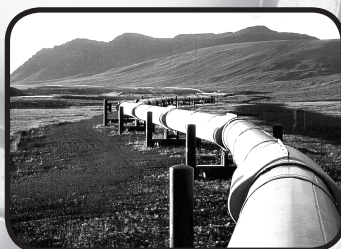
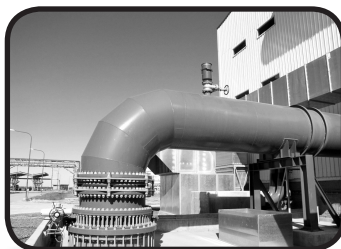
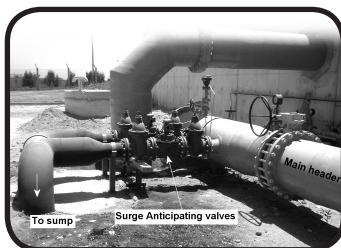


تحلیل ضربه قوچ؛ محاسباتی ضروری و مؤثر و آسان

ترجمه و تنظیم: فرنوش رضوانی



چکیده

برای اکثر سامانه‌های لوله‌کشی، کمینه و بیشینه فشار عملکرد در طی اتفاقاتی گذرا رخ می‌دهد. بنابراین طراحی و عملکرد صحیح سامانه لوله‌کشی برای شروع یا خاتمه کار مناسب و معمول سامانه، در مواردی از پیش تعیین نشده مانند عملکرد نامناسب پمپ یا قطع برق، ضروری می‌باشد. بر خلاف تحلیل‌های موجود دیگر در رابطه با ضربه قوچ (حالت گذرا)، تحلیل پیش رو که بر اساس مفهوم امواج فشاری شکل گرفته است، بسیار ساده و در عین حال کارآمد و با کمترین میزان خطا می‌باشد که نه تنها برای سامانه‌های ساده، بلکه برای سامانه‌های پیچیده لوله‌کشی نیز قابلیت استفاده را با محاسبات کمتر دارد.

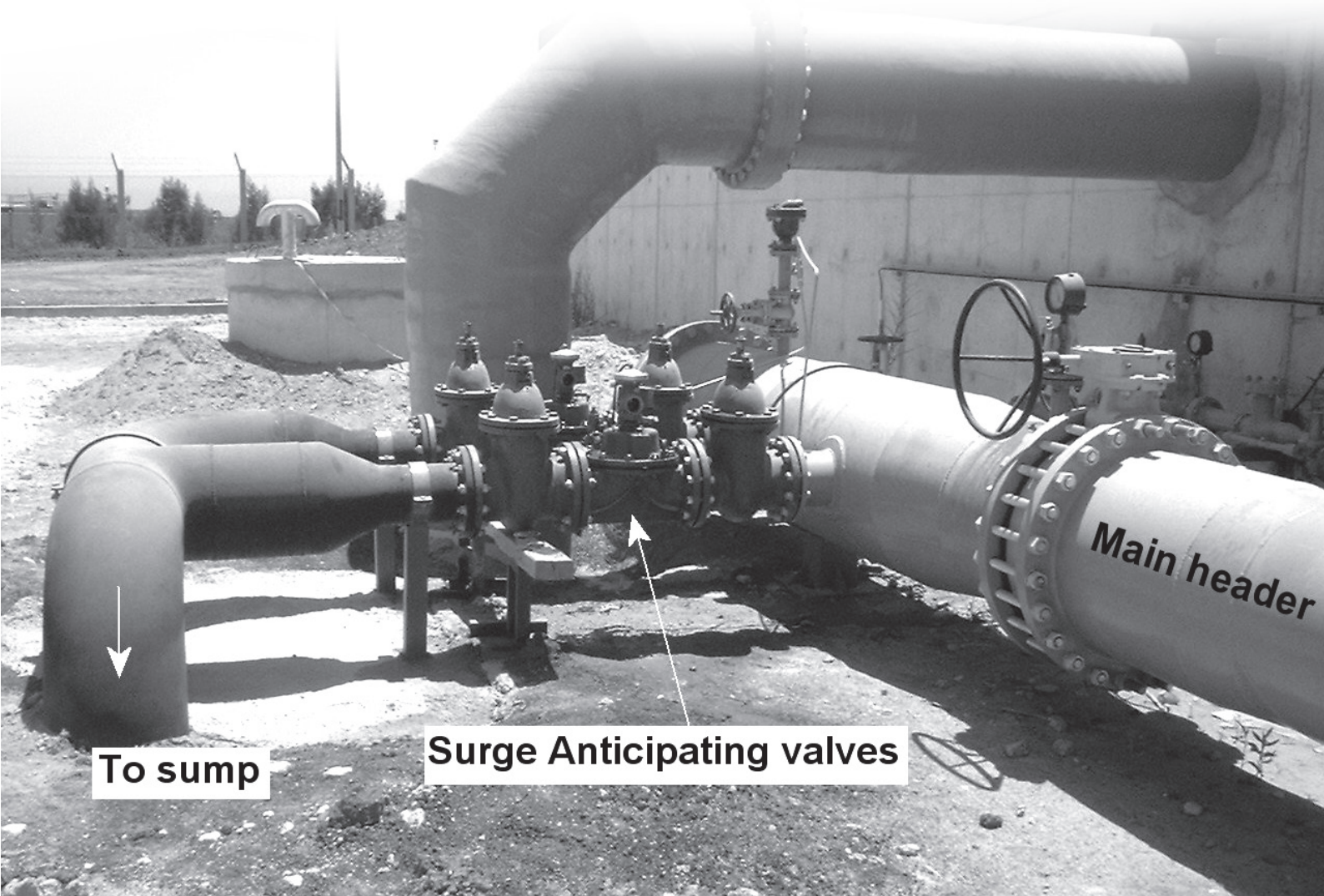
کلمات کلیدی: ضربه قوچ، لوله‌کشی آب، طراحی هیدرولیک، انتقالات هیدرولیکی

به‌طور مرسوم، تحلیل ضربه قوچ که برای طراحی ایمن و کارآمد یک سامانه لوله‌کشی مورد نیاز است، در آموزش‌ها و برنامه‌های مهندسی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علت اصلی این امر این است که تحلیل گذرا به صورت بسیار سخت و پیچیده به مهندسان ارائه می‌گردند (شکل ۱) که برای به‌کار بردن در سامانه‌های لوله‌کشی دشوار است. در این مقاله سعی می‌گردد روشی ساده و حسی برای این موضوع ارائه گردد.

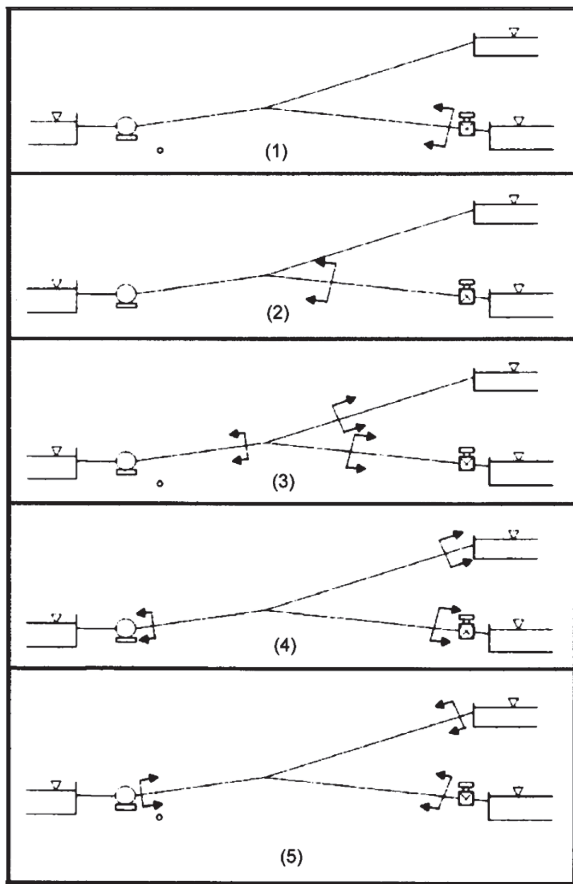
در این مقاله، رهیافتی برای تحلیل جریان گذرا بر پایه عمل امواج فشاری ارائه شده است. نشان داده شده است که این رهیافت، راه‌حل‌های دقیق‌تری را با محاسبات بسیار کمتر ارائه می‌نماید. علاوه بر این، این رهیافت، به‌صورت مفهومی دانش مهندسی نسبت به فرآیندهای گذرا در سامانه‌های لوله‌کشی را بالا برده و سبب بهبودی طراحی‌ها و در نتیجه عملکرد بهتر سامانه خواهد گشت.

۲- اهمیت تحلیل هیدرولیک گذرا (ضروری)

تحلیل گذرا از عملکرد سامانه لوله‌کشی، عموماً از تحلیل حالت پایا که به‌طور معمول توسط مهندسين به‌عنوان اساس طراحی یک سامانه استفاده می‌شود، مهم‌تر است. بیشترین اهمیت فشارهای گذرا هنگامی است که نرخ جریان به سرعت تغییر می‌کند که برای نمونه می‌توان به بسته شدن سریع شیر یا توقف‌های کاری پمپ اشاره نمود. همچنین اختلالاتی، حال به‌واسطه طراحی یا اتفاق، سبب تولید امواج فشاری رونده با مقدارهای زیاد می‌گردد. این فشارهای گذرا، به‌صورت همزمان بر شرایط حالت پایا موجود در خط لوله اضافی می‌گردند. شدت این فشارهای گذرا بایستی تعیین گردند تا سامانه لوله‌کشی آب با یک طراحی مناسب بتواند در برابر این بارهای اضافی مقاومت نماید. در حقیقت، در برخی مواقع، لوله‌ها بر اساس نرخ‌های فشاری^۱ خود مشخص می‌گردند که معرف قدرت مکانیکی آن‌ها بوده و تأثیر بسزایی نیز در هزینه آن‌ها دارد. رژیم‌های گذرا در سامانه‌های توزیع آب اجتناب‌ناپذیر بوده و معمولاً در ایستگاه‌های پمپاژ و شیرهای کنترلی، نواحی با ارتفاع



1-Pressure rating



شکل ۳: نمایشی از روش مشخصه موج

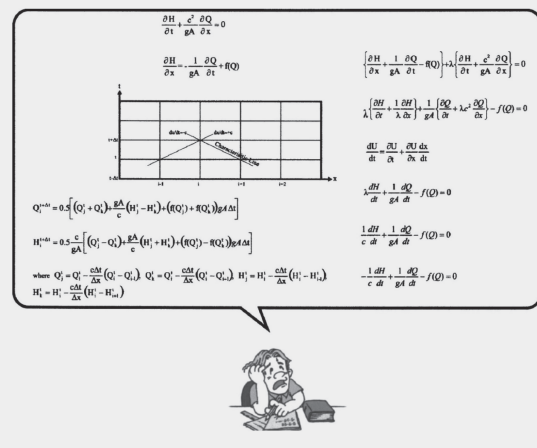
یک اتفاق گذرای کم فشار، برای مثال ایجاد شده به واسطه خرابی در واحد توان یا شکسته شدن لوله، پتانسیل این را که سبب نفوذ آلودگی‌های آب‌های زیرزمینی به خط لوله در نقطه نشت یا شکستگی گردند، دارد که با توجه به اندازه نشت، این نفوذ می‌تواند مقداری تا ۱۰۰ گالن را داشته باشد.

هوا (گاز) غیرمحلول نیز می‌تواند سبب آزاد شدن ذرات فلزی همراه آن‌ها شده و به سامانه لوله‌کشی آسیب برساند. حتی برخی از روش‌های متداول حفاظت از پدیده‌های گذرا مانند شیرهای اطمینان یا شیرهای هوایی/خلاء اگر به درستی طراحی یا نگهداری نشوند، ممکن است اجازه ورود برخی از ذرات بیماری‌زا را به سامانه توزیع آب بهداشتی بدهند.

مهندسين بایستی با دقت تمامی خطرات احتمالی برای طراحی سامانه لوله‌کشی را در نظر گرفته و نقاط ضعف را تخمین و حذف نمایند. پس از آن نیاز است که تحلیل گذرا را آغاز تا به درستی آگاهی کامل را از میزان قابلیت اطمینان، قدرت و ایمنی سامانه طراحی شده را داشته باشند.

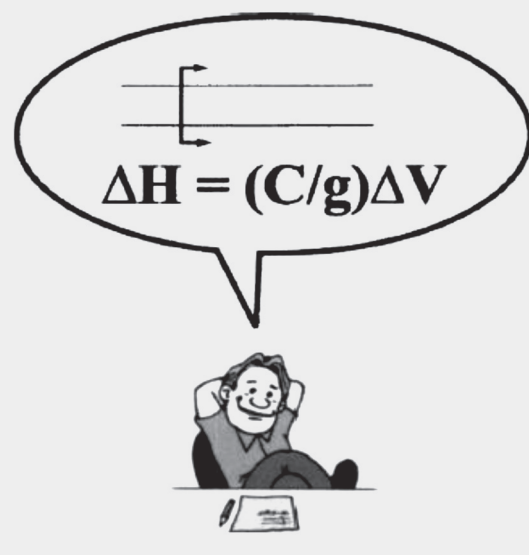
۳- علل گذر (ناپایداری) هیدرولیکی

ناپایداری‌های هیدرولیکی به واسطه یک تغییر در حالت پایا به وجود می‌آیند که این تغییر عموماً از یک حالت یا تعادل پایا



شکل ۱: مهندسين معمولی غالباً در پیچ و خم محاسبات پیچیده گم می‌شوند

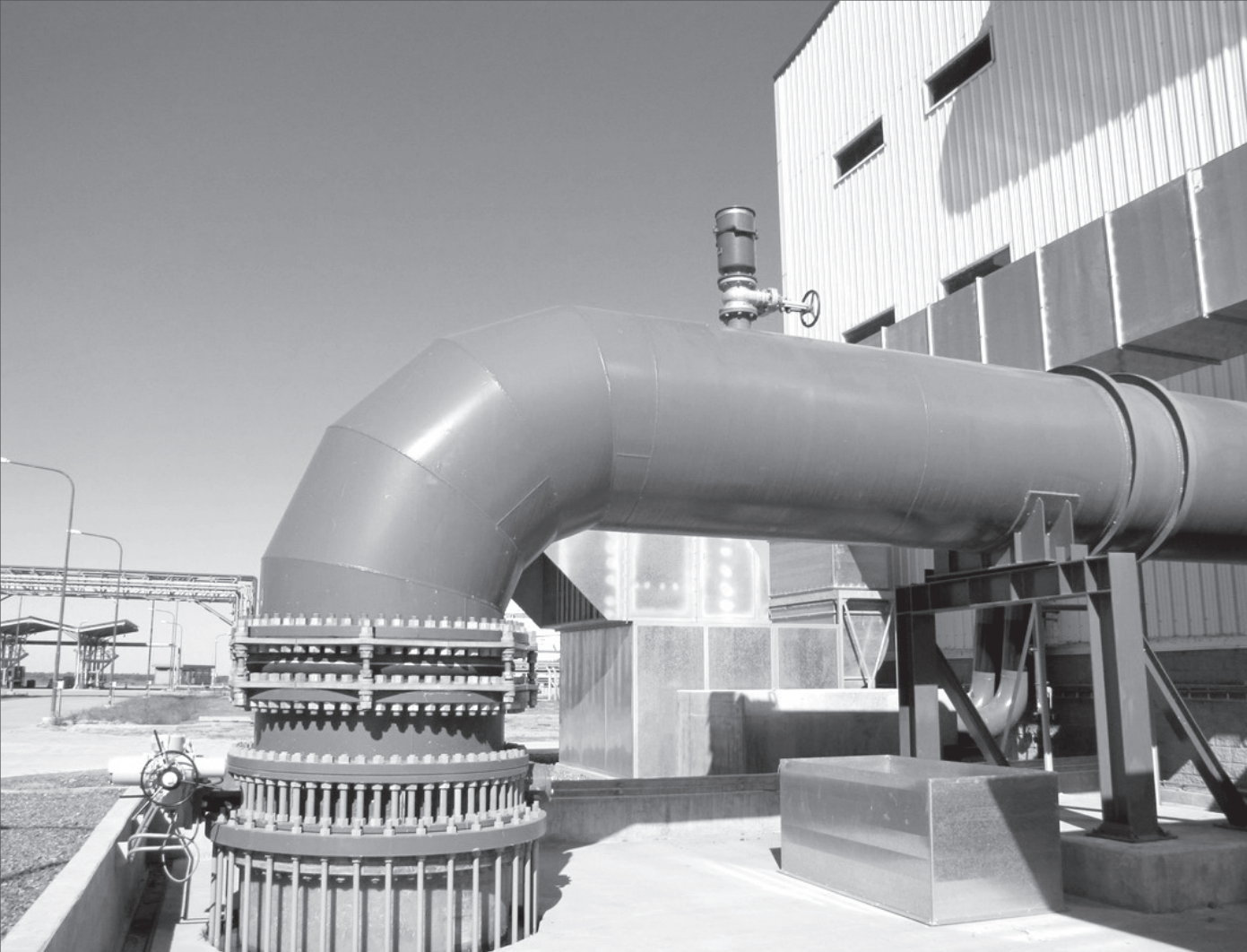
می‌شوند



شکل ۲: محاسبات و روش مفهومی مشخصه‌های موجی

زیاد، نواحی با فشار استاتیکی پایین و نقاط دورافتاده‌ای که از مخزن بالا دست فاصله دارند، شدیدتر می‌باشد. تمامی سامانه‌ها، در برخی ساعات؛ روشن، خاموش، دچار تغییرات غیرقابل پیش‌بینی در جریان و غیره می‌گردند و احتمال خطای انسانی، خرابی تجهیزات، زلزله و دیگر اختلالات پرخطر نیز وجود دارد. اگرچه شرایط گذرا در بسیاری از مواقع امکان‌پذیر است، ولی مهندسين بایستی توجه اصلی را به مواردی که امنیت مجموعه و کارکنان را به خطر می‌اندازد معطوف دارند.

اتفاقات گذرا، اثر چشمگیری بر کیفیت آب می‌گذارند. این اتفاقات می‌توانند نیروهای بزرگ بر شش در سیال تولید کرده و سبب دوباره معلق شدن ذراتی که قبلاً روی جداره‌ها ساکن شده بودند شود. آن‌چه به نام پدیده آب قرمز خوانده می‌شود، عموماً به واسطه اختلالات گذرا حاصل می‌شود. علاوه بر این،



بالاسری، تغییرات در تراز آب داخل مخزن، تغییرات فشار در مخزن‌ها و غیره)

• تغییرات سریع در شرایط مورد نیاز (برای مثال فلاش یا تخلیه)

• تغییرات در شرایط انتقال (برای مثال شکستگی خط اصلی یا یخ‌زدگی)

• مسدود شدن یا سرریز شدن آب داخل لوله

• عملکرد شیر یک طرفه یا شیر تعادل

این موارد در صورت عدم شناسایی و طراحی مناسب برای کنترل آن‌ها، پتانسیل بالایی را برای ایجاد صدمات جدی به مجموعه دارا می‌باشند.

۴- تحلیل ناپایداری (حالت گذرا) در یک سامانه لوله‌کشی

تغییرات سریع در وضعیت فشار و جریان (ضربه قوچ) در سامانه‌های لوله‌کشی با برخی متغیرها مشخص می‌گردند که وابسته به هر دو عامل موقعیت (X) و زمان (t) می‌باشند. این شرایط با معادله پیوستگی و مومنتم (اندازه حرکت) که به ترتیب در معادلات (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند، توصیف می‌گردند.

به دیگری است. اجزای اصلی اختلالات، تغییرات فشار و جریان در نقطه‌ای است که امواج فشاری به سراسر سامانه توزیع منتشر می‌گردد. امواج فشاری با سرعت صوت (در محدوده شنوایی یا خارج از آن) که وابسته به میزان الاستیسیته آب و دیواره لوله می‌باشد، حرکت می‌نماید. با انتشار این امواج، شرایط ناپایدار فشار و جریان ایجاد می‌گردد. با گذشت زمان، عملیات مستهلک‌سازی و اصطکاک، سبب کاسته شدن این امواج شده تا سامانه به شرایط پایایی جدید برسد. به طور معمول، تنها جریان‌های فوق‌العاده آرام منجر به گذری آرام از یک حالت پایا به حالت پایای دیگر بدون نوسانات زیاد در فشار و جریان می‌گردند.

به‌طور کلی، هرگونه اختلال در آب به هنگام تغییر در شرایط معمول جریان، سبب انتشار دنباله‌ای از امواج فشاری گذرا می‌گردد. به‌طور معمول، این اختلالات از تغییرات یا عملیاتی که بر تجهیز هیدرولیکی یا شرایط مرزی اثر می‌گذارند، نشأت می‌گیرند. اتفاقات متداولی که نیازمند ملاحظات مربوط به شرایط گذرا یا ناپایداری می‌باشند، شامل موارد زیر می‌باشند:

- راه‌اندازی یا خاموش شدن پمپ
- باز و بسته شدن شیرها (تغییر در سطح مقطع عبور جریان)
- تغییرات در فشارهای مرزی (برای مثال از بین رفتن مخزن

شماره مثال	تعداد ند	تعداد لوله	Δt (s)	تعداد نقاط تقاطع	Δt / محاسبات		
					MOC	WCM	MOC/WCM
1	7	9	0.1	41	48	16	3.0
2	36	40	0.0139	680	716	76	9.4
3	589	788	0.0056	15,117	15,708	1,377	11.4
4	1,170	1,676	0.0067	81,508	82,678	2,846	29.0
5	1,849	2,649	0.0056	159,640	161,486	4,495	35.9

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{c^2}{gA_l} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{1}{gA_l} \frac{\partial Q}{\partial t} + f(Q) \quad (2)$$

که H هد فشار^۱ (چگالی/فشار)، Q دبی حجمی، C سرعت موج در لوله، A_l سطح مقطع، g شتاب جاذبه، P چگالی و $f(Q)$ نشان‌دهنده سختی یا مقاومت لوله است که خود تابعی از نرخ جریان می‌باشد.

معادلات (۱) و (۲) با در نظر گرفتن تغییرات تنها در یک محور لوله (جریان یک بعدی) و حذف بخش‌های که تأثیر اندکی بر شرایط می‌گذارند، ساده‌سازی شده‌اند.

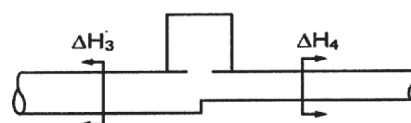
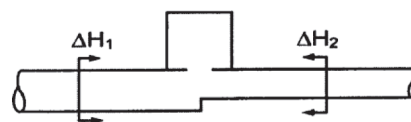
تحلیل و حل یک جریان گذرا، به واسطه حل معادلات (۱) و (۲) با در نظر گرفتن شرایط اولیه و مرزی مناسب حاصل می‌گردد. دقت گردد که حذف نمودن یا ساده کردن بیش از حد شرایط مرزی و بخش سختی لوله تنها برای سامانه‌های بسیار ساده می‌تواند منتج به راه‌حلی صحیح و مستقیم گردد.

روش‌های مختلف گرافیکی و جبری برای حل معادلات مربوط به جریان گذرا و ناپایدار توسعه داده شده‌اند که عموماً بر پایه روش‌های عددی و با استفاده از روش مشخصه‌ها^۲ (MOC) بوده است. روش MOC به لحاظ فهم، پیچیده و نیازمند مراحل متعدد محاسباتی برای حل یک مسئله گذرا می‌باشد. حال اگر سامانه لوله‌کشی بزرگ باشد، میزان محاسبات به حدی زیاد می‌گردد که نیازمند به کارگیری برنامه‌های رایانه‌ای خواهیم بود. برنامه‌های رایانه‌ای متعددی بر پایه روش MOC برای حل مسائل مربوط به حالت گذر در اجزای سامانه‌های لوله‌کشی همچون اتصالات، پمپ‌ها، مخازن سرریز و غیره توسعه داده شده است که تقریباً در اکثر این برنامه‌ها نقاط ضعف مشاهده می‌گردد. روش مشخصه‌ها در تعداد زیادی از کتب و نشریات با جزئیات کامل بررسی شده است. (Streeter and Wylie 1967, Watters 1984, Chaudhry 1987,)

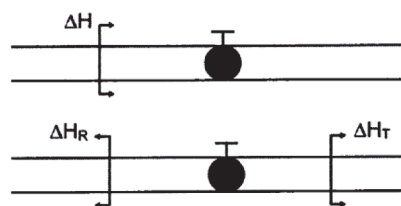
(Martin 2000)

۱- منظور از هد فشار، میزان فشاری است که معادل ارتفاعی از سیال است. برای مثال فشار یک بار آب، حدوداً معادل هد یا ارتفاع ۱۰ متری آب است.

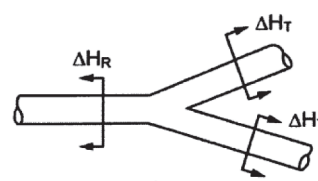
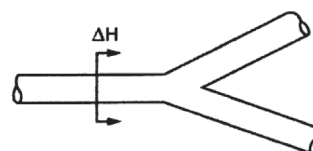
2-Method of characteristic



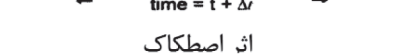
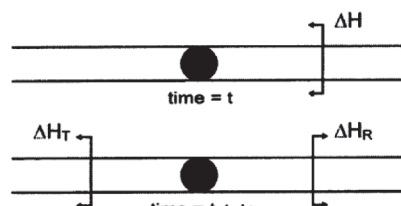
تجهیزات کنترل سرریز



اجزاء

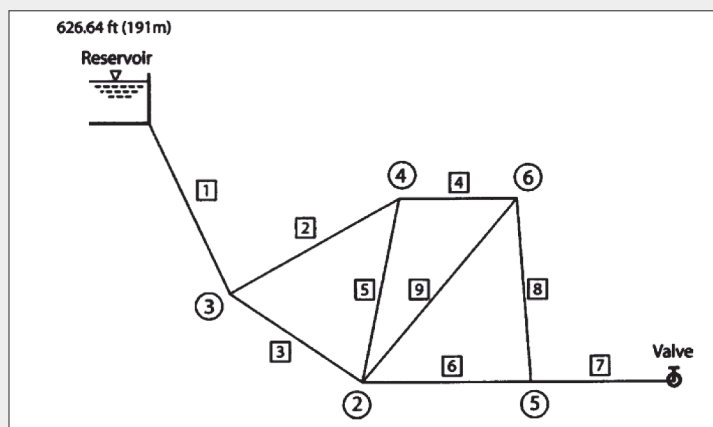


وصله‌ها



اث‌ اصطکاک

شکل ۴: تحلیل عملکرد موج فشاری در روش موج مشخصه



شکل ۵: طرحی از مثال ۱

جدول ۲: مشخصات سامانه لوله‌کشی مثال ۱

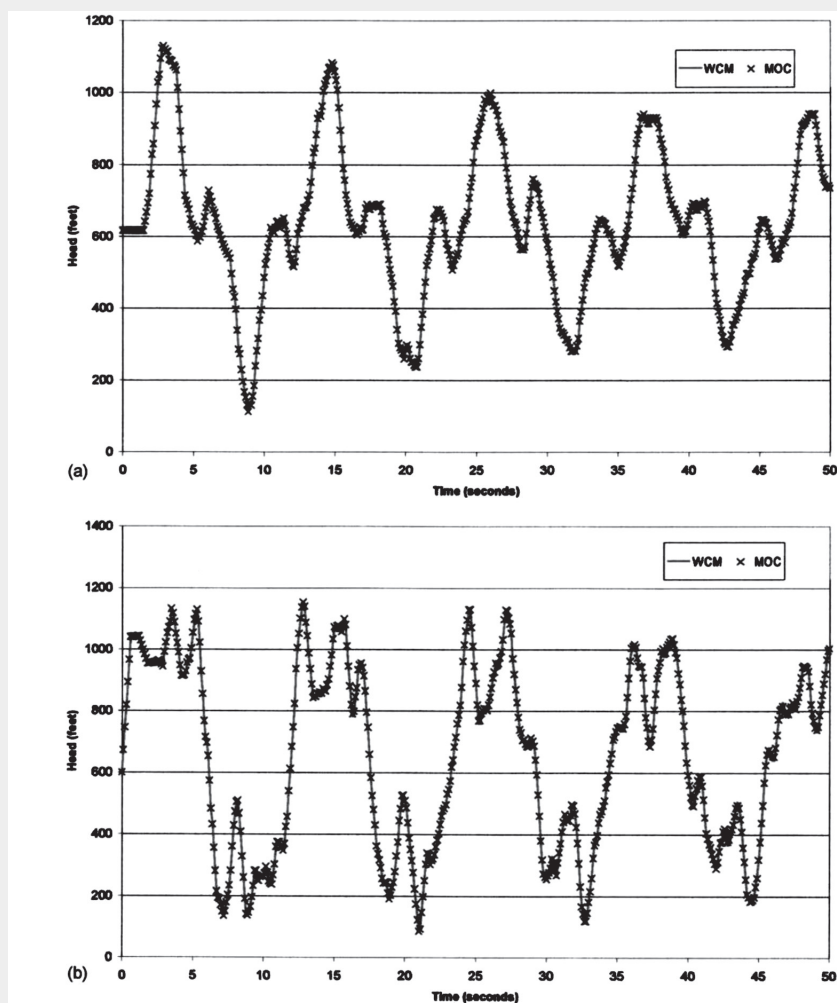
شماره لوله	طول ft (m)	قطر in. (mm)	زبری	افت اندک
1	2,000 (610)	36 (914)	92	0
2	3,000 (914)	30 (762)	107	0
3	2,000 (610)	24 (610)	98	0
4	1,500 (457)	18 (457)	105	0
5	1,800 (549)	18 (457)	100	0
6	2,200 (671)	30 (762)	93	0
7	2,000 (610)	36 (914)	105	0
8	1,500 (457)	24 (610)	105	0
9	1,600 (488)	18 (457)	140	0

لوله‌کشی، محل اتصالات، پمپ‌ها، سرهای بسته یا باز، مخازن سرریز و غیره) منتقل یا منعکس می‌گردد. همچنین یک موج فشاری می‌تواند به‌واسطه سختی لوله تغییر یابد. توصیف ارائه شده، مکانیزم پدیده گذرا یا ناپایداری در سامانه لوله‌کشی را به‌صورت حقیقی نشان می‌دهد. در این مقاله، این روش با عنوان روش موج مشخصه^۲ (WCM) مطرح می‌گردد.

هدف اصلی از این مقاله در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شد، پیچیدگی معادلات حاکم بر حالت گذرا یا ناپایدار سبب می‌گردد تا تنها تعداد محدودی از مهندسين به حل نمودن این معادلات فائق آیند و اکثر مهندسين در پیچ و خم دشوار معادلات گنجانده شوند. این در حالی است که همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده، محاسبات ساده و مفهومی بر پایه موج فشاری و معادلات پایه ضربه قوچ، توسط تمامی مهندسين رشته‌های همچون هیدرولیک فراگرفته و به‌کار

در این مقاله، طرح عددی جایگزینی برای حل مسائل مربوط به حالت گذرا در سامانه‌های لوله‌کشی ارائه شده است. این روش اساساً بر پایه روش صفحه موج^۱ که به‌صورت ضمنی به راه‌حل‌هایی همانند روش مشخصه‌ها می‌رسد، توسعه داده شده است. ولی عموماً حجم محاسبات را کاهش و به‌عنوان مزیتی اضافی، درک مهندسين را به‌واسطه روش ساده ادراک فیزیکی از مدل، توسعه می‌بخشد و در نتیجه مهندسين فهم بهتری نسبت به مکانیک جریان گذرا پیدا خواهند نمود.

این روش براساس مفهوم دقیق فیزیکی که جریان ناپایدار و گذرا داخل لوله به دلیل تولید و انتشار امواج فشاری به‌واسطه اختلال در سامانه لوله‌کشی (بسته شدن شیرها، خرابی پمپ و غیره) تولید می‌گردد، شکل گرفته است. یک موج فشاری که نمایشگر فشار سریع و تغییر جریان همراه آن است، در محیط لوله و سیال با سرعت صوت حرکت می‌نماید و در محل‌های ناپیوستگی در سامانه



شکل ۶: مقایسه دو روش WCM و MOC برای حالت گذرا در شیر و وصاله شماره ۴ مثال ۱

حالت (۲) موج فشاری با سرعت صوت طول لوله را به سمت وصاله سه راهه حرکت می‌نماید. در حالت (۳)، موج فشاری پس از برخورد به وصاله، تبدیل به سه موج جدید شده که دو موج به دو لوله متصل منتقل شده و موجی نیز به سمت مبدأ منعکس می‌گردد. در حالت (۴) هرکدام از سه موج فشاری با سرعت صوت به سمت مقابل لوله‌ها و به طرف عناصر واقع در آن‌جا حمله‌ور می‌شوند. در حالت (۵) امواج فشاری پس از تغییر در شرایط موجود در سه انتهای لوله که دربرگیرنده پمپ، مخزن و شیر بود، به سمت سه راهی باز می‌گردند.

این رهیافت مطابق شکل (۴) برای حل مسأله گذرا، نیازمند محاسبات مربوط به تأثیر حمله امواج فشاری بر اجزاء (مانند شیرها و پمپ‌ها، وصاله‌ها، تجهیزات مربوط به کنترل سرریز و اثر اصطکاک لوله بر موج فشاری بر مبنای تحلیل امواج فشاری و برای سامانه‌های متداول لوله‌کشی، توسعه داده شده‌اند.

این برنامه‌ها از این حقیقت که امواج فشاری بین اجزاء سامانه در سرعت‌های مشخص منتقل می‌شوند، استفاده کرده و اصلاحات

برده می‌شوند و در نتیجه شاهد بهبود وضعیت طراحی سامانه‌های لوله‌کشی و لحاظ نمودن جامع وضعیت گذرا در طراحی‌ها خواهیم بود.

تحلیل حالت گذرا در سامانه‌های لوله‌کشی به‌وسیله روش موج مشخصه (راحت)

امواج فشاری بواسطه یک اختلال در سامانه لوله‌کشی که نتیجه آن همان تغییر در جریان سیال است تولید می‌گردند. همان‌گونه که بارها اشاره شد، این اختلال می‌تواند به‌واسطه باز و بسته شدن شیرها، تغییر در فشار مخازن ذخیره، راه‌اندازی و خاموش شدن پمپ و یا تغییر در میزان دبی جریان ورودی یا خروجی از سامانه لوله‌کشی تولید گردد. شرایط فشار و دبی در یک جزء سامانه نیز به‌واسطه امواج فشاری دستخوش تغییرات قرار می‌گیرد. این رهیافت برای تحلیل مسائل مربوط به حالت گذرا در شکل ۳ نشان داده شده است.

در حالت (۱) شیر بسته و موج فشاری تولید می‌گردد. در

مربوط به تأثیر اصطکاک بر این امواج را لحاظ نموده و در نتیجه، در هر زمانی از شبیه‌سازی قادر به تعیین مشخصات این امواج هجومی می‌باشند. این روش که قابلیت کاربرد برای سامانه‌های پیچیده را دارند، در ۲۰ سال اخیر و به‌صورت تجاری به کار گرفته شده‌اند.

۵- مقایسه دو روش مشخصه

موج و روش مشخصه‌ها

رویه‌ای که در روش MOC بکار گرفته می‌شود، تبدیل معادلات مشتقات جزئی حاکم به معادلات دیفرانسیلی معمولی و سپس به حالت تفاضلی برای حل در روش‌های عددی می‌باشد.

معادلات، میزان هد و دبی جریان را در بازه‌های زمانی کوچک (Δt) در تعداد بی‌شماری موقعیت در بخش‌های مختلف در طول لوله نشان می‌دهند. شروع محاسبات در خلال تحلیل گذر بایستی با یک تحلیل اولیه پایا معلوم و شرایط مرزی آغاز گردد. یعنی میزان هد و دبی در زمان $t=0$ در کنار میزان هد و یا دبی در نقاط مرزی در تمامی دوره‌ها مشخص خواهد بود. برای تعیین مشخصات موج در پدیده گذر، در زمان $t+\Delta t$ موقعیت‌های داخلی، میزان هد و دبی جریان با داشتن مشخصات زمان t یعنی نقطه مجاور، به‌واسطه معادلات اولیه موج با حل عددی آن‌ها بر پایه روش‌های MOC و WCM مقایسه شده‌اند و نتایج حاکی از یکی بودن حل‌ها داشته است. ولی دقت گردد که این مقایسه تنها برای سامانه‌های بسیار ساده صحت دارد. روش WCM بر پایه این مفهوم شکل گرفته است که جریان گذرا در لوله نتیجه تولید و انتشار امواج فشاری است که به‌واسطه یک اختلال در سامانه لوله‌کشی (باز و بسته شدن شیرها، خرابی پمپ و غیره) شکل گرفته‌اند.

در واقع مشخصه‌های موج فشاری است که میزان تغییرات فشار و دبی را در طول لوله



نشان می‌دهند. یک موج فشاری به صورت جزئی در تمام ناپیوستگی‌ها در سامانه لوله‌کشی (وصاله‌ها، پمپ‌ها، سرهای باز و بسته و غیره) منتقل یا منعکس می‌گردد. همچنین مشخصات این موج فشاری به واسطه میزان سختی لوله تغییر می‌یابد.

هر دو روش WCM و MOC، در بازه‌های زمانی Δt در تمامی وصاله‌ها و اجزاء به حل مسأله می‌پردازند ولی در روش MOC، در هر بازه زمانی، حلی برای تمامی نقاط داخلی مورد نیاز می‌باشد. در هر دو روش محاسبه میزان اصطکاک لوله در نظر گرفته می‌گردد. تنها در روش WCM تأثیر اصطکاک لوله بر مشخصات موج، با یک معادله ساده برای هر لوله محاسبه و مشخصه‌های موج اصلاح می‌گردد.

۱- تعداد مورد نیاز محاسبات

در هر دو روش WCM و MOC تعداد زیادی محاسبات برای حل مسئله جریان گذرا در لوله بایستی حل گردد. این محاسبات شامل به روز رسانی مشخصات فشار و جریان در موقعیت‌های مورد نیاز برای بازه‌های زمانی Δt می‌باشد. برای آن‌که بتوانیم میزان مورد نیاز محاسبات را مقایسه نماییم، یک معادله پایه برای به‌روزرسانی فشار و جریان در یک موقعیت تنها تعریف می‌نماییم.

روش MOC نیازمند محاسبه در تمامی گره‌ها (بازه‌های Δt) و نقاط داخلی برای هر بازه زمانی می‌باشد. این در حالی است که در روش WCM محاسبات برای تمامی گره‌ها و تنها یک معادله برای هر لوله نیاز می‌باشد. این معادله در واقع مشخصات موج را به واسطه تأثیر اصطکاک لوله و اتصالات اصلاح می‌نماید.

بازه زمانی که در تحلیل در نظر گرفته می‌شود، به واسطه حد دقت یا تولرانس در نظر گرفته شده برای طول لوله‌های



مدل و سرعت موج تعیین خواهد شد. بازه زمانی باید به گونه‌ای انتخاب شود که امواج فشاری، بخش‌های لوله را در زمان مشخص عبور نمایند. که این زمان ضرب بازه‌های زمانی Δt می‌باشند. برای مدل مقایسه شده از لوله‌ای به طول ۶ متر (۲۰ ft) استفاده شده است. این بدان معناست که بزرگ‌ترین نمو زمانی ممکن، به گونه‌ای انتخاب شده است که بیشینه خطا در طول لوله‌ها در مدل، از ۶ متر (۲۰ ft) تجاوز نکند.

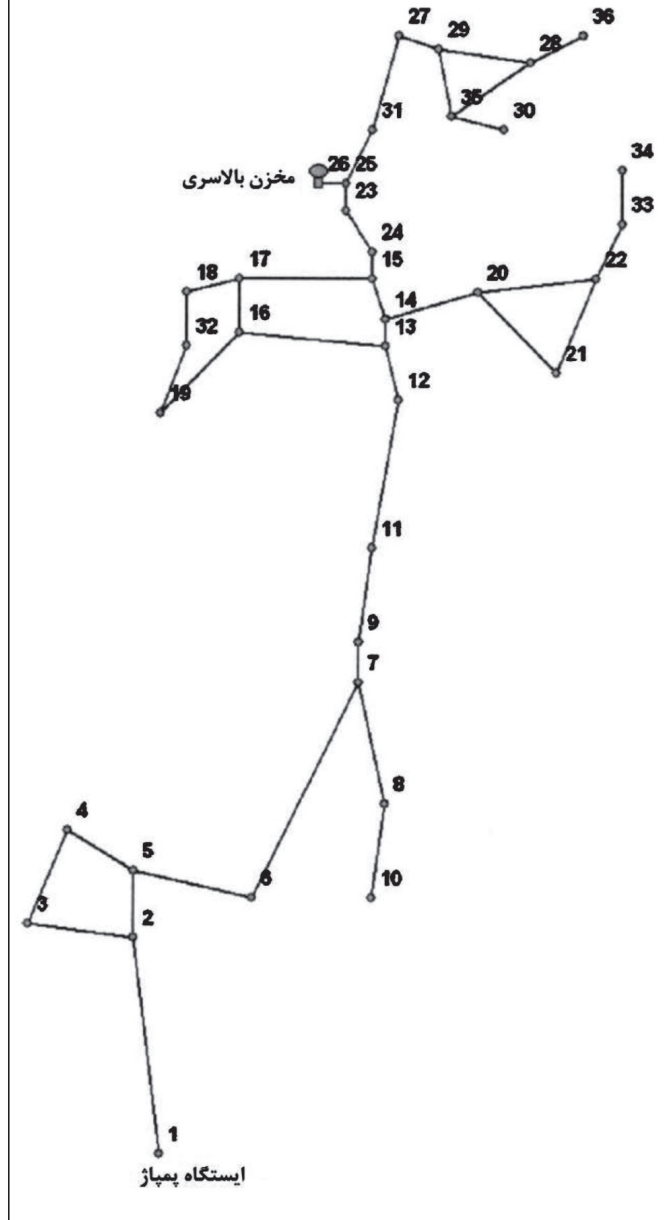
در جدول ۱ ملزومات محاسباتی برای دو سامانه نمونه به صورت خلاصه آورده شده است. همچنین در این جدول سه سامانه بزرگ‌تر توزیع آب مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در این جا در مورد آن‌ها بحث نمی‌گردد.

بایستی دقت شود که تعداد محاسبات در روش WCM برای هر بازه زمانی، نسبت به دقت مورد نیاز تغییری نمی‌کند. این در حالی است که در روش MOC تعداد محاسبات هر بازه زمانی تقریباً با میزان دقت متناسب است. یعنی برای مثال‌هایی که در ادامه می‌آید، تناسب $\frac{\text{تعداد محاسبات}}{\Delta t}$ با در نظر

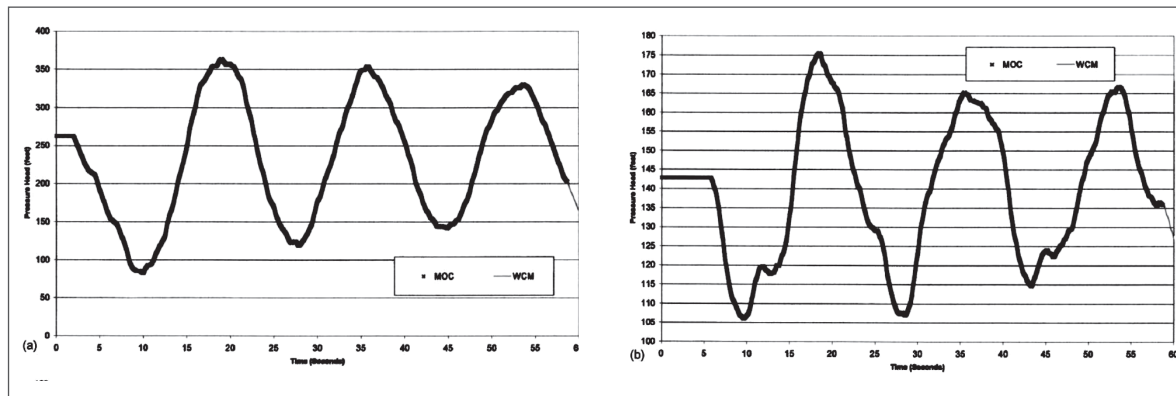
گرفتن دقت ۳ متر (۱۰ ft) دو برابر و با دقت ۱۲ متر (۴۰ ft) نصف می‌گردد.

مثال ۱:

اولین مثال که توسط streeter و wylie (۱۹۶۷) مورد مطالعه قرار گرفته، در شکل ۵ نشان داده شده است. این شبکه شامل ۹ لوله، ۵



شکل ۷: طرحی از مثال ۲



شکل ۸: مقایسه دو روش MOC و WCM در حالت گذرا برای دو ند ۱ و ۱۹

جدول ۳: مشخصات سامانه لوله‌کشی مثال ۲

شماره لوله	طول ft (m)	قطر in. (mm)	زبری	شماره ند	ارتفاع ft (m)	دبی gpm (L/s)
1	2,400 (732)	12 (305)	100	1	50 (15)	-694.4 (-44)
2	800(244)	12(305)	100	2	100 (30)	8 (0.5)
3	1,300(396)	8(203)	100	3	60 (18)	14 (0.9)
4	1,200(366)	8(203)	100	4	60 (18)	8 (0.5)
5	1,000(305)	12(305)	100	5	100 (30)	8 (0.5)
6	1,200(366)	12(305)	100	6	125 (38)	5 (0.3)
7	2,700(823)	12(305)	100	7	160 (49)	4 (0.3)
8	1,200(366)	12(305)	140	8	110 (34)	9 (0.6)
9	400(122)	12(305)	100	9	180 (55)	14 (0.9)
10	1,000(305)	8(203)	140	10	130 (40)	5 (0.3)
11	700(213)	12(305)	100	11	185 (56)	34.78 (2.2)
12	1,900(579)	12(305)	100	12	210 (64)	16 (1)
13	600(183)	12(305)	100	13	210 (64)	2 (0.1)
14	400(122)	12(305)	100	14	200 (61)	2 (0.1)
15	300 (91)	12(305)	100	15	190 (58)	2 (0.1)
16	1,500(457)	8(203)	100	16	150 (46)	20 (1.3)
17	1,500(457)	8(203)	100	17	180 (55)	20 (1.3)
18	600(183)	8(203)	100	18	100 (30)	20 (1.3)
19	700(213)	12(305)	100	19	150 (46)	5 (0.3)
20	350(107)	12(305)	100	20	170 (52)	19 (1.2)
21	1,400(427)	8(203)	100	21	150 (46)	16 (1.0)
22	1,100(335)	12(305)	100	22	200 (61)	10 (0.6)
23	1,300(396)	8(203)	100	23	230 (70)	8 (0.5)
24	1,300(396)	8(203)	100	24	190 (58)	11 (0.7)
25	1,300(396)	8(203)	100	25	230 (70)	6 (0.4)
26	600(183)	12(305)	100	27	130 (40)	8 (0.5)
27	250 (76)	12(305)	100	28	110 (34)	0 (0)
28	300 (91)	12(305)	100	29	110 (34)	7 (0.4)
29	200 (61)	12(305)	100	30	130 (40)	3 (0.2)
30	600(183)	12(305)	100	31	190 (58)	17 (1.1)
31	400(122)	8(203)	100	32	110 (34)	17 (1.1)
32	400(122)	8(203)	100	33	180 (55)	1.5 (0.1)
34	700(213)	8(203)	100	34	190 (58)	1.5 (0.1)
35	1,000(305)	8(203)	100	35	110 (34)	0 (0)
36	400(122)	8(203)	100	36	110 (34)	1 (0.1)
37	500(152)	8(203)	100	26	235 (72)	Tank
38	500(152)	8(203)	100	—	—	—

است. در شکل ۸ نتایج تحلیل گذرا در هر دو روش MOC و WCM به ترتیب برای دو ند ۱ و ۱۹ و برای حالت شبیه‌سازی خاموشی پمپ (کاهش جریان به صفر برای دوره ۶ S)، ترسیم شده‌اند. یک تولرانس طول ۶ متر (۲۰ ft) در تحلیل مورد استفاده قرار گرفته که منجر به بازه‌های زمانی ۰/۱۳۹ ثانیه شده است. همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد، نتایج حاصل در این دو روش نیز دقیقاً بر روی هم منطبق می‌باشند.

۷- نتیجه‌گیری

تحلیل ضربه کوچ برای یک طراحی مناسب سامانه لوله‌کشی بسیار ضروری می‌باشد. این تحلیل بسیار مهم می‌تواند به واسطه روش ریاضی MOC یا روش WCM بر پایه عملکرد امواج فشاری صورت پذیرد.

هر دو روش MOC و WCM قابلیت حل با دقت مسائل حالت گذرا (تغییر فشار و جریان) در شبکه‌های توزیع را با در نظر گرفتن اثرات مربوط به اصطکاک دارا می‌باشند. روش MOC

وصاله، یک مخزن، سه حلقه بسته و یک شیر واقع در پایین دست جریان می‌باشد. برای ایجاد حالت گذرا، شیر بسته می‌گردد. در جدول ۲، مشخصات مربوطه سامانه لوله‌کشی آورده شده است.

در شکل ۶ نتایج مربوط به مقایسه دو روش MOC و WCM برای حالت گذرا در شیر و وصاله شماره ۴ آورده شده است. از یک تولرانس طول ۶ متر (۲۰ ft) در تحلیل مورد استفاده قرار گرفته که منجر به بازه‌های زمانی ۰/۱ ثانیه شده است.

در شکل ۶ حل‌های مربوط به هر دو روش ترسیم شده است که نتایج تقریباً از یکدیگر غیر قابل تشخیص می‌باشند.

مثال ۲:

در این مثال، سامانه‌ای بزرگ‌تر و پیچیده‌تر مورد بررسی قرار گرفته که در شکل ۷ نشان داده شده است. در حقیقت این یک نمونه واقعی از سامانه لوله‌کشی است که شامل ۴۰ لوله، ۳۵ وصاله، یک پمپ تغذیه و یک مخزن است.

در جدول ۳، مشخصات مربوطه لوله‌ها خلاصه آورده شده



نیازمند محاسبات در نقاط داخلی به منظور بررسی انتشار امواج و تأثیر اصطکاک لوله بر حالت گذرا می‌باشد. روش WCM این تأثیرات را به واسطه امواج فشاری مورد بررسی قرار می‌دهد. بنابراین برای یک دقت محاسباتی معین، در روش WCM عموماً محاسبات کمتر و سرعت حل بیشتری وجود خواهد داشت. علاوه بر این، تعداد محاسبات در روش WCM، با افزایش دقت تغییری نخواهد کرد و در نتیجه به واسطه این دلایل استفاده از روش WCM برای سامانه‌های بزرگ لوله‌کشی مناسب‌تر خواهد بود.

