کاربرد کدنویسی و شبیه‌سازی عددی در تعیین ضریب تخلیه رابطه کلاسیک روزنه نشت از لوله برای جریان‌های غیرماندگار میرا

کامران محمدی (نویسنده مسئول)[1]

[1] استادیار گروه برنامه‌ریزی و نظارت پژوهشی، معاونت پژوهش و فن‌آوری، دانشگاه رازی، کرمانشاه k_mohammadi@razi.ac.ir

چکیده

زبان‌های مختلف برنامه‌نویسی از مهمترین ابزارهای مهندسین جهت انجام محاسبات نرم و تحلیل پدیده‌های فیزیکی می‌باشد. از طرفی با گذشت زمان، خطوط لوله انتقال آب دچار فرسودگی و در نتیجه نشت سیال از آن می‌گردد و از آنجایی که عموماً جریان در آنها از نوع غیرماندگار بوده، تعیین میزان نشت از روزنه در حضور جریان‌های میرا اهمیت خود را نشان می‌دهد. در این میان میزان نشت آب کاملا به ضریب تخلیه روزنه بستگی دارد و تخمین آن ضرورتی اجتناب ناپذیر است. بدین منظور بر مبنای روابط هیدرولیکی موجود ابتدا مدلی کامپیوتری به کمک زبان برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک تهیه و سپس جریان‌های غیرماندگار سریع در حضور نشت مورد شبیه‌سازی عددی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی به کمک روش تحلیل معکوس جریان میرا با نتایج آزمایشگاهی ثبت شده مقایسه شد تا بهترین برازش را با هم دارا باشند. در این حالت ضریب تخلیه روزنه (C_d) در رابطه کلاسیک توریچلی کالیبره و تخمین زده شد. نتایج نشان داد روزنه‌های نشت با قطر بیشتر (۱۰ میلیمتر) ضریب تخلیه نسبتاً بزرگ‌تری نسبت به روزنه‌های با قطر کمتر (۴ میلیمتر) دارند. زمان استهلاک موج فشاری با افزایش قطر روزنه به شکل ملموسی کاهش می‌یابد. همچنین مدل کدنویسی شده توانایی کاملا مناسبی در شبیه‌سازی موج فشاری جریان گذرا در حضور نشت دارد که این موضوع حاکی از تخمین صحیح پارامتر موثر ضریب تخلیه روزنه نشت (C_d) است.

واژه‌های کلیدی

جریان‌های میرا، ضریب تخلیه روزنه نشت، مدل کدنویسی عددی، ویژوال بیسیک

۱. مقدمه

تا کنون زبان‌ها و محیط‌های برنامه‌نویسی گوناگونی از جمله C++ ، VB، MATLAB، Fortran و ... در اختیار مهندسان به منظور انجام کدنویسی‌ها و تحلیل‌های کامپیوتری و عددی قرار گرفته است. طی این نوع از محاسبات مهندسان معمولاً به شبیه‌سازی و تحلیل پدیده‌ای فیزیک به کمک انجام محاسبات مربوطه و حل عددی و یا تحلیلی روابط حاکم بر آن پدیده می‌پردازند. همچنین برخی تحلیل‌ها بدون استفاده از ابزارهای مختلف کدنویسی و انجام محاسبات نرم عملا به دلیل پیچیدگی و محاسبات سنگین غیرممکن خواهند بود.

هیدرولیک یکی از پرکاربردترین این علوم جهت کاربرد کدنویسی کامپیوتری به منظور تحلیل روابط حاکم و پدیده‌های مرتبط با آن است. وجود نرم‌افزارهای تجاری گوناگون در این زمینه گواهی بر مسئله مذکور می‌باشد. انتقال آب از طریق خطوط لوله و نیاز بشر به تامین و انتقال آب، یکی از مواردی است که مورد توجه مهندسان هیدرولیک بوده است. خطوط لوله انتقال آب از جنس‌های مختلفی ساخته می‌شوند که هر کدام از این مواد دارای خواص فیزیکی و شیمیایی مختلفی هستند اما وجه مشترک تمامی آنها این است که به تناسب جنس لوله، شرایط اجرا، محیط اطراف، چگونگی بهره‌برداری و ... پس از مدتی دچار فرسودگی و در نتیجه شکستگی و نشت می‌شوند. از سوی دیگر به دلیل نوسانات موجود در ایستگاه‌های پمپاژ، خاموش و روشن شدن پمپ‌ها، عملکرد شیرآلات هیدرومکانیکال و ... ، ماهیت جریان در اغلب خطوط انتقال سیالات غیرماندگار می‌باشد. جریان‌ها غیرماندگار سریع از آنجایی که اختلاف فشارهای شدیدی را در سیستم ایجاد می‌نمایند از مهمترین انواع جریان‌های غیرماندگار می‌باشند. بنابراین تحلیل خصوصیات نشت از خط لوله در حالت وجود جریان‌های غیرماندگار سریع دارای اهمیت ویژه‌ای خواهد بود. از مهمترین خصوصیات نشت، مقدار آب خروجی از محل نشت و یا همان تلفات آب است که وجود جریان‌های میرای سریع موجب تشدید پدیده نشت و هدر رفت آب می‌شوند. یکی از پارامترهای اصلی تاثیرگذار بر روی دبی نشت، ضریب دبی روزنه نشت است که میزان توانایی روزنه در انتقال و خروج آب از خود را نشان می‌دهد. لذا تعیین مقدار ضریب دبی روزنه نشت یکی از موارد مهم در محاسبه مقدار نشت از خط لوله خواهد بود.

ژوکوفسکی در سال ۱۸۹۸ اولین شخصی بود که نشان داد بالا رفتن فشار در مسیر خطوط لوله انتقال سیالات در نتیجه تغییر سرعت و جرم سیال است [۸]. محمدی و فتحی‌مقدم [۱] با تهیه مدلی کامپیوتری و کدنویسی شده، جریان میرای سریع در خطوط لوله را که توسط مدل اصطکاکی غیرماندگار شبیه‌سازی شده بود، تحلیل نمودند. آزمایشات و شبیه‌سازی عددی انجام شده نشان داد امواج فشاری آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده توسط مدل اصطکاکی غیرماندگار به ترتیب روند میرایی سریع‌تری داشتند. رحمانشاهی و همکاران [۲] با توسعه مدلی عددی، با کمک تکنیک تحلیل معکوس جریان میرا به نشت‌یابی در خطوط لوله دارای خاصیت ویسکوالاستیک پرداختند. نتایج مشخص نمود در مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با نتایج مدل هیدرولیکی کدنویسی شده، با اضافه کردن اثرات ویسکوالاستیک دیواره لوله، مدل شبیه‌ساز کامپیوتری، فشار گذرا را با دقت خوبی توصیف می‌نماید. میرزایی و همکاران [۳] نشت‌یابی و مقایسه آزمایشگاهی و تئوریک مشخصات جریان گذرا در خطوط لوله انتقال پلی‌اتیلن را بررسی نمودند. این مطالعات عدم دقت کافی روابط تئوریک ارائه شده برای سرعت موج فشاری را در لوله‌های پلی‌اتیلن نشان داد. اکبری و همکاران [۴] تشخیص نشت در خطوط انتقال پلی‌اتیلن با استفاده از بازتاب موج فشاری جریان گذرا را مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق نشان داد نتایج حاصل از مکان‌یابی نشان می‌دهد که استفاده از روابط تئوری درصد خطای نسبی بیشتری نسبت به استفاده از سرعت متوسط موج فشاری به دست آمده از آزمایش دارد. رستمی و درویشی [۵] ترکیب روش حل معکوس و الگوریتم فراکاوشی برای محاسبه مقدار و موقعیت نشت در شبکه‌های توزیع آب مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که این روش موقعیت و مقدار نشت را با دقت بالایی حتی در حالتی که دبی نشت کم باشد، تعیین و محاسبه می‌کند. در صورتی که در اندازهگیری فشار گره‌ها خطا وجود داشته باشد، با افزایش گره‌های تابع هدف موقعیت و مقدار نشت با دقت خوبی محاسبه می‌شود.

کواس و همکاران [۹] با انجام تحقیقات آزمایشگاهی، با استفاده از روش آنالیز معکوس جریان میرا، نشت‌ها و ترکیدگی‌ها را برای حالت تغییرات قطر و شاخه‌های لوله بررسی نمودند. حقیقی و راموس [۱۰] به کمک روش تحلیل معکوس جریان میرا و انتخاب روش بهینه‌سازی CFO در خطوط لوله، تحلیل هیدرولیکی و عددی جریان و سپس نشت‌یابی را به انجام رساندند. فتحی‌مقدم و همکاران [۱۱] با تهیه مدلی عددی کدنویسی شده، دقت روش تفاضل‌های محدود صریح را به منظور تحلیل هیدرولیکی جریان‌های گذرا در سامانه انتقال آب در نیروگاه‌های برقابی بررسی کردند که نتایج این تحقیق نشان از دقت مناسب روش انتخاب شده بود. لیو و یو [۱۲] ضمن تقسیم نمودن دبی و نشت به شکل یکسان در طول لوله‌ها با تهیه مدلی کامپیوتری آنها را تحلیل نمودند. آنها نشان دادند مدل ارائه شده از

مدل‌های عددی قبل به خصوص در مواردی که مقدار نشت به فشار حساس است، نتایج واقعی‌تری را به همراه دارد. ون‌زیل و همکاران [۱۳] معادله کلاسیک روزنه نشت را که توسط Toricelli ارائه شده است، برای حالت‌های نشت و نفوذ اصلاح نمود. در رابطه اصلاحی، تابع علامت به منظور تعیین جهت جریان عبوری از روزنه قرار داده شده است که اگر هد داخل لوله از بیرون بشتر باشد، نشت رخ داده و در صورتی که کمتر باشد، نفوذ رخ می‌دهد. آویلا و همکاران [۱۴] مدیریت نشت و کارایی سیستم خط لوله را بررسی نموده و تاثیر آن بر بهبود شاخص‌های بهره‌وری را مورد مطالعه قرار دادند.

بنابراین با توجه به موارد مطروحه، در این تحقیق ابتدا مدلی کامپیوتری به زبان ویژوال بیسیک (VB) کدنویسی شد که قابلیت تحلیل معادلات دیفرانسیل اساسی حرکت سیالات در مجاری بسته به صورت غیرماندگار را دارا می‌باشد. این مدل همچنین توانایی شبیه‌سازی نشت در خط لوله برای حالت وجود جریان میرای سریع و دیگر حالات جریان را به صورت یک بعدی دارد. در ادامه با استفاده از روش آنالیز معکوس جریان میرا، پارامترهای مجهول سیستم و به خصوص ضرایب تخلیه روزنه نشت به گونه‌ای تخمین زده شد که امواج فشاری شبیه‌سازی شده با امواج فشاری ثبت شده از داده‌های آزمایشگاهی کمترین خطا و بهترین برازش را داشته باشد.

۲. مواد و روش‌ها

به منظور تایید کارآمدی مدل شبیه‌ساز عددی کدنویسی شده در این تحقیق، از داده‌های آزمایشگاهی محمدی [۶] استفاده شده است. مدل آزمایشگاهی از یک مخزن، لوله انعطاف‌پذیر پلی‌اتیلن و شیر قطع و وصل در انتهای خط به منظور تولید جریان غیرماندگار تشکیل یافته است. لوله به طول ۴۷ متر و از جنس پلی اتیلن با فشار کاری ۱۰ اتمسفر بوده و با قطر ۶۳ میلیمتر در آزمایشات به کار گرفته شده است. جدول (۱) محدوده متغیرهای به کار رفته در آزمایشات را نشان می‌دهد. لوله در طول مسیر بر روی تکیه‌گاهی فلزی قرار گرفته و مهار گردیده است. اعداد رینولدز به کار رفته در آزمایشات این تحقیق در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد برای دبی‌های ۲/۵، ۳/۵ و ۴/۵ لیتر بر ثانیه به ترتیب برابر ۵۹۰۰۳، ۸۲۶۰۵ و ۱۰۶۲۰۶ محاسبه شده‌اند.

جدول ۱. محدوده متغیرها در طول آزمایشات

پارامتر	قطر لوله (mm)	طول لوله (m)	دبی (l/s)	قطر نشت (mm)	فاصله نشت از مخزن (m)
محدوده	۶۳	۴۷	۲/۵ – ۳- /۵ – ۴/۵	۱۰ – ۴	۳۹ – ۲۷

زبان کدنویسی مورد استفاده در این تحقیق ویژوال بیسیک است که در محیط ویندوز قدرت فوق‌العاده‌ای دارد، به طوری که از سبک برنامه‌نویسی شیءگرا (Object Oriented) پیروی می‌کند. برنامه‌نویسی شیءگرا روش طبیعی‌تری را برای نگرش بر برنامه‌نویسی ارائه می‌کند و این کار را با مدل‌سازی اشیای دنیای واقعی، صفات و رفتار آنها انجام می‌دهد. برنامه‌نویسی شیءگرا ارتباط بین اشیا را نیز مدل‌سازی می‌کند. در این سبک برنامه‌نویس، داده‌ها (صفات) و توابع (رفتارها) را در بسته‌ای به نام اشیا بسته‌بندی می‌کند و داده‌ها و توابع شدیدا به هم گره خورده‌اند (جعفرنژاد و عباس‌نژاد [۷]).

معادلات اساسی حاکم بر جریان‌های غیرماندگار در مجاری تحت فشار بسته عبارتند از دو معادله پیوستگی و ممنتوم که در ادامه به آنها اشاره شده است.

معادله مومنتوم (اندازه حرکت):

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial t}+V\frac{\partial V}{\partial x}+g\sin\theta+\frac{fV|V|}{2D}=0 \qquad (۱)$$

معادله پیوستگی:

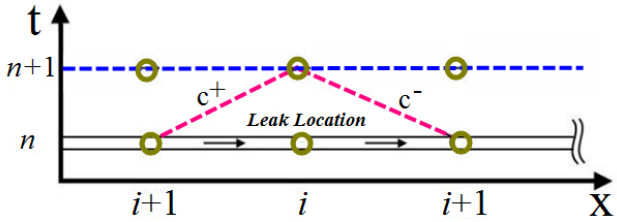
$$\frac{\partial P}{\partial t}+V\frac{\partial P}{\partial x}+\rho c^2\frac{\partial V}{\partial x}=0 \qquad (۲)$$

در این معادلات A و P فشار و سطح مقطع جریان، ρ جرم حجمی و یا چگالی سیال، θ زاویه بین محور لوله و سطح مبنا، V سرعت سیال، g شتاب گرانش، D قطر لوله، f ضریب اصطکاکی دارسی– ویزباخ و c سرعت موج فشاری می‌باشند. حل این

معادلات در مدل کامپیوتری تهیه شده با روش خطوط مشخصه انجام پذیرفته است (چادری [۱۵]). در این تحقیق به منظور مدل‌سازی عددی نشت، از معادله روزنه که توسط توریچلی ارائه شده است استفاده می گردد (شاملو و حقیقی [۱۶] و مینیکنی و همکاران [۱۷]):

$$Q_L = A_e\sqrt{2g(H_L - Z_L)} \quad (۳)$$

در رابطه ۳، Q_L دبی نشت، $A_e = C_d A_L$ سطح موثر روزنه نشت، C_d ضریب دبی، A_L سطح ظاهری نشت، Z_L ارتفاع خط لوله در آن نقطه از سطح افق و H_L ارتفاع پیزومتریک لحظه‌ای در محل نشت می‌باشد. حال جهت تحلیل جریان گذرا در محدوده نشت با استفاده از روش خطوط مشخصه باید شرایط مرزی مربوط به معادلات در محاسبات وارد شود. شرایط مرزی در حالت وجود روزنه نشت در خط لوله در صورت عبور جریان گذرا با در نظر گرفتن نمای شماتیک شکل (۱) به دست خواهد آمد.



شکل ۱. اعمال روش حل خطوط مشخصه بر روی نمای شماتیک نشت در خط لوله در صفحه مختصات x-t

حال با در نظر گرفتن معادله پیوستگی در محل نشت خواهیم داشت:

$$Q_{i-1}^n = Q_{Li}^{\ n} + Q_{i+1}^n \quad (۴)$$

سپس در معادله خط مشخصه مثبت در پایین‌دست محل نشت و در معادله مشخصه منفی در بالادست محل نشت در مقاطع $i-1,n$ و $i+1,n$ ، معادلات زیر صادق می‌باشند:

$$Q_{Pi}^{\ n+1} = C_p - C_a H_{Pi}^{\ n+1} \quad (۵)$$

$$Q_{Pi}^{\ n+1} = C_n + C_a H_{Pi}^{\ n+1} \quad (۶)$$

که در آنها:

$$C_p = Q_{i-1}^n + C_a H_{i-1}^n - R\Delta t Q_{i-1}^n\left|Q_{i-1}^n\right| \quad (۷)$$

$$C_n = Q_{i+1}^n - C_a H_{i+1}^n - R\Delta t Q_{i+1}^n\left|Q_{i+1}^n\right| \quad (۸)$$

لذا به منظور شبیه‌سازی جریان گذرا در محل نشت خواهیم داشت:

$$H_{Pi}^{\ n+1} = (C_p - C_n)/2C_a \quad (۹)$$

$$Q_{Pi}^{\ n+1} = (C_p + C_n)/2 \quad (۱۰)$$

$$C_p = Q_{i-1}^n + C_a H_{i-1}^n - R\Delta t Q_{i-1}^n\left|Q_{i-1}^n\right| \quad (۱۱)$$

$$C_n = (Q_{i-1}^n - Q_{Li}^{\ n}) - C_a H'^{n}_{i+1} - R\Delta t(Q_{i-1}^n - Q_{Li}^{\ n})\left|(Q_{i-1}^n - Q_{Li}^{\ n})\right| \quad (۱۲)$$

$$Q_{Li}^{\ n} = A_e\sqrt{2g(H_{Li}^{\ n} - Z_L)} \quad (۱۳)$$

$$H'^{n}_{i+1} = H_{i+1}^n - \frac{(Q_{Li}^{\ n}/A)^2}{2g} \quad (۱۴)$$

متذکر می‌گردد به منظور محاسبه H'^{n}_{i+1} در معادله ۱۴ این‌گونه فرض شده باشد که از افت موضعی ناشی از نشت صرف‌نظر می‌شود و مقدار افت طولی ناشی از اصطکاک، معادل سرعت ناشی از خارج شدن مقداری آب از محل نشت لحاظ خواهد بود.

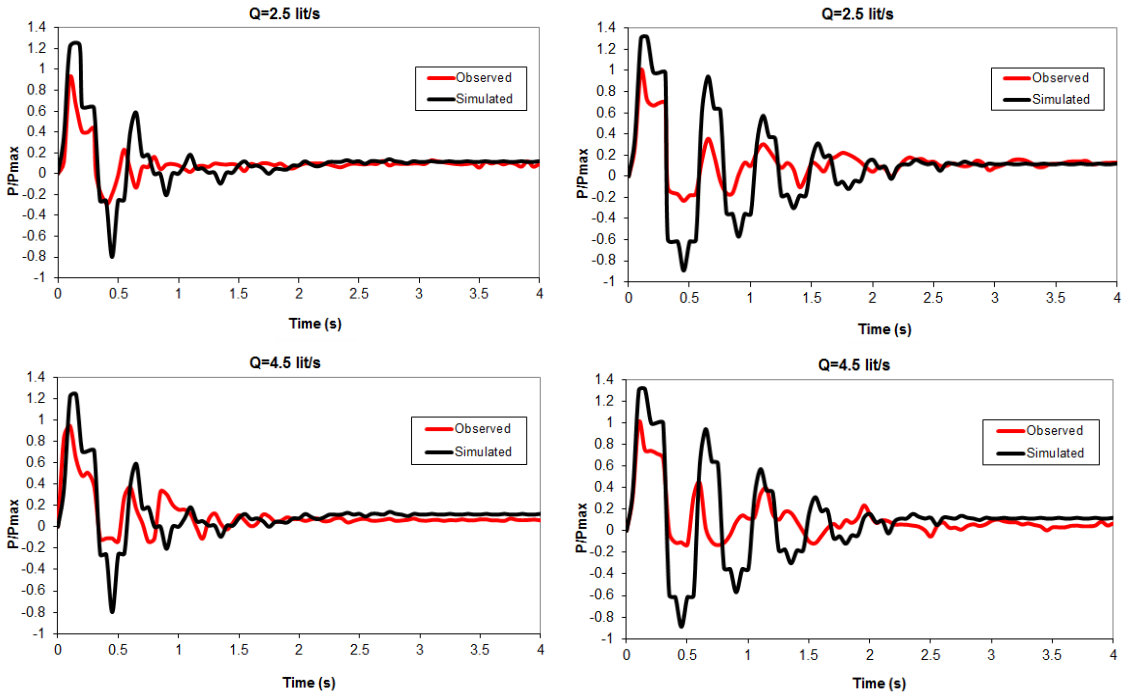
تحلیل‌گر معکوس یک موتور جستجوگر کدنویسی شده است که روند بهینه‌سازی را اجرا می‌کند تا بهترین پاسخ را برای مسئله پیدا نماید. از سوی دیگر، تحلیل‌گر جریان گذرا عهده دار عمل شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان گذرا را با در نظر گرفتن شرایط مرزی معین است. نتایج تحلیل‌گر جریان گذرا توسط تحلیل‌گر معکوس فراخوانی شده تا تابع هدف را مورد ارزیابی قرار دهد. تحلیل‌گر معکوس به عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی با استفاده از یک تابع هدف تعریف می‌شود که در ساده‌ترین شکل ممکن می‌تواند به صورت مجموع مربعات خطا بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی بیان گردد:

$$Of = \sum_{i=1}^{k} (Hc_i - Ho_i)^2 \qquad (۱۵)$$

در این رابطه Of تابع هدف، k تعداد بار فشاری محاسبه شده، Hc_i بار فشاری محاسبه شده و Ho_i بار فشاری مشاهده شده هستند. همچنین باید قیدهای مربوط به هر کدام از پارامترهای مجهول مانند ضریب زبری، مقدار نشت، ضریب دبی روزنه نشت و ... (یا تمام آنها) که تابع هدف برای آن بهینه‌سازی می‌گردد، نیز تعریف شود. لذا عمل بهینه‌سازی می‌تواند برای تعیین یک و یا چند پارامتر مجهول به طور هم زمان انجام گیرد.

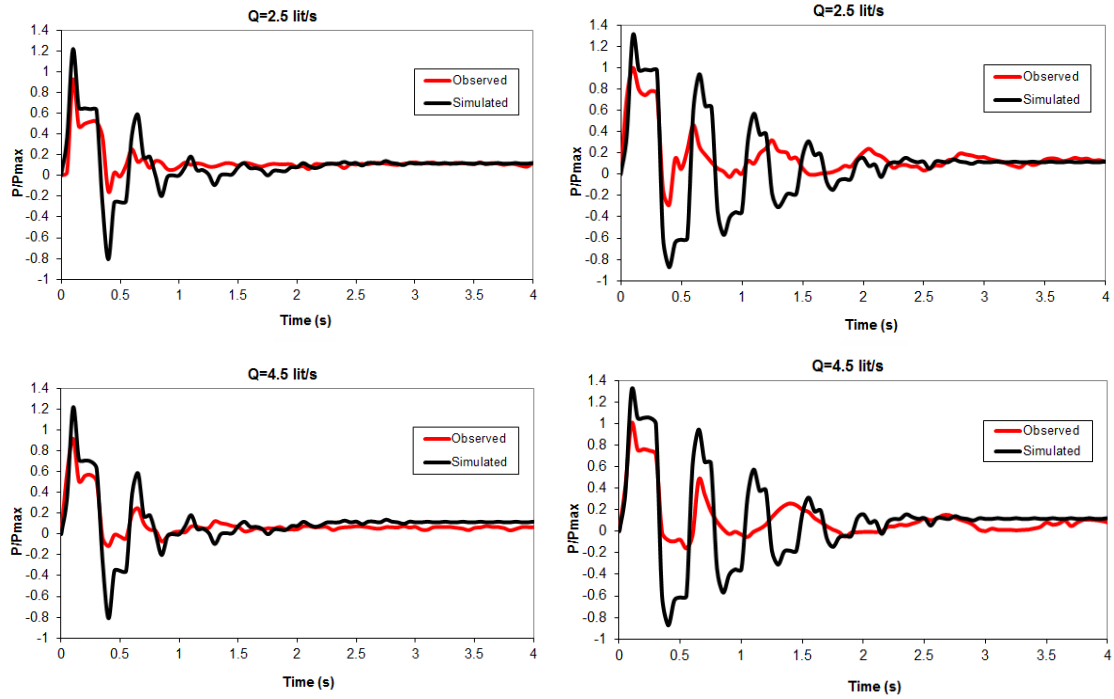
۳. نتایج و بحث

همانطور که در رابطه (۱) مشخص است در محاسبات انجام شده، افت ناشی از اصطکاک در حالت وجود نشت در لوله به وسیله مدل اصطکاکی شبه ماندگار مدلسازی گردیده است. اشکال ۲ و ۳ نتایج شبیه‌سازی عددی جریان گذرا در حالت وجود نشت با استفاده از مدل اصطکاکی شبه‌ماندگار در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی را برای محل‌ها و اقطار مختلف نشت در دبی‌های گوناگون نشان می‌دهد. همان‌گونه که در اشکال (۲) و (۳) مشخص است مدل اصطکاکی شبه ماندگار که به جهت شبیه‌سازی افت انتخاب شده است، مقادیر بیشینه‌های فشاری مثبت و منفی را بیشتر از مقادیر موجود پیش‌بینی می‌نماید. در این بین توانایی این مدل بیه‌ساز افت اصطکاکی در تعیین مقادیر بیشینه‌های فشاری مثبت بیشتر از بیشینه‌های فشاری منفی می‌باشد. همچنین با مقایسه قطرهای ۴ و ۱۰ میلیمتر نشت در اشکال مورد اشاره، مشخص است که نشت‌های با قطر ۱۰ میلیمتر در موج‌های شبیه‌سازی شده افت بیشتری را نسبت به نشت‌های با قطر ۴ میلیمتر به وجود می‌آورند. اما برای دبی‌های گوناون از یک محل – قطر نشت، با افزایش دبی تنها مقدار کمی حداکثر فشار تولید شده افزایش خواهد یافت ولی در شکل ظاهری موج تغییری به وجود نخواهد آمد. به علاوه این که با افزایش دبی، به دلایلی که قبلاً ذکر شد (کاهش ظرفیت تخلیه فشار روزنه نسبت به فشار کل با افزایش دبی و فشار گذرای تولیدی آن) نسبت فشار تخلیه شده از روزنه نشت به فشار کل کاهش می‌یابد. از سوی دیگر همانطور که در اشکال مورد اشاره مشخص است، مدت زمان لازم جهت میرا شدن امواج و یا همان زمان استهلاک موج فشاری با افزایش قطر روزنه به شکل ملموسی کاهش می‌یابد. به طوری که این مقدار برای زمان استهلاک موج فشاری برای اقطار ۴ و ۱۰ میلیمتر به ترتیب معادل حدود ۲/۶ و ۲ ثانیه می‌باشد. بنابراین با افزایش قطر نشت به دلیل افزایش توان روزنه در خارج نمودن فشار اضافه ایجاد شده، زمان میرایی موج کاهش می‌یابد.



نشت با قطر روزنه ۴ میلیمتر — نشت با قطر روزنه ۱۰ میلیمتر

شکل ۲. مقایسه موج فشاری خروجی مدل عددی کدنویسی شده با نتایج آزمایشگاهی برای محل نشت ۲۷ متر در حالت وجود نشت



نشت با قطر روزنه ۴ میلیمتر — نشت با قطر روزنه ۱۰ میلیمتر

شکل ۳. مقایسه موج فشاری خروجی مدل عددی کدنویسی شده با نتایج آزمایشگاهی برای محل نشت ۳۹ متر در حالت وجود نشت

تنها پارامتری که در حالت استفاده از مدل اصطکاکی شبه‌ماندگار توسط مدل عددی کدنویسی شده باید تخمین زده شود، ضریب تخلیه روزنه نشت رابطه کلاسیک (c_d) می‌باشد. مقادیر پارامترهای کالیبره شده ضریب تخلیه روزنه‌های نشت مورد نظر در جدول (۲) ارائه شده است. همانگونه که قابل ملاحظه است، روزنه‌های نشت با قطر بیشتر (۱۰ میلیمتر) ضریب تخلیه نسبتاً بزرگ‌تری نسبت به روزنه‌های با قطر کمتر (۴ میلیمتر) دارند و این مسئله به دلیل مقاومت کمتر آنها در مقابل ازدیاد فشار به وجود آمده در سیستم خط لوله بر اثر موج فشاری جریان گذرا می‌باشد.

جدول ۲. مقادیر ضریب تخلیه روزنه (cd) برآورد شده برای جریان گذرا در حالت وجود نشت شبیه‌سازی شده با مدل عددی

دبی (lit/s)		۲/۵	۳/۵	۴/۵
عدد رینولدز		۵۹۰۰۳	۸۲۶۰۵	۱۰۶۲۰۶
محل نشت ۲۷ متر	قطر نشت ۴ میلیمتر	۰/۴۷۲	۰/۴۵۰	۰/۳۹۵
	قطر نشت ۱۰ میلیمتر	۰/۵۳۹	۰/۵۱۱	۰/۴۵۸
محل نشت ۳۹ متر	قطر نشت ۴ میلیمتر	۰/۵۲۴	۰/۴۶۹	۰/۴۱۲
	قطر نشت ۱۰ میلیمتر	۰/۵۴۸	۰/۵۰۹	۰/۴۵۷

اکنون پس از مراحل فوق، عملکرد و توانایی مدل مذکور را در شبیه‌سازی موج فشاری گذرا به کمک پارامتر آماری جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Squares of Error) بررسی می‌کنیم.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}[(H_M)_i - (H_P)_i]^2} \quad (۱۶)$$

که در این فرمول N تعداد داده‌ها، H_m میزان فشار اندازه‌گیری شده و H_p مقدار فشار برآورد شده می‌باشند. کاربرد شاخص فوق بدین شکل است که هرگاه مقدار RMSE محاسبه شده به صفر نزدیک تر باشد، در آن روش دقت مدل در برآورد دبی بالاتر خواهد بود.

جدول ۳. مقادیر RMSE موج فشاری آزمایشگاهی ثبت شده دارای نشت و جریان گذرای شبیه‌سازی شده با مدل عددی در حضور نشت

دبی (lit/s)		۲/۵	۳/۵	۴/۵
عدد رینولدز		۵۹۰۰۳	۸۲۶۰۵	۱۰۶۲۰۶
محل نشت ۲۷ متر	قطر نشت ۴ میلیمتر	۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۲۵
	قطر نشت ۱۰ میلیمتر	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۵
محل نشت ۳۹ متر	قطر نشت ۴ میلیمتر	۰/۲۳	۰/۲۰	۰/۲۳
	قطر نشت ۱۰ میلیمتر	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱۲

همانطور که از ارقام موجود در جدول (۳) نمایان است، مدل عددی ارائه شده، توانایی کاملا مناسبی در شبیه‌سازی موج فشاری جریان گذرا در حضور نشت دارد. توانایی مدل کامپیوتری در شبیه‌سازی موج فشاری جریان گذرا حاکی از تخمین صحیح پارامترهای موثر از جمله ضریب تخلیه روزنه نشت (c_d) است. چرا که این پارامتر عوامل اصلی سیستم و روزنه در تخمین میزان جریان و فشار تحلیه شده از لوله است که در سیستم مجهول بوده و باید تخمیت زده شود. دیگر پارامترها عموماً یا فیزیکی و یا از روابط موجود قابل محاسبه می‌باشند. لذا این شاخص آماری همچنین مفهوم تخمین صحیح و قابل اعتماد ضریب تخلیه روزنه نشت (c_d) را نیز در خود نهفته دارد.

۴.نتیجه‌گیری

زبان‌های مختلف برنامه‌نویسی از مهمترین ابزارهای مهندسین جهت انجام محاسبات نرم و تحلیل پدیده‌های فیزیکی می‌باشد. انتقال آب از طریق خطوط لوله و نیاز بشر به تامین و انتقال آب، یکی از مواردی است که مورد توجه مهندسان هیدرولیک بوده است. اما خطوط لوله انتقال آب به تناسب جنس لوله، شرایط اجرا، محیط اطراف، چگونگی بهره‌برداری و ... پس از مدتی دچار فرسودگی و نشت می‌شوند. یکی

از اصلی‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر روی مقدار آب و فشارخروجی از محل نشت، ضریب دبی روزنه نشت است. بنابراین ابتدا مدلی کامپیوتری به زبان ویژوال بیسیک (VB) کدنویسی شد که قابلیت شبیه‌سازی نشت در خط لوله برای حالت وجود جریان میرای سریع و دیگر حالات جریان را به صورت یک بعدی دارد. سپس با استفاده از روش آنالیز معکوس جریان میرا، پارامتر ضریب تخلیه روزنه نشت به گونه‌ای تخمین زده شد که امواج فشاری شبیه‌سازی شده با امواج فشاری ثبت شده از داده‌های آزمایشگاهی کمترین خطا و بهترین برازش را داشته باشد. نتایج نشان داد مدل اصطکاکی شبه ماندگار مقادیر بیشینه‌های فشاری مثبت و منفی را بیشتر از مقادیر موجود پیش‌بینی می‌نماید. نشت‌های با قطر ۱۰ میلیمتر در موج‌های شبیه‌سازی شده افت بیشتری را نسبت به نشت‌های با قطر ۴ میلیمتر به وجود می‌آورند. همچنین مدت زمان لازم جهت میرا شدن امواج و یا همان زمان استهلاک موج فشاری با افزایش قطر روزنه به شکل ملموسی کاهش می‌یابد. به طوری که این مقدار برای زمان استهلاک موج فشاری برای اقطار ۴ و ۱۰ میلیمتر به ترتیب معادل حدود ۲/۶ و ۲ ثانیه می‌باشد. در این تحقیق مقادیر پارامترهای کالیبره شده ضریب تخلیه روزنه‌های نشت در حالت جریان میرا ارائه شده است. شاخص‌های آماری نشان داد مدل عددی ارائه شده، توانایی کاملا مناسبی در شبیه‌سازی موج فشاری جریان گذرا در حضور نشت دارد. توانایی مدل کامپیوتری در شبیه‌سازی این امواج حاکی از تخمین صحیح پارامترهای موثر از جمله ضریب تخلیه روزنه نشت (C_d) است.

مراجع

[۱] محمدی، ک. و فتحی-مقدم، م. ۱۳۹۶. تحلیل جریان غیرماندگار سریع در خطوط لوله توسط مدل اصطکاکی غیرماندگار. نشریه دانش آب و خاک، دانشگاه تبریز، جلد ۲۷، شماره ۲، صفحات ۱۶۹-۱۵۷.

[۲] رحمانشاهی، م.، فتحی-مقدم، م. و حقیقی، ع. ۱۳۹۷. نشت‌یابی در خطوط لوله ویسکوالاستیک با استفاده از حل معکوس جریان گذرا. مجله آب و فاضلاب، دوره ۲۹، شماره ۵، صفحات ۸۵-۹۷.

[۳] میرزایی جشنی، م.، فتحی-مقدم، م.، ثابت ایمانی، ع. و اکبری، ا. ۱۳۹۸. نشت‌یابی و مقایسه آزمایشگاهی و نظری خصوصیات جریان گذرا در لوله‌های انتقال پلی اتیلن. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دوره ۵۱، شماره ۳، ، صفحات ۵۴۷-۵۵۶.

[۴] اکبری، ا.، فتحی-مقدم، م. و میرزایی، م. ۱۴۰۰. تشخیص نشت در خطوط انتقال پلی اتیلن با استفاده از بازتاب موج فشاری جریان گذرا"، مجله علوم و مهندسی آبیاری، جلد ۴۴، شماره ۱، صفحات ۶۱-۵۷.

[۵] رستمی، ا و درویشی، ا. ۱۴۰۰. ترکیب روش حل معکوس و الگوریتم فراکاوشی برای محاسبه مقدار و موقعیت نشت در شبکه های توزیع آب"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، سال ۱۱، شماره ۴۴، ، صفحات ۸۷-۱۰۴.

[۶] محمدی، ک. ۱۳۹۴. تحلیل جریان گذرا به منظور نشت‌یابی در خطوط لوله. رساله دکتری، دانشگاه شهید چمران اهواز.

[۷] جعفرنژاد قمی، ع. و عباس‌نژاد، ر. ۱۳۸۸. آموزش گام به گام ویژوال بیسیک (مرجع کامل). انتشارات علوم رایانه.

[8] Joukowski, N. E. 1898. Memoirs of the Imperial Academy Society of St. Petersburg. Amer. Water Works Assoc. vol. 24. pp. 341-424.

[9] Covas, D., Graham, N., Maksimovic, C., Ramos, H., Kapelan, Z., Savic, D., and Walters, G. 2003. An assessment of the application of inverse transient analysis for leak detection: Part II – Collection and application of experimental data. In: Proceedings of the International Conference on Advances in Water Supply Management. London: Balkema.

[10] Haghighi, A. and Ramos, H. M. 2012. Detection of Leakage Freshwater and Friction Factor Calibration in Drinking Networks Using Central Force Optimization. Journal of Water Resource Management. 26: pp. 2347–2363.

[11] Fathi-Moghadam, M., Haghighipour, S., and Mohammad Vali Samani, H. 2013. Design-Variable Optimization of Hydropower Tunnels and Surge Tanks Using a Genetic Algorithm. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, pp. 200-208.

[12] Liu, J. and Yu, G. 2014. Analysis of demand and leak distributing uniformly along pipes. 16th Conference on water distribution system analysis. WDSA. pp. 603-612,

[13] Van Zyl, J.E., Lambert, A.O. and Collins, R. 2017. Realistic Modeling of Leakage and Intrusion Flows through Leak Openings in Pipes. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 143, No. 9.
[14] Avila, C. A. M., Romero, F. J. S., Jimenez, P. A. L. and Sanchez, M. P. 2021. Leakage Management and Pipe System Efficiency. Its Influence in the Improvement of the Efficiency Indexes. Journal of Water. 13, 1909, pp 1-25.
[15] Chaudhry, M.H. 2014. Applied Hydraulic Transients. Springer, New York.
[16] Shamloo, H., and Haghighi, A. 2009. Leak detection in pipelines by inverse backward transient analysis. Journal of Hydraulic Research. Vol. 47, No. 3, pp. 311–318.
[17] Meniconi, S., Brunone, B., and Ferrante, M. 2012. Water-hammer pressure waves interaction at cross-section changes in series in viscoelastic pipes. Journal of Fluids and Structures. Vol. 33, pp. 44-58.