بررسی هیدرولیک جریان میرا درخطوط لوله انشعابی

حمید تائبی[1*] و منوچهر فتحی‌مقدم[2]

۱*- نویسنده مسئول، دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز h_taebi@yahoo.com
۲- استاد گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۴ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۲

چکیده

هرگونه تغییر در میزان دبی خط لوله که در اثر بسته شدن شیر یا خاموش شدن پمپ ایجاد می‌گردد، باعث نوسان در میزان سرعت و فشار جریان گردیده و در نتیجه سبب وقوع جریان میرا در سیستم انتقال آب می‌شود. این جریان با ایجاد موج‌های سریع و زودگذر موجب خطرات گوناگونی می‌شود. برای بررسی هیدرولیک جریان‌های میرا در خطوط لوله دارای انشعاب، مدلی مرکب از یک مخزن، لوله پلی‌اتیلن و شیر قطع و وصل در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران ساخته شد. آزمایش‌ها در نسبت‌های مختلف طول و قطر انشعاب به خط اصلی و در دبی ثابت ۴ لیتر بر ثانیه انجام گرفت. با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از مبدل‌های فشاری نصب شده در نقاط مختلف مدل چگونگی تغییر شکل و میرا شدن موج فشاری مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از آن در نمودارهایی ارائه گردید. با توجه به اینکه مقدار فشارهای حداکثر و حداقل پشت انشعاب به میزان قابل توجهی نسبت به حالت بدون انشعاب کاهش می‌یابد لذا روابطی جهت پیش‌بینی فشارهای کمینه و بیشینه بعد از انشعاب نیز ارائه گردید.

کلید واژه‌ها: جریان میرا، لوله انشعاب، موج فشاری، ضربه قوچ.

Investigation of Transient Flow in Branching Pipes

H. Taebi[1] and M. FathiMoghadam[2]

1- Ph.D. graduate, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
2- Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

Received:24 Dec. 2012 Accepted:22 Jan.2014

Abstract

Any change in the pipe discharge, caused by valve closure or shutting off the pump, results in fluctuations in velocity and pressure of the flow; which develops transient flow in the water conveyance system. This flow causes various risks by creating rapid and short waves. A model composed of a reservoir, a polyethylene pipe and check valve was made to examine hydraulic transient flow in branched pipe lines. The model was made in the laboratory of hydraulic and physical models of water science faculty in Shahid Chamran university. The experiment were done on different length and diameter ration of branch to mainline in a constant discharge of 4 lit/s. the data acquired of installed pressure transducers in different points of the model were used to demonstrate how pressure wave transformed and became transient and the results are presented in the following diagrams. As maximum and minimum pressures downstream the branches decrease significantly in compare with the system without branching, some equations were proposed for estimating the maximum and minimum pressures downstream the branches.

Key words: Transient flow, Branching pipes, Pressure wave, Water hammer.

مقدمه

مهندسان طراح معمولاً با خطوط انتقال و توزیعی سر و کار دارند که گاهی متشکل از لوله‌های سری و موازی هستند، لذا طبقه بندی بررسی هیدرولیک جریان در این لوله‌ها، امری مهم و ضروری می‌باشد. یکی از طبقه‌بندی‌های جریان، طبقه‌بندی براساس ثبات یا تغییر مشخصات جریان نسبت به زمان در یک مقطع معین است. هنگامی که مشخصات جریان دریک مقطع معین نسبت به‌زمان ثابت باشد، جریان را دائمی یا پایدار می‌نامند اما اگر مشخصات جریان نسبت به زمان تغییر کند، در این صورت آن را غیردائمی یا ناپایدار می‌گویند. شرایط حاکم بر جریان‌های پایدار در طول زمان دستخوش تغییر نمی‌شود، به همین دلیل این جریان‌ها در تبیین مفاهیم اولیه و تسهیل مطالعهٔ جریان ناپایدار به کار می‌روند. اما از آنجا که در عمل جریان‌های ناپایدار وجود دارند و غالباً هم باید به همین صورت بررسی شوند، عامل زمان در محاسبات ضرورت پیدا می‌کند. در واقع تمام جریان‌های ناپایدار، تبدیل یا انتقال کوتاه مدت یا بلند مدت از حالت جریان پایدار به حالت پایدار دیگری هستند و هرکدام از این حالت‌های پایدار، می‌تواند حالت سکون سیال باشد.

جریان‌های ناپایدار را می‌توان به دو بخش کلی تقسیم نمود. اولین نوع جریان ناپایدار که در واقع می‌توان آن را جریان شبه پایدار نامید، در حالی اتفاق می افتد که رفتار سیال از اینرسی و آثار کشسانی تأثیر نمی‌پذیرد. در جریان شبه پایدار تغییرات دبی و فشار بصورت تدریجی و در مدت زمان نسبتاً طولانی صورت می‌پذیرد و پس از طی این مدت زمان، جریان پایدار برقرار می‌شود. برای مثال می‌توان تخلیهٔ یک مخزن بزرگ، پایین افتادن سطح آب یک دریاچه و یا تغییرات تقاضای مصرف در یک شبکهٔ توزیع آب در طی شبانه روز را ذکر نمود. در جریان نوع دوم که می‌توان آن را جریان ناپایدار واقعی نامید، عامل اینرسی به تنهایی و یا همراه با اثر کشسانی نقش مؤثری ایفا می‌کند. اگر مقدار بخش اینرسی قابل توجه باشد اما اثر قابلیت کشسانی لوله و سیال ناچیز باشد، آنگاه جریان ناپایداری حاصل می‌شود که آن را با عنوان جریان ستون صلب می‌نامند. در یک جریان ناپایدار واقعی باید بخش کشسانی در لوله و سیال منظور گردد، این نوع جریان تحت عنوان جریان میرا مورد بررسی قرار گرفته می‌شود. هرگونه تغییر در میزان دبی خط لوله، که در اثر بسته-شدن شیر یا خاموش شدن پمپ ایجاد می‌گردد باعث نوسان در میزان سرعت و فشار جریان گردیده و در نتیجه سبب وقوع جریان میرا در سیستم انتقال آب می‌شود. این جریان با ایجاد موج‌های سریع و زودگذر موجب خطرات گوناگونی می‌شود. گاهی اوقات قدرت تخریبی این موج‌های فشار به حدی است که نتایج وخیمی به بار می‌آورد. ترکیدن خطوط لوله در سیستم‌های انتقال و شبکه‌های توزیع، خرابی و شکسته شدن شیرها، دریچه‌های کنترل و پمپ‌ها از نمونه‌های بارز تأثیر این پدیده می‌باشد.

با نگاهی اجمالی به گذشته، چنین استنباط می‌شود که از ۹۰ سال پیش، بررسی هیدرولیک جریان میرا در طرح‌های انتقال آب، در پروژه‌های مربوط به نیروگاه‌های آبی و سیستم‌های انتقال تحت فشار سیالات دیگر مورد توجه خاص قرار گرفت و از سال ۱۹۵۰ به بعد مطالعات مربوط به آن ابعاد وسیعی پیدا نمود و به‌صورت گسترده‌ای در طرح‌ها مطرح گردید. تاکنون کارهای آزمایشگاهی و تجربی متعددی توسط محققین در زمینه جریان میرا و ناپایدار در لوله‌ها انجام شده است. نقصان آشکار در این زمینه عدم وجود تحقیقات تجربی کافی در خصوص مطالعه و اندازه‌گیری متغیرهای جریان ناپایدار و غیر پریودیک ناشی از جریان‌های میرا در لوله‌ها می‌باشد. در ادامه به اهم کارهای تجربی و آزمایشگاهی که در سال‌های اخیر توسط محققین انجام پذیرفته است، اشاره می‌شود. برونن و همکاران[1] (۲۰۰۰)، یک مدار آزمایشی برای بررسی پروفیل سرعت و اثر تنش برشی ناپیوسته دیواره در جریان گذرای لوله‌ها تهیه نمودند. این مدار از یک لوله پلی اتیلن به طول ۳۵۲ متر، قطر داخلی ۹۳/۸ میلیمتر و ضخامت دیواره ۸/۱ میلیمتر تشکیل شده بود. یک شیر کره‌ای نیز برای تنظیم دبی در انتهای لوله نصب شد و برای اندازه‌گیری پروفیل سرعت از یک سرعت سنج آلتراسونیک داپلر استفاده کردند. در این تحقیق آنها به این نتیجه رسیدند که مدل‌های یک‌بعدی جریان‌های میرا با استفاده از تنش برشی دیواره نیمه دائم قادر به پیش‌بینی صحیح نرخ میرایی فشار نیستند. کواس و همکاران[2] (۲۰۰۴)، یک مدار آزمایش مدرن به‌منظور مطالعه رفتار پدیده ضربه قوچ در لوله-های ویسکوالاستیک و همچنین تحلیل گذاری معکوس برای آشکار سازی محل نشت در خطوط لوله طراحی نمودند. این مدار از یک لوله پلی‌اتیلن به طول ۲۷۷ متر و قطر داخلی ۵۰/۶ میلیمتر تشکیل شد و شامل یک پمپ و مخزن تحت فشار در بالادست و یک شیر در پایین‌دست می‌باشد. جریان سیال به کمک یک دبی‌سنج مغناطیسی اندازه‌گیری گردید. در این مدار از یک سیستم جمع‌آوری داده‌ها آنالوگ به دیجیتال ، چهار فشارسنج دیجیتال و سه گیج کرنش و یک کامپیوتر استفاده شد. در این تحقیق به‌طور ویژه اثر ویسکوالاستیسیته به روی نرخ میرایی فشار در لوله به هنگام وجود پدیده ضربه قوچ بررسی شده است. برگانت و تیجسلینگ[3] (۲۰۰۸)، کارهای متعددی از منظر تجربی و تئوری در زمینه پدیده ضربه قوچ انجام دادند. در زمینه آزمایشگاهی آنها مداری شامل دو مخزن با اختلاف رقوم ۲/۰۳ متر در بالادست و پایین‌دست، به‌منظور مطالعه پارامترهای مؤثر بر جریان‌های میرا تهیه نمودند. جریان میرا با بسته

1- Brunone et al.
2- Covas et al.
3- Bergant and Tijsseling

شدن ناگهانی شیر پایین‌دست تشکیل می‌گردید. فشارسنج‌های دیجیتال در محل شیر و در وسط لوله وظیفه ثبت تغییرات فشار را بر عهده داشتند. در این تحقیق آنها اثر سرعت موج فشاری، کاویتاسیون و شکل سازه را بر روی ضربه قوچ بررسی نمودند. حقیقی پور (۱۳۹۱)، به بررسی هیدرولیک جریان میرا در خطوط لوله سری با استفاده از مدل فیزیکی و عددی پرداخت. در مدل جدید توسعه یافته توسط او از دو ضریب اصلاحی K_2 و K_1 در ارتباط با بخش‌های شتاب زمانی و شتاب مکانی جهت تخمین بهتر اصطکاک ناپایدار استفاده شد.

با وجود اینکه در حال حاضر مکانیزم تشکیل ضربه قوچ کاملاً شناخته شده است، اما به علت وسعت و گستردگی ابعاد مسئله ضربه قوچ و وجود شرایط گوناگون مکانی و زمانی در این فرآیند، دامنه تحقیقات در این زمینه ادامه داشته و هنوز دنیای وسیعی از مجهولات و مشکلات ناشی از ضربه قوچ در برابر محققین قرار دارد که کوشش برای حل و فصل آنها می‌تواند زمینه مناسبی را برای تحقیقات ایجاد نماید. لذا هدف از این تحقیق بررسی تأثیر طول و قطرهای مختلف انشعاب بر فشار ناشی از ضربه قوچ و استخراج معادله‌ای جهت تخمین حداکثر و حداقل فشار ناشی از ضربه قوچ در خطوط لوله دارای انشعاب می‌باشد.

از خصوصیات عمده پدیده ضربه قوچ، تغییرات فشار و حرکت موج فشار است که در اندک مدتی تمام سیستم انتقال جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این امر فقط با موجی که با سرعت زیاد حرکت می‌کند قابل توجیه می‌باشد. باید توجه داشت که فشار ناشی از ضربه قوچ تحت شرایط مختلف مکانی و زمانی تفاوت می‌نماید. علل وقوع جریان‌های میرا که منجر به ایجاد موج فشار می‌شوند متنوع بوده و از نقش وسایل کنترل یا نحوه بهره‌برداری از سیستم تحت فشار گرفته تا شکسته شدن ناگهانی لوله‌های جریان را شامل می‌شوند. به طور کلی می‌توان سرعت موج فشاری را به صورت زیر بیان کرد (نجمایی، ۱۳۷۴):

$$a = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1+\frac{K}{E}\frac{D}{e}(C)}} \qquad (۱)$$

که در آن e: ضخامت جدار لوله، K: مدول کشسانی حجمی سیال ، E: مدول الاستیسیته مجرا و C: ضریبی است که به چگونگی مهار لوله وابسته می‌باشد.

معادله‌های کلاسیک حاکم بر جریان میرا که شامل معادلات پیوستگی و مومنتم می‌باشد به شکل ذیل بیان می‌گردد (کوچک‌زاده و پرورش ریزی، ۱۳۸۴):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{gA}{a^2}\frac{\partial H}{\partial t} = 0 \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA}Q|Q| = 0 \qquad (۳)$$

که در معادله‌های فوق، Q: دبی جریان، H: ارتفاع مانومتریک برای هر سطح مرجع اختیاری، f: ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ، D: قطر داخلی لوله، A: سطح مقطع عرضی لوله، a: سرعت موج فشاری، x: فاصله طولی و t: بیانگر زمان می‌باشد. معادله‌های فوق، معادله‌های دیفرانسیل غیرخطی با متغیرهای جزیی هستند که جزء معادله‌های هذلولوی طبقه‌بندی می‌شوند. این معادله‌ها حل عمومی ندارند اما با صرف‌نظر از اجزای غیرخطی و یا خطی کردن آنها، راه‌حل‌های ترسیمی و تحلیلی مختلفی برای آنها پیدا شده است. تمامی این روش‌ها تقریبی‌اند و برای تحلیل سیستم‌های پیچیده و یا سیستم‌هایی که دارای شرایط مرزی متنوع هستند، کاربردی ندارند. لذا برای حل این معادله‌ها از روش‌های مختلف عددی استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی از قبیل روش خطوط مشخصه، روش تفاضل‌های محدود و روش اجزای محدود، برای حل معادله‌های حاکم بر جریان ناپایدار به کار رفته‌اند (کوچک‌زاده و پرورش ریزی، ۱۳۸۴). از کارهای آزمایشگاهی جهت صحت سنجی و تعیین دقت روش‌های فوق استفاده می‌گردد. لازم به ذکر است روابط حاکم بر بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی را نمی‌توان مستقیماً از قوانین حاکم بر حرکت سیالات و تئوری‌های موجود نظیر قوانین بقای جرم، انرژی، اندازه حرکت و یا معادله‌های انتشار و استهلاک انرژی به‌دست آورد. این موضوع می‌تواند به علت عدم شناخت از تأثیر برخی پارامترهای مؤثر و یا میزان و یا محدوده تأثیر آن پارامترها بسته به شرایط جریان باشد. از این رو در چنین مواردی تلاش می‌گردد با استفاده مدل‌های آزمایشگاهی و با بهره‌گیری از تحلیل ابعادی، تأثیر آن پارامترها را بر هیدرولیک جریان مشخص نمود.

مواد و روش‌ها

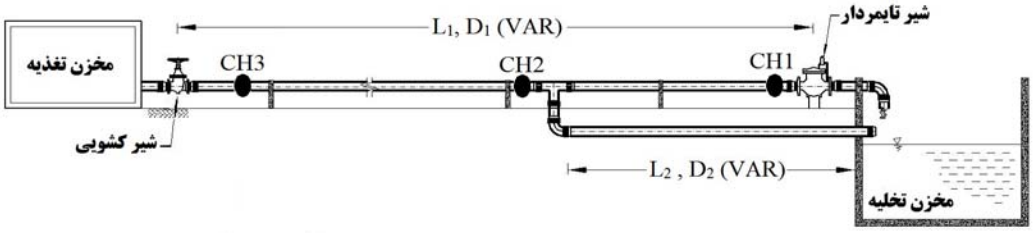
آنالیز ابعادی

برای تحلیل چگونگی تغییر شکل موج فشاری در هنگام وقوع جریان میرا، می‌توان به پارامترهای زیر اشاره کرد:

–خصوصیات سیال:جرم‌مخصوص (ρ) ولزوجت سینماتیک (υ)

– خصوصیات سینماتیکی جریان: سرعت متوسط جریان در لوله اصلی (V_1) سرعت متوسط جریان در لوله انشعاب (V_2)، شتاب ثقل (g)، سرعت موج فشاری لوله اصلی (a_1) و سرعت موج فشاری لوله انشعاب a_2

– خصوصیات مرزی و هندسی جریان شامل: قطر لوله اصلی(D_1)، قطر لوله انشعاب (D_2)، طول لوله اصلی (L_1)، طول لوله



شکل ۱- نمای کلی سیستم طراحی شده

– انشعاب (L_2)، ارتفاع آب در مخزن (H_0)، زمان بسته شدن شیر (T) و پارامتر معرف فشار ناشی از جریان میرا روی خط لوله اصلی (H).

با استفاده از روش باکینگهام و با درنظر گرفتن متغیرهای ρ ، V_1 و D_1 به عنوان متغیرهای تکراری، پارامترهای بدون‌بعد اولیه به صورت رابطه (۴) ارائه گردید:

$$f(\mathrm{Re}_1, Fr_1, Ma_1, Ma_2, \frac{V_2}{V_1}, \frac{D_2}{D_1}, \frac{L_1}{D_1}, \frac{L_2}{D_1}, \frac{H_0}{D_1}, \frac{V_1 T}{D_1}, \frac{H}{D_1}) = 0 \qquad (۴)$$

با توجه به اینکه در مسائل عملی جریان میرا، عدد ماخ خیلی کوچک می‌باشد، لذا این عدد بدون‌بعد در تحلیل این نوع جریان دارای اهمیت چندانی نمی‌باشد. در مجاری تحت‌فشار از تشابه رینولدزی استفاده می‌گردد، لذا از عدد فرود جریان نیز صرف‌نظر می‌گردد. ضمناً به‌دلیل اینکه تأثیر سرعت جریان در پارامتر عدد رینولدز جریان در نظر گرفته شده است؛ لذا، از عدد بدون بعد سرعت جریان نیز صرف‌نظر شده است. با استفاده از معکوس نمودن، ضرب کردن و یا به‌توان رساندن پارامترهای بدون‌بعد فوق می‌توان پارامترهایی که مطلوب‌تر و مورد نظر می‌باشند، به‌دست آورد. بنابراین رابطه (۴) به شکل زیر ساده می‌شود:

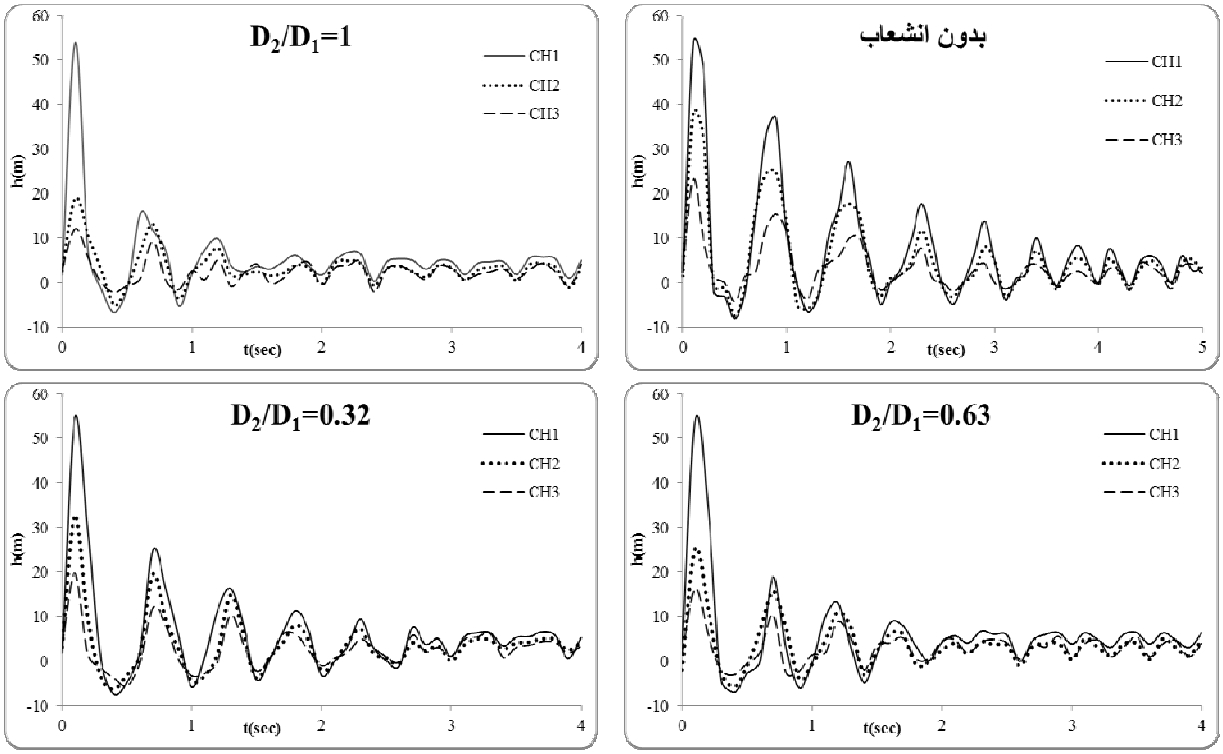
$$\frac{H}{H_0} = f(\mathrm{Re}_1, \frac{D_2}{D_1}, \frac{L_2}{L_1}, \frac{a_1 T}{L_1}) \qquad (۵)$$

مدل فیزیکی

با توجه به هدف این تحقیق که بررسی هیدرولیک جریان میرا در خطوط لوله تحت فشار انشعابی انعطاف‌پذیر می‌باشد، یک سیستم جریان میرا در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز احداث گردید. این سیستم از یک مخزن، لوله پلی‌اتیلن و شیر قطع و وصل جریان تشکیل شد. نمایی شماتیک از پلان کلی مدل در شکل (۱) نمایش داده شده است. لوله‌ها از جنس پلی اتیلن بوده و شیر آلات چدنی می‌باشد. لوله‌ها در طول مسیر خود بر روی ساپورت قرار گرفته تا با فاصله داشتن از کف آزمایشگاه امکان نصب وسایل اندازه‌گیری بر روی آن فراهم گردد. مطابق شکل(۱) از لوله‌هایی با قطرهای ۲۰، ۴۰ و ۶۳ میلی‌متر و به طول‌های ۸ و ۱۶ متر برای انشعابات به تناوب استفاده گردید. آزمایش‌ها برای دبی ثابت ۴ لیتر بر ثانیه، سه نسبت $D_2/D_1 = 1, 0.63, 0.32$ ، دو نسبت $L_2/L_1 = 0.33, 0.2$ و ۶ زمان بسته شدن شیر انجام گرفت. کمترین زمان بسته شدن شیر ۰/۱ ثانیه انتخاب شد که برای کلیه حالت‌های آزمایشی، به عنوان بستن سریع تعریف می‌گردد $(t < 2L/a)$. برای بسته شدن کند نیز زمان‌های ۱، ۲، ۳، ۵ ثانیه انتخاب شدند.

ر این تحقیق اندازه‌گیری فشار دینامیکی در سه نقطه توسط مبدل‌های فشاری انجام می‌گیرد. محل نصب مبدل‌های فشاری مطابق شکل(۱)؛ پشت شیر خروجی(CH1) ، قبل از انشعاب(CH2) و به‌فاصله ۹ متر از شیر ورودی(CH3) می‌باشد. مبدل‌های فشاری مورد استفاده در این تحقیق، دارای دامنه اندازه گیری تا ۱۶ بار با دقت ۰/۱ درصد در حالت بیشینه مقیاس[1] و با خروجی ۴ تا ۲۰ میلی آمپر می‌باشند. همچنین برای تنظیم دبی از یک شیر قطع و وصل در ورودی به سیستم و برای اندازه گیری دبی از فلومتر آلتراسونیک UF6000 استفاده شد. جهت ثبت داده‌های مربوط به فشار در هنگام وقوع جریان میرا، یک دستگاه دیتالاگر طراحی شد. این دستگاه مجهز به هشت کانال مبدل آنالوگ به دیجیتال مجزا بوده و قابلیت برداشت ۱۰ هزار داده در ثانیه را دارد. داده‌های برداشت شده توسط کابل USB به دستگاه کامپیوتر انتقال می‌یابند. از مهمترین خصوصیات این دستگاه همزمانی برداشت داده‌ها بوده و فاقد مولتی پلکسر[2] می‌باشد. دستگاه دارای زمان‌سنج داخلی بوده و قابل تنظیم جهت برداشت نمونه با سرعت‌های مختلف می‌باشد. همچنین این دستگاه دارای ورودی کلاک خارجی بوده که نمونه‌گیری در زمان‌های تعیین شده توسط سایر دستگاه‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد. جهت ایجاد جریان میرا در مدل، از یک شیر قطع و وصل زمان‌سنج-دار استفاده گردید.

1- Full scale
2- Multiplexer



شکل۲- نوسانات فشاری مربوط به $T=0.1$ ثانیه و $\frac{L_2}{L_1}=0.33$ برای حالت بدون انشعاب و در نسبت‌های مختلف $\frac{D_2}{D_1}$

نتایج و بحث

بررسی اثر تغییرات قطر و طول انشعاب بر فشارهای ایجاد شده در هنگام وقوع جریان میرا

با توجه به نصب مبدل‌های فشاری در نقاط مختلف و به تعداد کافی در طول سیستم انتقال آب، به بررسی چگونگی تغییر شکل و میرا شدن موج فشاری در نسبت‌های طولی و قطری مختلف انشعاب پرداخته می‌شود که در ادامه نتایج آن به صورت مبسوط ارائه شده است. نتایج مربوط به نوسانات فشاری به‌وقوع پیوسته بر اثر بسته شدن سریع شیر قطع و وصل در مدت زمان ۰/۱ ثانیه برای $\frac{L_2}{L_1}=0.33$ در حالت بدون انشعاب و در نسبت‌های مختلف $\frac{D_2}{D_1}$ آزمایشی در شکل (۲) ارائه شده است.

این نمودارها نشان می‌دهند که هرچه محل اندازه‌گیری نوسانات فشار به شیر قطع و وصل جریان (عامل وقوع جریان‌های میرا) نزدیک‌تر باشد، حداکثر فشار بیشتر و حداقل فشارکمتری در این نقاط به وقوع می‌پیوندد. علت این امر را می‌توان با توجه به تغییرات خط گرادیان هیدرولیکی در هنگام وقوع جریان میرا و همچنین وجود افت اصطکاک طولی و افت ویسکوالاستیک خط لوله در مسیر انتقال امواج، توجیه نمود.

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، وجود انشعاب در طول خط لوله زمان میرایی موج فشاری ایجاد شده بر اثر بستن شیر را کاهش می‌دهد. لازم به‌توضیح است که بخشی از امواج مستقیم ناشی از بسته شدن شیر در محل انشعاب منعکس و بخشی دیگر در طول خط انتقال و انشعاب منتقل می‌گردد. لذا تأثیر توام امواج انعکاسی و امواج منتقل شده در طول خط اصلی (که شدت کمتری نسبت به موج مستقیم دارد) سبب میرایی زودتر جریان نسبت به حالتی که انشعابی در خط لوله وجود ندارد می‌شود. شکل (۲) همچنین نشان می‌دهد که با افزایش قطر انشعاب میرایی مقادیر حداکثر و حداقل فشار در زمان کوتاه‌تری صورت می‌پذیرد. میرایی در زمان کوتاه‌تر به این دلیل اتفاق می‌افتد که انشعاب با قطر بیشتر موج انعکاسی بزرگ‌تری را تولید می‌کند. این موج انعکاسی بزرگتر باعث کاهش مقادیر حداکثر و حداقل فشار در موج‌های دوم به بعد شده و در نهایت سبب میرا شدن سریع‌تر جریان می‌گردد.

در بخش‌های مختلف شکل (۳) تغییرات مقادیر فشار بیشینه و کمینه به‌وقوع پیوسته در مبدلهای فشاری نصب شده در طول مدل ارائه شده است. نمودارهای ارائه شده در شکل (۳) بیانگر این مطلب می‌باشند که با افزایش زمان بسته شدن شیر قطع و وصل، مقدار فشار بیشینه کاهش و فشار کمینه افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل(۳) نشان داده شده است، مقادیر فشار بیشینه و کمینه مربوط به مبدل‌های که بعد از انشعاب قرار گرفته‌اند کاهش قابل توجهی نسبت به حالت بدون انشعاب داشته‌اند. لازم به ذکر است که با افزایش قطر انشعاب فشار بیشینه کاهش و فشارکمینه افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می کند.

این نمودارها همچنین نشان می‌دهند که مقادیر فشار حداکثر ثبت شده توسط ترانسدیوسرهای فشاری پشت شیر ($CH1$)، در حالت بدون

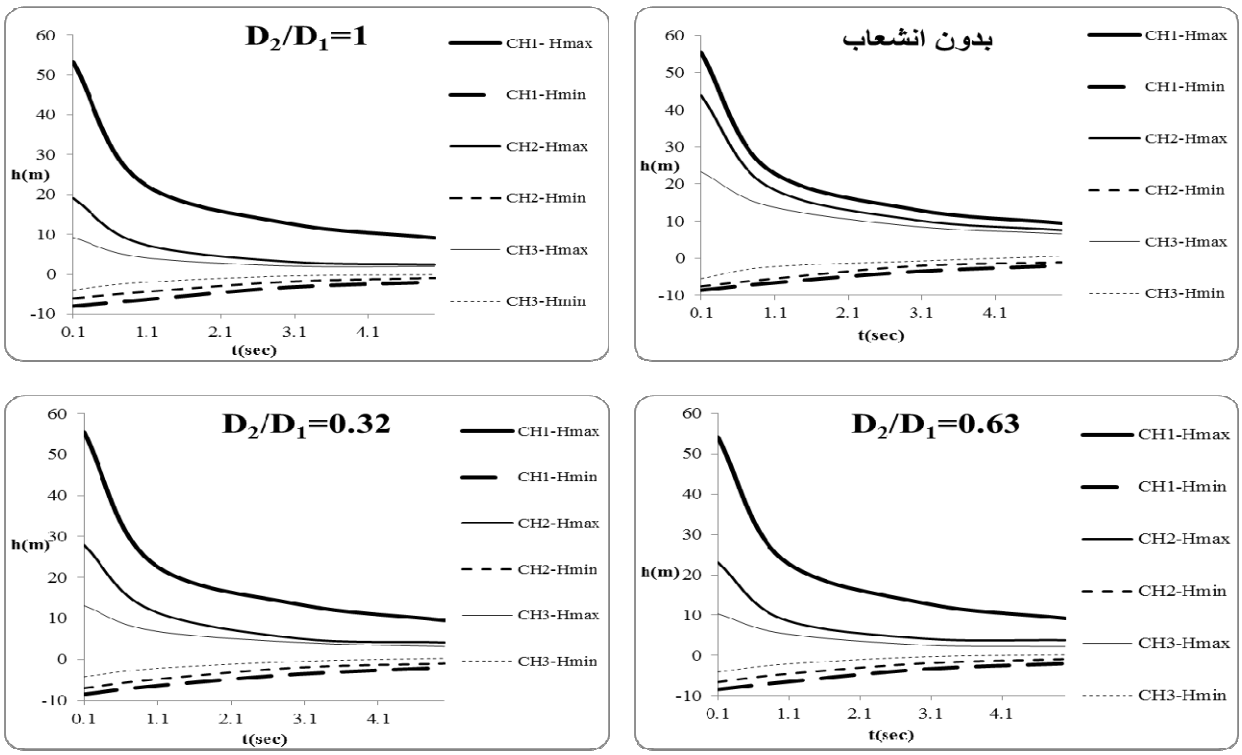
انشعاب و با انشعاب تفاوت فاحشی ندارند. مقادیر حداکثر فشار در این کانال ($CH1$) با افزایش قطر انشعاب تغییر محسوسی نمی‌کند. این پدیده را این‌گونه می‌توان توجیه کرد که حداکثر فشار ایجاد شده پشت شیر بلافاصله پس از بسته شدن شیر ایجاد می‌گردد و این بدان معنی است که موج فشاری ناشی از بسته شدن شیر قبل از اینکه به محل انشعاب برسد این فشار را ایجاد کرده است لذا می‌توان نتیجه گرفت نصب انشعاب تأثیری بر حداکثر فشار ایجاد شده پشت شیر ندارد.

با توجه به نصب ترانسدیوسرهای فشاری در مکان‌های مختلف سیستم انتقال آب (از پشت شیر قطع و وصل تا مخزن تأمین آب)، پروفیل تغییرات فشاری بیشینه و کمینه به صورت نمودارهایی ارائه می‌گردد. شکل‌های (۴) و (۵) تغییرات مقادیر بی‌بعد حداکثر و حداقل فشار ثبت شده توسط ترانسدیوسرهای فشاری نصب شده را در برابر طول بی‌بعد خط انتقال را برای نسبت‌های مختلف $\frac{D_2}{D_1}$ و $\frac{L_2}{L_1}$ در دبی ۴ لیتر بر ثانیه نمایش می‌دهند. لازم به توضیح می‌باشد مقادیر حداکثر و حداقل فشار بی‌بعد از تقسیم مقدار حداکثر و حداقل فشار ثبت شده توسط ترانسدیوسرهای فشاری بر حداکثر و حداقل فشار محاسبه شده از فرمول ژاکوفسکی ($\Delta H = \pm \frac{a\ \Delta V}{g}$) به‌دست آمده است. مقادیر طول بی‌بعد نیز از تقسیم فاصله از مخزن (X) بر طول خط انتقال (L) به‌دست آمد. لازم به‌ذکر می‌باشد این پروفیل‌های طولی برای بسته شدن سریع شیر ($t = 0.1$ ثانیه) ترسیم شده‌اند.

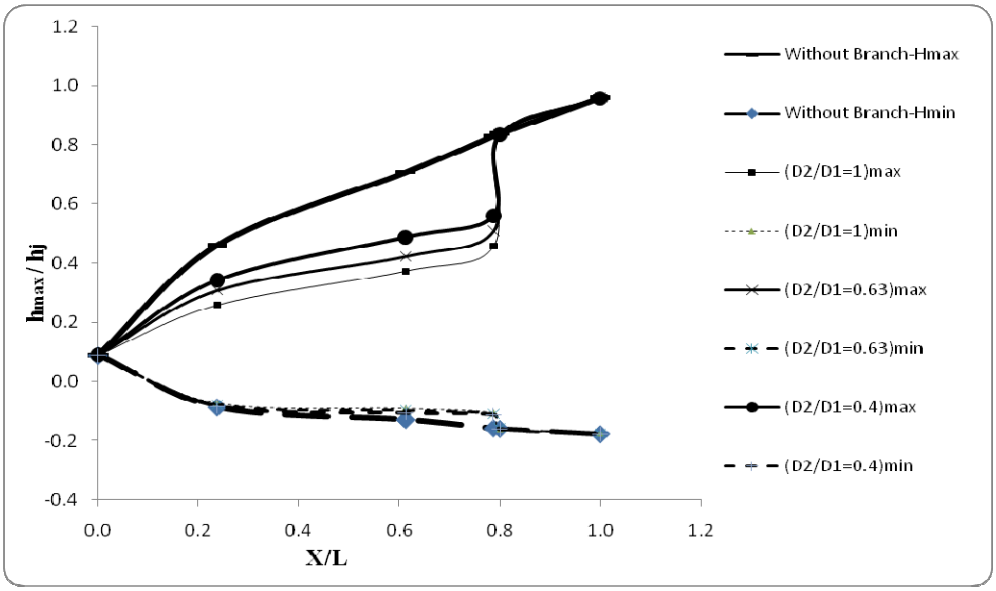
همان‌گونه که در شکل‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌شود فشارهای بیشینه و کمینه مربوط به مبدل‌های که بعد از انشعاب قرار گرفته‌اند کاهش قابل توجهی نسبت به حالت بدون انشعاب دارند. تغییرات فشاری ایجاد شده در مکان انشعاب به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. این تغییرات از محل مخزن تا محل انشعاب تقریباً به صورت خطی و بعد از آن با افزایش ناگهانی شیب مواجهه می‌شود، که ناشی از تغییرات سرعت سیال و سرعت موج فشاری می‌باشد. لازم به ذکر است که با افزایش قطر انشعاب اختلاف فشار نسبت به حالت بدون انشعاب بیشتر می‌شود. از شکل‌های (۴) و (۵) می‌توان به این نتیجه رسید که هر چه محل نصب انشعاب به شیر (عامل به‌وجود آورنده جریان میرا) نزدیک‌تر باشد طول بیشتری از خط لوله مورد حفاظت قرار می‌گیرد.

استخراج رابطه تخمین حداکثر و حداقل فشار در کانال پشت انشعاب (CH2)

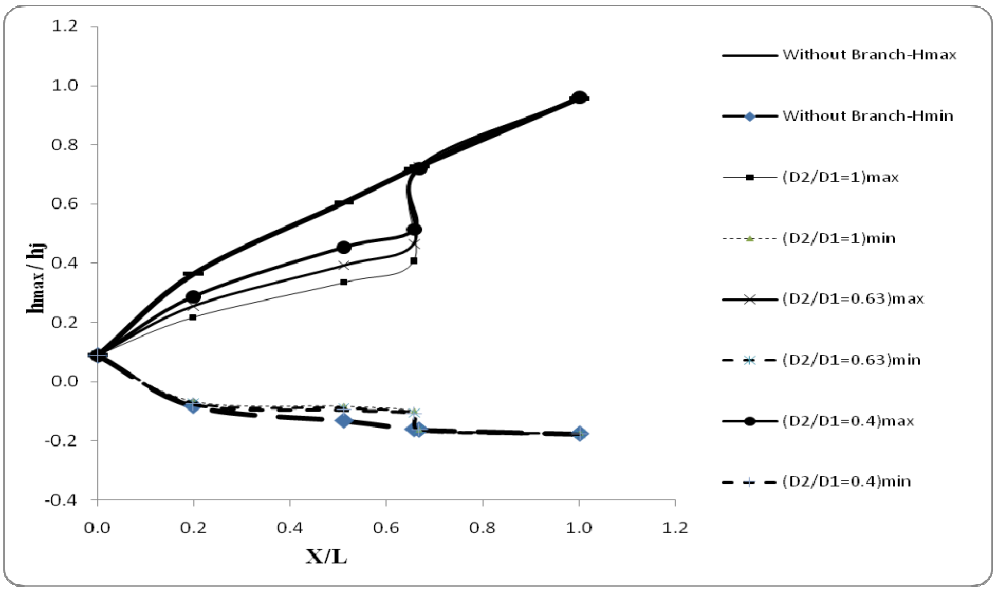
نظر به اهمیت موقعیت یا شکل هندسی سیستم انتقال آب در تشدید یا کنترل فشار ناشی از ضربه قوچ و با توجه به اینکه یکی از عوامل مهم در شکل هندسی سیستم‌های انتقال آب، وجود انشعاب در



شکل۳- نمودار تغییرات مقادیر فشار حداکثر و حداقل در زمان‌های مختلف بسته شدن شیر برای $\frac{L_2}{L_1} = 0.33$ برای حالت بدون انشعاب و در نسبت‌های مختلف $\frac{D_2}{D_1}$



شکل٤- پروفیل طولی مقادیر فشار بیشینه و کمینه بی‌بعد در $\frac{L_2}{L_1}=0.2$



شکل٥- پروفیل طولی مقادیر فشار بیشینه و کمینه بی‌بعد در $\frac{L_2}{L_1}=0.33$

مسیر خط لوله می‌باشد، لذا برآورد مقادیر حداکثر و حداقل فشار در این نقطه (بعد از انشعاب) بسیار مهم می‌باشد. در این تحقیق پس از تحلیل داده‌های فشاری ثبت شده در کانال پشت انشعاب و آنالیز آماری این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS، رابطه‌ای برای تخمین مقادیر فشار حداکثر و حداقل در این کانال (*CH2*) اسخراج شد. با توجه به اینکه حداکثر و حداقل فشار ایجاد شده در حالت بستن تند و کند شیر متفاوت می‌باشد لذا بسته به زمان بسته شدن شیر دو معادله استخراج گردید.

روابط استخراج شده جهت تخمین حداکثر فشار در کانال پشت انشعاب(CH2):

الف) بسته شدن کند:

$$(H_{\max})_r = 4.64 - 1.86\left(\frac{D_2}{D_1}\right) - 4.34\left(\frac{L_2}{L_1}\right) - 0.12\left(\frac{T}{T_c}\right) \quad \begin{cases} R^2 = 0.766 \\ MSE = 0.51 \end{cases} \quad (۶)$$

ب) بسته شدن تند:

$$(H_{\max})_R = 0.03 - 0.34(\frac{D_2}{D_1}) - 0.61(\frac{L_2}{L_1}) \quad \begin{cases} R^2 = 0.92 \\ MSE = 0.034 \end{cases} \quad (۷)$$

در روابط (۶) و (۷)، $(H_{\max})_R = (\frac{H_{\max} - H_0}{H_0})$ است. در این رابطه (H_0) بیانگر مقدار فشار اولیه کانال پشت انشعاب قبل از بسته شدن شیر می‌باشد.

روابط استخراج شده جهت تخمین حداقل فشار در کانال پشت انشعاب($CH2$):

الف) بسته شدن کند:

$$(H_{\min})_r = 2.56 - 0.53(\frac{D_2}{D_1}) - 1.07(\frac{L_2}{L_1}) - 0.04(\frac{T}{T_c}) \quad \begin{cases} R^2 = 0.801 \\ MSE = 0.143 \end{cases} \quad (۸)$$

ب) بسته شدن تند:

$$(H_{\min})_r = 3.24 - 0.88(\frac{D_2}{D_1}) - 1.44(\frac{L_2}{L_1}) \quad \begin{cases} R^2 = 0.825 \\ MSE = 0.133 \end{cases} \quad (۹)$$

در روابط (۸) و (۹)، $(H_{\min})_r = (\frac{H_0 - H_{\min}}{H_0})$ می‌باشد که در آن H_0 مقدار فشار اولیه کانال پشت انشعاب قبل از بسته شدن شیر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

- هرچه محل اندازه‌گیری نوسانات فشار به شیر قطع و وصل جریان (عامل وقوع جریان‌های میرا) نزدیک‌تر باشد، حداکثر فشار بیشتر و حداقل فشار کمتری در این نقاط به وقوع می‌پیوندد و با افزایش قطر انشعاب تغییرات مقادیر بیشینه و کمینه کمتر می‌گردد.
- نصب انشعاب در طول خط لوله زمان میرایی موج فشاری ایجاد شده بر اثر بستن شیر را کاهش می‌دهد.
- با افزایش قطر انشعاب موج فشاری ناشی از بسته شدن شیر در زمان کوتاه‌تری میرا می‌گردد.
- نظر به اینکه در کلیه آزمایش‌های مربوط به این تحقیق، شیر قطع و وصل پایین دست به صورت خطی بسته می‌شود، هرچه زمان بسته شدن کوتاه‌تر باشد، تفاوت بین مقادیر فشار بیشینه و کمینه بیشتر خواهد شد.
- در پروفیل طولی تغییرات فشاری مشاهده شد که فشارهای بیشینه و کمینه مربوط به مبدل‌های که بعد از انشعاب قرار گرفته‌اند کاهش قابل توجهی نسبت به حالت بدون انشعاب داشتند. لازم به ذکر است که با افزایش قطر انشعاب اختلاف فشار نسبت به حالت بدون انشعاب بیشتر می‌شود.

– مقادیر فشارهای حداکثر و حداقل پشت انشعاب به میزان قابل توجهی نسبت به حالت بدون انشعاب کاهش می‌یابند. روابط (۶) الی (۹) جهت پیش بینی فشارهای کمینه و بیشینه بعد از انشعاب برای بسته شدن تند و کند شیر پایین‌دست ارائه گردید.

منابع

۱- حقیقی پور، ص. ۱۳۹۱ بررسی هیدرولیکی جریان‌های میرا درخطوط لوله سری با استفاده از مدل فیزیکی و عددی. رساله دکتری، رشته سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- کوچک‌زاده، ص. و ع. پرورش‌ریزی ۱۳۸۴ مقدمه‌ای بر هیدرولیک جریان ناپایدار. انتشارات دانشگاه تهران.

۳- نجمایی، م ۱۳۷۴ ضربه قوچ. ویرایش اول، چاپ اول، انتشارات مولف.

4- Bergant, A and A.S Tijsseling 2008 Parameters affecting water-hammer wave attenuation, shape and timing. Journal of Hydraulic Research, 46(3): 382–391.

5- Brunone, B., Karney, B.W., Mecarelli, M and M. Ferrante 2000 Velocity profiles and unsteady pipe friction in transient flow. Journal of Water Resources Planning and Management, 126(4): 236–244.

6- Covas, D., Ramos, H., Graham, N and C. Maksimovic 2004 Application of hydraulic transients for leak detection in water supply systems. Water Science and Technology: Water Supply, 4(5–6): 365–374.