2013.12.013.
- [۳۱] S. Evangelista, A. Leopardi, R. Pignatelli, and G. de Marinis, "Hydraulic transients in viscoelastic branched pipelines," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 141, no. 8, p. 04015016, 2015. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001030.
- [۳۲] A. Triki, "Water-hammer control in pressurized-pipe flow using a branched polymeric penstock," *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, vol. 8, no. 4, p. 04017024, 2017. doi: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000277.
- [۳۳] J. Gong, M. L. Stephens, and M. F. Lambert, "Analysis of the Frequency-Dependent Attenuation of Transient Pressure Waves in Plastic Pipes:(077)," in *WDSA/CCWI Joint Conference Proceedings*, ۲۰۱۸, vol. 1.
- [۳۴] J. Rahimi Firuz, S. Sabagh Yazdi, and A. Keramat, "Numerical methods of visco-elastic segments on water hammer pressures," *Numerical Methods in Civil Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 49-57, 2020.
- [۳۵] X. Wang, J. Lin, M. S. Ghidaoui, S. Meniconi, and B. Brunone, "Estimating viscoelasticity of pipes with unknown leaks," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 143, p. 106821, 2020. doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106821.
- [۳۶] H. K. Aliabadi, A. Ahmadi, and A. Keramat, "Frequency response of water hammer with fluid-structure interaction in a viscoelastic pipe," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 144, p. 106848, 2020.
- [۱۳] E. Wahba, "On the two-dimensional characteristics of laminar fluid transients in viscoelastic pipes," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 68, pp. 113-124, 2017. doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2016.10.012.
- [۱۴] K. Urbanowicz and M. Firkowski, "Extended Bubble Cavitation Model to predict water hammer in viscoelastic pipelines," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1101, no. 1: IOP Publishing, p. 012046. doi:10.1088/1742-6596/1101/1/012046.
- [۱۵] M. A. Guidara, L. H. Taieb, C. Schmitt, E. H. Taieb, and Z. Azari, "Investigation of viscoelastic effects on transient flow in a relatively long PE100 pipe," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 80, pp. 370-389, 2018. doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2018.04.008.
- [۱۶] M. Fathi-Moghadam and S. Kiani, "Simulation of transient flow in viscoelastic pipe networks," *Journal of Hydraulic Research*, ۲۰۲۰, .
- [۱۷] R. Merrett and Z. Pan, "Validation of Fast Transient Flow in Viscoelastic Piping," in *PSIG Annual Meeting*, 2020: PSIG, pp. PSIG-2009 doi: 10.1080/00221686.2019.1581669.
- [۱۸] A. Chegnizadeh and M. J. Bahmani, "Modeling and analysis of simultaneous effects of watter hammer and cavitation impact on pipe," *Journal of Hydraulics*, vol. 17, no. 2, pp. 1-19, 2022. doi: 10.30482/jhyd.2021.291024.1535.
- [۱۹] S. M. Negharchi and R. Shafaghat, "The numerical development of MOC for analyzing the inclined pipelines using the experimental network of Babol Noshirvani University as a case study," *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, vol. 70, no. 5, pp. 741-756, 2021. doi:10.2166/aqua.2021.002.
- [۲۰] S. M. Negharchi and R. Shafaghat, "Evaluation of service pressure regulation strategy on the performance of a rural water network based on pulse demand; using the method of characteristics," *Water Supply*, vol. 22, no. 3, pp. 3204-3223, 2022. doi: 10.2166/ws.2021.407.
- [۲۱] J. Javadi Orte Cheshme, A. Ahmadi, and A. Keramat, "Modeling of nonlinear viscoelastic creep of a polyethylene pipeline during water hammer," *Urban Water Journal*, vol. 19, no. 4, pp. 336-347, 2022. doi: 10.1080/1573062X.2021.2008984.
- [۲۲] M. Mousavifard, F. Poursmaeili, and H. Shamloo, "Development of backward transient analysis in visco-elastic pressurized pipes," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 60, no. 3, pp. 423-433, 2022. doi: 10.1080/00221686.2021.2001585.
- [۲۳] D. M. Andrade, F. B. de Freitas Rachid, and A. S. Tijsseling, "Fluid transients in viscoelastic pipes via an internal variable constitutive theory," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 114, pp. 846-869, 2023. doi: 10.1016/j.apm.2022.10.024.
- [۲۴] G. Pezzinga, "MOC-Z Model of Transient Cavitating Flow in Viscoelastic Pipe," *Water*, vol. 16, no. 11, p. 1610, 2024. doi: 10.3390/w16111610.

- transient flow analysis," *Modelling*, vol. 4, no. 2, pp. 283-295, 2023.
doi: 10.3390/modelling4020016.
- [۴۹] Q. Sun, X. Wang, Y. Wu, Y. Xu, and Z. Wang, "Sensitivity of creep parameters to pressure fluctuation of transient flow in viscoelastic pipes," *Journal of Hydroinformatics*, vol. 26, no. 7, pp. 1753-1770, 2024.
doi: 10.2166/hydro.2024.116.
- [۵۰] M. Azizpour, E. Sharififard, A. Haghighi, and J. Ahadiyan, "Optimization of creep function parameters of viscoelastic pipelines based on transient pressure signal," *Journal of Hydraulic Structures*, vol. 10, no. 4, pp. 97-114, 2024.
doi: 10.22055/jhs.2024.47401.1309.
- [۵۱] M. Hajirostam Hendi, R. Shafaghat, M. Gooran Orimi, and S. Mohammadzade Negharchi, "Experimental and regression-based correction for velocity and temperature effects on friction head loss in polyethylene pipes: case study," *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, vol. 74, no. 8, pp. 493-513, 2025.
doi: 10.2166/aqua.2025.296.
- [۵۲] F. Kiani, F. Moghadam, Fathi, and Haghighi, "Numerical modeling of transient flow in viscoelastic water distribution networks," *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 61–75, 2018. (In Persian).
- [۵۳] M. Mohammadi and F. Moghadam, "Analysis of rapid transient flow in pipelines using an unsteady friction model," *Journal of Water and Soil Science*, vol. 27, no. 2, pp. 157–169, 2017. (In Persian).
- [۵۴] F. Moghadam, H. Pour, and Kiani, "Evaluation of unsteady friction losses in transient flow," *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 1–13, 2017. (In Persian)
- [۵۵] M. H. Chaudhry, "Applied hydraulic transients," 1979.
- [۵۶] C. Di Nucci, M. Petrilli, and A. Russo Spena, "Unsteady friction and visco-elasticity in pipe fluid transients," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 49, no. 3, pp. 398-401, 2011.
doi: 10.1080/00221686.2011.568203.
- [۵۷] C. Apollonio, D. Covas, G. de Marinis, A. Leopardi, and H. Ramos, "Creep functions for transients in HDPE pipes," *Urban Water Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 160-166, 2014.
doi: 10.1080/1573062X.2012.758.
- [۵۸] B. Pan, H. Duan, S. Meniconi, K. Urbanowicz, T. Che, and B. Brunone, "Multistage frequency-domain transient-based method for the analysis of viscoelastic parameters of plastic pipes," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 146, no. 3, p. 04019068, 2020.
doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001700.
- [۵۹] G. Bertaglia, M. Ioriatti, A. Valiani, M. Dumbser, and V. Caleffi, "Numerical methods for hydraulic transients in visco-elastic pipes," *Journal of fluids and structures*, vol. 81, pp. 230-254, 2018.
doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2018.05.004.
- [۶۰] M. Kubrak, A. Malesińska, A. Kodura, K. Urbanowicz, and M. Stosiak, "Hydraulic transients in viscoelastic pipeline system with sudden cross-section changes," *Energies*, vol. 14, no. 14, p. 4071, 2021.
doi: 10.3390/en14144071.
- doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106848.
- [۳۷] M. Mousavifard, "Turbulence parameters during transient cavitation flow in viscoelastic pipe," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 148, no. 4, p. 04022004, 2022.
doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001973.
- [۳۸] K. Wu, Y. Feng, Y. Xu, H. Liang, and G. Liu, "Energy analysis of a quasi-two-dimensional friction model for simulation of transient flows in viscoelastic pipes," *Water*, vol. 14, no. 20, p. 3258, 2022.
doi: 10.3390/w14203258.
- [۳۹] Y. Zhang *et al.*, "Transient wave-leak interaction analysis for improved leak detection in viscoelastic pipelines," *Measurement*, vol. 208, p. 112442, 2023.
doi: 10.1016/j.measurement.2023.112442.
- [۴۰] Y. Xu, S. Zhang, L. Zhou, H. Ning, and K. Wu, "Dynamic Behavior and Mechanism of Transient Fluid-Structure Interaction in Viscoelastic Pipes Based on Energy Analysis," *Water*, vol. 16, no. 11, p. 1468, 2024.
doi: 10.3390/w16111468.
- [۴۱] T. Bahrar, S. Hassan, and E.-c. M. Elhoussine, "Impact of Plastic Material on Mitigating a Waterhammer in a Pressurized pipe," in *E3S Web of Conferences*, 202 , vol. 680: EDP Sciences, p. 00039 .
doi: 10.1051/e3sconf/202568000039.
- [۴۲] T. Bahrar, H. Samri, and M. Ech-chhibat, "Analysis of Interaction Fluid Structure and Thermomechanical Properties of a Polymer Pipe on Water Hammer," *International Review of Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 8 .p. 395, 2025.
doi: 10.15866/ireme.v19i8.27018.
- [۴۳] A. Bergant, Q. Hou, A. Keramat, and A. S. Tijsseling, "Experimental and numerical analysis of water hammer in a large-scale PVC pipeline apparatus," 2011.
- [۴۴] G. Pezzinga, "Evaluation of time evolution of mechanical parameters of polymeric pipes by unsteady flow runs," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 140, no. 12, p. 04014057, 2014.
doi: 10.1061/(ASCE)HY.19437900.0000925.
- [۴۵] N. J. Carriço, A. K. Soares, and D. I. Covas, "Uncertainties of inverse transient modelling with unsteady friction and pipe-wall viscoelasticity," *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, vol. 65, no. 4, pp. 342-353, 2016.
doi: 10.2166/aqua.2016.075.
- [۴۶] J. Javadi Orte Cheshme, A. Ahmadi, A. Keramat, and A. S. Arniazi, "Sensitivity of creep coefficients to the fundamental water hammer period in viscoelastic pipes," *Urban Water Journal*, vol. 18, no. 3, pp. 183-194, 2021.
doi: 10.1080/1573062X.2021.1877738.
- [۴۷] Hazeri, A., Ghobadian, and Heidari, "Effect of Pipe Viscoelastic Properties on the Optimal Design of Pressurized Irrigation Networks under Water Hammer Conditions (Case Study: Esmailabad Pressurized Irrigation Network, Lorestan)," *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, vol. 16, no. 3, pp. 580–595, 2022. (in persian).
- [۴۸] G. Pezzinga, "On the characterization of viscoelastic parameters of polymeric pipes for

- [۶۱] X. Duan, J. Zhu, X. Li, and X. Tang, "Comprehensive application analyses of elastic models and viscoelastic models in transient flows in polymeric pipelines," *Journal of Hydroinformatics*, vol. 24, no. 5, pp. 1020-1052, 2022.
doi: 10.2166/hydro.2022.039.
- [۶۲] G. Pezzinga, B. Brunone, and S. Meniconi, "Relevance of pipe period on Kelvin-Voigt viscoelastic parameters: 1D and 2D inverse transient analysis," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 142, no. 12, p. 04016063, 2016.
doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001216.
- [۶۳] Q. Sun, Z. Zhang, Y. Wu, Y. Xu, and H. Liang, "Numerical analysis of transient pressure damping in viscoelastic pipes at different water temperatures," *Materials*, vol. 15, no. 14, p. 4904, 2022.
doi: 10.3390/ma15144904.
- [۶۴] S. Meniconi, B. Brunone, and M. Ferrante, "Water-hammer pressure waves interaction at cross-section changes in series in viscoelastic pipes," *Journal of fluids and structures*, vol. 33, pp. 44-58, 2012.
doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2012.05.007.
- [۶۵] I. D. Moore and F. Hu, "Linear viscoelastic modelling of profiled high density polyethylene pipe," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 395-407, 1996.
doi: 10.1139/196-044.
- [۶۶] M. Ferrante and C. Capponi, "Calibration of viscoelastic parameters by means of transients in a branched water pipeline system," *Urban Water Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 9-15, 2018.
doi: 10.1080/1573062X.2017.1363254.
- [۶۷] D. Covas, I. Stoianov, H. Ramos, N. Graham, Č. Maksimović, and D. Butler, "Water hammer in pressurized polyethylene pipes: conceptual model and experimental analysis," *Urban Water Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 177-197, 2004.
doi: 10.1080/15730620412331289977.
- [۶۸] A. Keramat, A. Tijsseling, Q. Hou, and A. Ahmadi, "Fluid-structure interaction with pipe-wall viscoelasticity during water hammer," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 28, pp. 434-455, 2012.
doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2011.11.001.
- [۶۹] J. Gong, A. Zecchin, M. Lambert, and A. Simpson, "Study on the frequency response function of viscoelastic pipelines using a multi-element Kevin-Voigt model," *Procedia Engineering*, vol. 119, pp. 226-234, 2015.
doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.880.
- [۷۰] G. Pezzinga, "Unsteady flow in hydraulic networks with polymeric additional pipe," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 128, no. 2, pp. 238-244, 2002.
doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:2(238).
- [۷۱] M. Ferrante, "Transients in a series of two polymeric pipes of different materials," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 59, no. 5, pp. 810-819, 2021. doi:10.1080/00221686.2020.1844811.