

## «یادداشت تحقیقاتی»

# بررسی تغییرات کاهش فشار ناشی از جریان میرای افزایش یافته در لوله‌های سری

ساره زرگر<sup>1</sup>، منوچهر فتحی مقدم<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

2- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

\* اهواز، کد پستی 61357-83151

mfathi@scu.ac.ir

**چکیده-** وجود جریان غیرماندگار در سیستم‌های آبرسانی تحت فشار امری اجتناب‌ناپذیر بوده که سیستم‌های انتقال را در معرض خطرات و آسیب‌های جدی نیز قرار می‌دهد. مسیر عبور مجرای جریان، خطوط انتقال را به سوی طرح لوله‌های سری واگرا و همگرا و وجود تبدیل‌های تدریجی و ناگهانی سوق می‌دهد. تغییر سطح مقطع، عامل ایجاد فشارهای منفی در مسیر، به‌ویژه در محدوده تغییرات قطر می‌شود. از این رو هدف اصلی این تحقیق بررسی تغییرات موج فشاری در مسیر خطوط لوله‌های سری واگرا و همگرا، به‌ویژه در محل تغییر قطر به صورت آزمایشگاهی است. آزمایش‌ها در حالت‌های مختلف باز شدن آهسته و سریع شیر انجام شد و نتایج نشان داد که در سیستم واگرا تغییر سرعت موج فشاری سبب شد که تغییرات فشار ناشی از باز شدن شیر پایین دست سیستم، در مقطع تغییر قطر، بیشتر از مقطع کنار شیر شود.

**کلیدواژگان:** جریان میرای افزایش یافته، کاهش فشار، موج فشاری، لوله‌های سری.

## 1- مقدمه

نسبت به ضربه قوچ برخورددار است. نتایج حاصل از کاربرد این نظریه زمانی می‌تواند رضایت‌بخش باشد که رابطه بین زمان بازکردن یا بستن شیر کنترل ( $T$ ) و طول خط لوله جریان ( $L$ ) و سرعت انتقال موج ( $c$ ) به صورت  $T(sec) > \frac{2L(m)}{c}$  باشد (آشفته، 1369؛ کوچک‌زاده و پرورش‌ریزی، 1384).

با بررسی تغییرات فشار و به‌ویژه فشارهای منفی بیشینه، دست کم نقاط مستعد کاویتاسیون مشخص می‌شود. اغلب

تحلیل جریان‌های میرا در مجاری بسته، امکان بررسی تغییرات زمانی و مکانی موج فشاری ناشی از بازکردن و یا بستن ناگهانی شیر در مسیر خطوط انتقال را فراهم می‌آورد. تحلیل جریان میرا (گذرا) به دو نظریه ستون صلب و نظریه کشسانی (ضربه قوچ) بسته به چگونگی تغییرات در جریان صورت می‌گیرد. تحلیل جریان میرا در نظریه ستون صلب ساده‌تر بوده، ولی از دقت کمتری

جریان میرا، مقدار کمتری نسبت به نیروی اصطکاک واقعی دارد. از آنجا که مسایل فنی، اجرایی و اقتصادی، طرح لوله‌های سری را در خطوط انتقال حتمی می‌سازد، بررسی تغییرات فشار ناشی از وجود تبدیل‌های واگرا و همگرای تدریجی و ناگهانی دارای اهمیت است.

موج انتشار یافته از شیر پایین‌دست در محل تغییر سطح مقطع مجرا، ناشی از وجود تبدیل، به دو موج انتقالی و انعکاسی تغییر وضعیت می‌دهد که هر یک بر میزان و نحوه تغییرات فشار در طی مسیر اثرگذار می‌باشد. در سال 1392 زرگر و فتحی‌مقدم در تحقیقاتی به بررسی تغییر شکل موج فشاری در جریان‌های میرای افزاینده در لوله‌های سری پرداختند. این آزمایش‌ها نیز بر روی مدل فیزیکی جریان‌های میرا واقع در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گرفت. در تحقیق‌های آزمایشگاهی برای یافتن محل انسداد در لوله‌های انتقال آب نیز از خطوط لوله‌های سری استفاده می‌شود. بدین صورت که در آزمایشگاه قسمتی از خط لوله ساده را با لوله‌ای با قطر کوچکتر جایگزین می‌کنند و با استفاده از موج‌های فشاری انعکاسی و انتقالی از محل تغییر سطح مقطع و معادلات مربوطه به یافتن انسداد در خطوط لوله می‌پردازند (منیکونی و همکاران، 2010). از این رو هدف اصلی این تحقیق بررسی آزمایشگاهی تغییرات کاهش فشار ناشی از جریان میرای افزاینده در لوله‌های سری واگرا و همگرا است که در ادامه به نحوه انجام و نتایج حاصل از آن پرداخته خواهد شد.

## 2- روش تحقیق

در شبکه‌های انتقال آب، هر عاملی که باعث تغییر سرعت انتشار موج فشاری شود، تغییرات کیفی و کمی در موج فشاری ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر موج‌های فشاری مستقیم و انعکاسی در برخورد با این عوامل شکل اولیه خود را از دست می‌دهند (نجمایی، 1374). به طور مثال

تحقیقات در این زمینه، با استفاده از مدل‌های ریاضی انجام شده است. این در حالیست که پارامترهای مؤثر بر فیزیک پدیده میرایی امواج فشاری در خطوط انتقال، بسیار زیاد بوده و لحاظ کردن آن‌ها در مدل‌های ریاضی و نرم‌افزاری امکان‌پذیر نیست؛ از طرفی فراهم آوردن تمهیدات لازم برای بررسی آزمایشگاهی پدیده نیز امری دشوار بشمار می‌رود.

از جمله تحقیقات پیشین انجام شده در این زمینه به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

استریتر در سال 1967 در مقاله خود، صدمات مربوط به بستن یا باز کرده شیر را در سیستم‌های لوله‌های سری، موازی و انشعابات همراه با در نظر گرفتن اصطکاک ارائه نمود. پارکر و جانز در سال 1990 روش جدیدی برای جداکردن موج رفت و برگشت برای جریان در حالت یک‌بعدی پیدا کردند که براساس آنالیز جریان به صورت غیرخطی بوده است، ولی آنها فرض کردند که موج رفت و برگشت در هنگام برخورد به صورت خطی جمع می‌شوند. منیکونی و همکاران در سال 2012 به بررسی رفتار امواج فشاری در برخورد با تغییر قطر لوله پرداختند. این تحقیقات بصورت آزمایشگاهی و بر روی لوله‌های انعطاف‌پذیر انجام گرفت. آنها به مقایسه رفتار جریان ماندگار و غیرماندگار در محل تغییر قطر لوله پرداختند و نتایج را با مدل عددی نیز بررسی نمودند. در نهایت این تحقیقات منجر به ارائه مدل عددی گسترش یافته‌ای شد که نتایج آن هماهنگی مناسب‌تری با نتایج تجربی دارد.

عوامل تغییرات فشار جریان‌های غیرماندگار ایجاد شده در مسیر خطوط انتقال نیز مانند جریان ماندگار شامل افت‌های اصطکاک و موضعی است. در سال 1391 تحقیقی‌پور و فتحی‌مقدم با احداث مدل آزمایشگاهی از جنس پلی‌اتیلن به بررسی هیدرولیک جریان میرا در خطوط لوله سری پرداختند. آن‌ها در آزمایش‌های خود به این نتیجه رسیدند که نیروی اصطکاک محاسباتی در حین وقوع

برج آبگیر که در ارتفاع پنج متری خط لوله قرار دارد - لوله پلی اتیلن به قطر 53 میلی متری و به طول 33 متر - دو لوله پلی اتیلن به قطرهای 63 و 35 میلی متر و به طول 15 متر که به طور جداگانه به لوله 53 میلی متری متصل می شوند - شیر قطع و وصل جریان همراه با زمان سنج برای نشان دادن زمان باز شدن شیر - مخزن تخلیه، که آب را مجدداً توسط پمپ های مستغرق به برج آبگیر هدایت می کند - شش مبدل فشار<sup>3</sup> مدل Wika 0-16 bar برای محاسبه تغییرات فشار - دبی سنج اولتراسونیک - دیتالاگر (مبدل داده های آنالوگ به داده های دیجیتال) و کامپیوتر برای ثبت داده.

شکل 1 پلان مدل است که در آن برج آبگیر مشاهده می شود و به آن لوله ای به قطر 53 میلی متر متصل است. این لوله در حین آزمایش ها ثابت می ماند و اگر لوله 63 میلی متری به لوله ثابت وصل شود، سیستم واگرا و اگر لوله 35 میلی متری وصل شود، سیستم سری همگرا را تشکیل می دهد (جهت تعیین واگرایی و همگرایی خط لوله از سمت مخزن به شیر می باشد). همچنین در این شکل CH نشان دهنده مقطع اندازه گیری فشار است، شش مقطع اندازه گیری فشار وجود دارد. مقاطع CH1، CH2 و CH3 در لوله متغیر (لوله 63 و 35 میلی متری) به ترتیب در فواصل 13/5 متر، 7/5 متری و 0/5 متری و مقاطع CH4، CH5 و CH6 در لوله ثابت (لوله 53 میلی متری) به ترتیب در فواصل 0/5 متری، 6/5 متری و 21/5 متری از محل تغییر سطح مقطع قرار دارند.

### 3- روش انجام آزمایش ها

مقدار جریان در خط لوله پس از باز شدن شیر پایین دست با استفاده از دبی سنج تنظیم می شود، سپس شیر پایین دست به آهستگی بسته می شود تا جریان ماندگار اولیه که حالت سکون سیال است، ایجاد شود.

شیرهای درون سیستم انتقال آب، خم در لوله ها، تغییر خصوصیات فیزیکی لوله (جنس، سطح مقطع، ضخامت لوله) باعث تغییر سرعت انتشار موج فشاری می شود. توضیحات بالا در خصوص عامل تغییر سطح مقطع لوله، در پلان شماتیک مدل آزمایشگاهی که در شکل 1 نشان داده شده است. موج فشاری  $F_1$  که موج فشاری مستقیم از شیر (عامل ایجاد جریان میرا) است، وقتی به محل تغییر سطح مقطع (عامل ایجاد تغییر سرعت انتشار موج) می رسد، به موج انعکاسی  $f_1$  و موج انتقالی  $F_2$  تغییر شکل می دهد و بسته به اینکه تغییر سطح مقطع واگرا یا همگرا باشد و با توجه به روابط (1) و (2) که بیانگر تغییرات موج فشاری ناشی از همگرایی و واگرایی مقطع و تبدیل آن به دو موج انعکاسی و انتقالی می باشد، نتایج متفاوتی حاصل می شود.

با توجه به شکل 1 و با صرف نظر کردن از مقدار افت در مقطع  $b$ ،  $f_1$  و  $F_2$  به شکل زیر نتیجه می شود:

$$F_2 = sF_1 \quad s = \frac{2A_1/c_1}{A_1/c_1 + A_2/c_2} \quad (1)$$

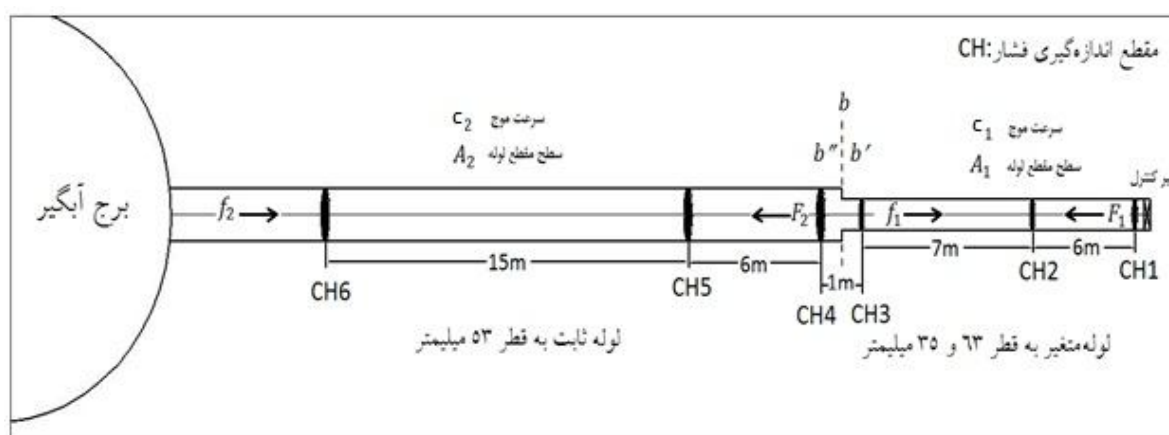
$$f_1 = rF_1 \quad r = \frac{A_1/c_1 - A_2/c_2}{A_1/c_1 + A_2/c_2} \quad (2)$$

$s$  ضریب انتقال<sup>1</sup> و  $r$  ضریب انعکاس<sup>2</sup> موج فشاری هستند. همان طور که در روابط بالا دیده می شود این ضرایب به سطح مقطع و سرعت موج در دو لوله وابسته هستند. این روابط از معادلات انتگرالی جریان استخراج شده اند و آن معادلات نیز از انتگرال گیری معادلات دیفرانسیلی جریان به روش دالامبر که توسط ریمان و آلیوی به طور جداگانه انجام گرفته، بدست آمده اند (حامدی، 1380).

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق، یک سیستم جریان میرا در آزمایشگاه مدل های فیزیکی و هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز به شرح زیر احداث شد:

1. Transmission Coefficient
2. Reflection Coefficient

3. Pressure Transducer



شکل 1 پلان مدل

دو سیستم همگرا و واگرا در سریع ترین زمان بازشدن شیر نشان می دهد.

CH1، CH2 و CH3 به ترتیب نشان دهنده سه مقطع از لوله متغیر هستند. CH1 نزدیک ترین مقطع به شیر و CH3 نزدیک ترین مقطع به محل تغییر سطح مقطع می باشد. همان طور که در شکل 2 ملاحظه می شود، نحوه تغییرات ابتدای منحنی بیانگر وضعیت جریان ماندگار اولیه می باشد. پس از بازشدن شیر، ابتدا در هر سه مقطع کاهش ناگهانی فشار مشاهده می شود، حال آنکه ایجاد نوسانات فشار که حاصل از رفت و برگشت موج فشاری از شیر به مخزن است، پس از این کاهش ناگهانی، مختص مقاطع دوم و سوم می باشد. در نهایت با تبدیل جریان غیرماندگار به حالت ماندگار ثانویه، نوسانات فشار نیز به میرایی می گراید. نکته لازم به ذکر آن که عدم ایجاد نوسانات فشاری در مقطع اول ناشی از ارتباط دهانه شیر با اتمسفر که مانند یک مخزن هوا با هد ثابت رفتار می کند، می باشد. از شکل 2 نیز می توان سرعت موج فشاری را در دو سیستم سری بدست آورد. از آنجا که زمان یک سیکل کامل رفت و برگشت موج فشاری از شیر تا مخزن در جریان میرای افزایشنده از رابطه  $T = \frac{2L}{c}$  به دست می آید که  $L$  طول سیستم و  $c$  سرعت انتشار موج فشاری می باشد، بدین ترتیب می توان  $T$  را فاصله زمانی بین دو قله در

پس از آنکه دبی سنج مقدار دبی را صفر نشان داد، شیر پایین دست که به یک زمان سنج متصل است باز می شود، از آنجا که سرعت بازشدن شیر بر موج فشاری و تغییرات آن اثر می گذارد، آزمایش های این تحقیق نیز با سرعت های متفاوت بازشدن شیر، شامل آهسته تا سریع در محدوده 0/25 تا 10 ثانیه انجام شد. برای اندازه گیری زمان بازشدن شیر از دستگاه زمان سنجی که مجهز به سنسورنوری بسیار حساس و دقیق است، استفاده شد. بدین ترتیب تغییرات فشار در شش مقطع از خط لوله توسط مبدل های فشار در جریان ماندگار اولیه، جریان میرا و جریان ماندگار ثانویه ثبت و توسط دیتالاگری با قابلیت ثبت حداکثر 10000 داده در ثانیه به داده های دیجیتال تبدیل و در نهایت بر روی کامپیوتر نمایش داده شد. این دستگاه توانایی ثبت همزمان 8 کانال ورودی داده را دارد و به دلیل عدم وجود سیستم مناسب ثبت اطلاعات در بازار، سفارش ساخت آن پیش از آغاز آزمایش های تحقیق داده شد. پس از یکنواخت شدن جریان و ذخیره کردن داده ها، دوباره شیر پایین دست بسته می شود و آزمایش بعدی، به ترتیب گفته شده، از سر گرفته می شود و نوسانات فشار در زمان های کوتاه تا زمان های طولانی باز شدن شیر ثبت می شود.

شکل 2 نوسانات فشاری را در سه مقطع از لوله متغیر در

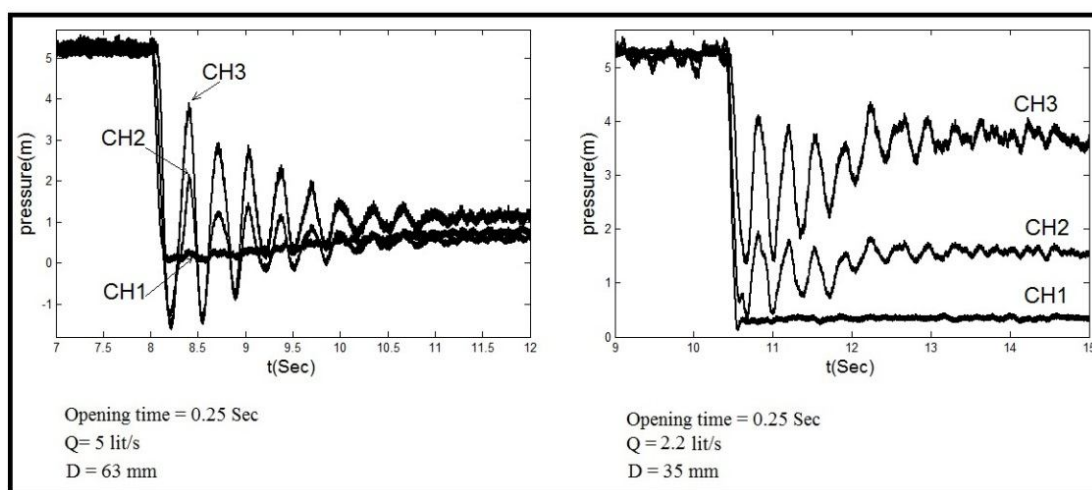
یک از مقاطع به ازای سرعت‌های متفاوت بازشدن شیر مورد بررسی قرار گرفته که در بخش بعد به آن پرداخته خواهد شد.

#### 4- ارائه نتایج

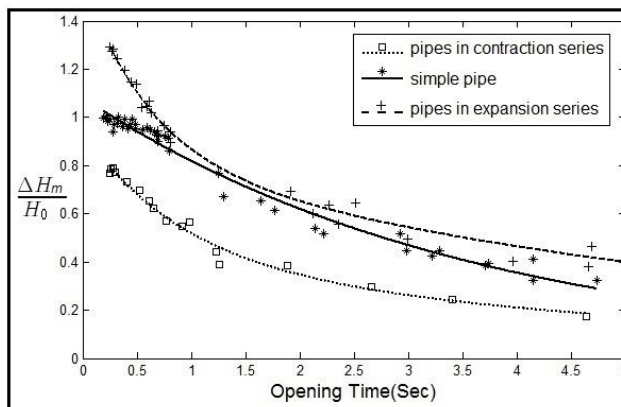
4-1- مقایسه تغییرات کاهش فشار اولیه در یک مقطع در سه سیستم خطوط لوله ساده، خطوط لوله سری همگرا و واگرا

شکل 3 کاهش فشار اولیه موج فشاری در مقطع چهارم (CH4 در شکل 1) نسبت به زمان‌های متفاوت بازشدن شیر در سه سیستم را نشان می‌دهد.

نوسانات فشاری قرار داد و سرعت موج را محاسبه کرد. در نتیجه در سیستم سری واگرا سرعت موج تقریباً 297 متربرثانیه و در سیستم سری همگرا تقریباً 282 متربرثانیه محاسبه شد. همان‌طور که اشاره شد بررسی نحوه تغییرات موج فشاری در مسیر خطوط انتقال سری دارای اهمیت می‌باشد، از این‌رو تغییرات موج فشاری و به‌ویژه نحوه تغییرات بیشینه کاهش فشار بر روی مقاطع دو خط لوله سری همگرا و واگرا اندازه‌گیری شد. بدین منظور در حد فاصل شیر تا مخزن، علاوه بر سه مقطع نام برده، اندازه‌گیری‌های تغییرات فشار خط لوله پس از ناحیه تغییر سطح مقطع در سه نقطه CH4، CH5 و CH6 نیز انجام شد و نتایج حاصل از نحوه تغییرات کاهش فشار بیشینه در هر



شکل 2 نوسانات فشاری در لوله متغیر (شکل راست مربوط به لوله 35 میلی‌متری و شکل چپ مربوط به لوله 63 میلی‌متری است)



شکل 3 مقایسه کاهش فشار اولیه نسبی در سه سیستم خط لوله ساده، سری همگرا و سری واگرا

تضعیف موج فشاری بالادست خود شده و موج انتقالی نسبت به سیستم ساده با فشار منفی کمتری عبور می‌کند. همان‌طور که شکل 3 نیز نشان می‌دهد در مقطع چهارم (CH4 در شکل 1) در تمام زمان‌ها بیشترین کاهش فشار اولیه در سیستم واگرا و کمترین کاهش فشار اولیه در سیستم همگرا می‌باشد.

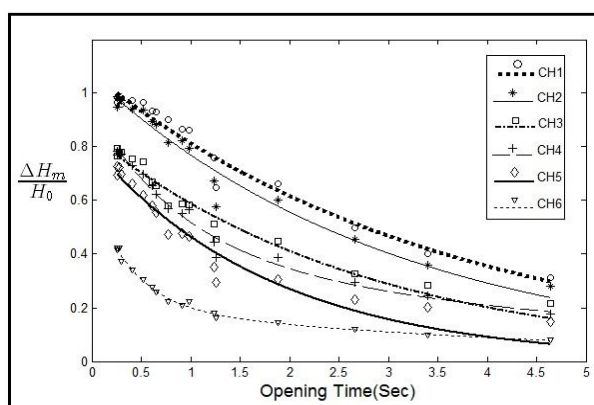
#### 4-2- مقایسه تغییرات کاهش فشار اولیه در شش مقطع

نسبت به یکدیگر در دو سیستم سری همگرا و واگرا شکل‌های 4 و 5 به ترتیب تغییرات کاهش فشار اولیه را نسبت به زمان بازشدن شیر در شش مقطع از سیستم سری همگرا و واگرا نشان می‌دهند. محور افقی در این شکل‌ها زمان بازشدن شیر و محور عمودی نسبت کاهش فشار اولیه به فشار استاتیک است.

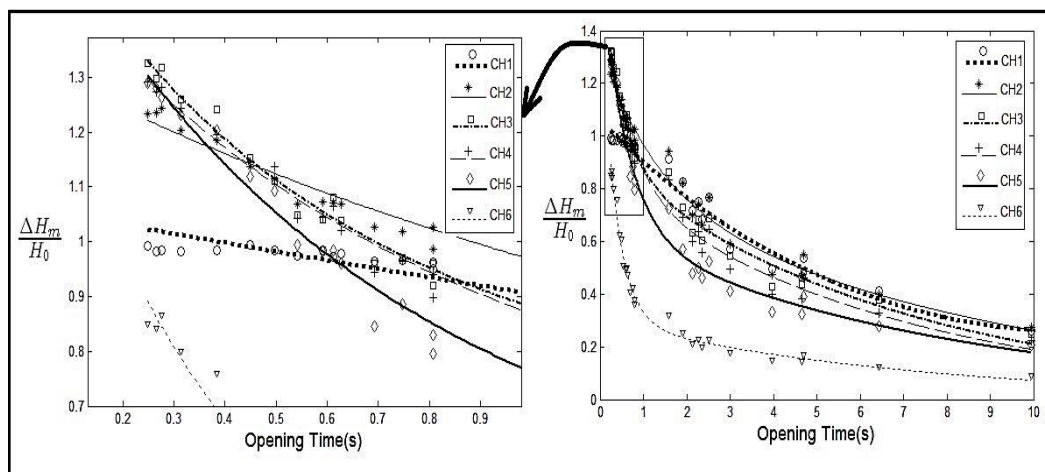
شکل 4 که مربوط به سیستم همگرا است، نشان می‌دهد که همواره بیشترین کاهش فشار اولیه مربوط به مقطع اول (نزدیک‌ترین مقطع به شیر) و کمترین کاهش فشار اولیه مربوط به مقطع ششم (دورترین مقطع به شیر) است. تغییرات کاهش فشار اولیه در شش مقطع نسبت به یکدیگر در این سیستم همانند خط لوله ساده می‌باشد، ولی همان‌طور که شکل 3 نشان می‌دهد، مقادیر کاهش فشار اولیه در این سیستم کمتر از خط لوله ساده است، به عبارتی در سیستم همگرا اصطکاک و تغییر شکل موج فشاری هر دو در جهت تضعیف نوسانات موج فشاری عمل می‌کنند.

محور عمودی این شکل پارامتر بی‌بعد کاهش فشار اولیه بر هدمکزن و محور افقی زمان‌های متفاوت بازشدن شیر را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل 1 در خط لوله ساده زمانی که شیر پایین-دست باز می‌شود، موج فشاری منفی  $F_1$  تشکیل و به سمت بالادست روانه می‌شود و هنگامی که به برج آبگیر بالادست می‌رسد، تغییر علامت می‌دهد و به صورت یک موج فشاری مثبت  $f_2$  منعکس می‌شود و به سمت پایین-دست حرکت می‌کند. ولی در خطوط لوله‌های سری زمانی که موج فشاری منفی  $F_1$  به محل تغییر سطح مقطع می‌رسد، به موج فشاری انعکاسی  $f_1$  و موج انتقالی  $F_2$  تبدیل می‌شود. با توجه به روابط (1) و (2) در سیستم سری واگرا پارامتر  $\frac{A}{c}$  در لوله 66 میلی‌متری بیشتر از لوله 53 میلی‌متری، است پس ضریب انعکاس مقداری مثبت و ضریب انتقال مقداری بزرگتر از واحد می‌شود، به عبارت دیگر در خطوط لوله سری واگرا در محل تغییر سطح-مقطع، موج فشاری انعکاسی باعث تقویت موج فشاری بالادست خود می‌شود و موج انتقالی نسبت به سیستم ساده با فشار منفی بیشتری عبور می‌کند. برعکس در خطوط لوله سری همگرا چون پارامتر  $A/c$  در لوله 32 میلی‌متری کمتر از لوله 53 میلی‌متری است، ضریب انعکاس مقداری منفی و ضریب انتقال مقداری کوچکتر از واحد می‌شود، یعنی در خطوط لوله سری همگرا، موج فشاری انعکاسی در محل تغییر سطح مقطع، موجب



شکل 4 تغییرات کاهش فشار اولیه نسبت به زمان بازشدن شیر در سیستم سری همگرا



شکل 5 تغییرات کاهش فشار اولیه نسبت به زمان بازشدن شیر در سیستم سری واگرا

### 5- نتیجه گیری

در این تحقیق، تغییرات کاهش فشار اولیه (ناشی از باز شدن شیر) نسبت به زمان بازشدن شیر (از بازشدن سریع تا بازشدن آهسته) در شش مقطع از خط لوله در دو سیستم سری همگرا و واگرا بررسی شد. تغییرات کاهش-فشار اولیه در سیستم سری واگرا به صورت کیفی و کمی نسبت به سیستم خط لوله ساده است، ولی در سیستم سری همگرا فقط به صورت کمی است، بدین معنی که در سیستم سری واگرا در زمان‌های کوتاه بازشدن شیر، بیشترین کاهش فشار اولیه در نزدیک‌ترین مقطع به محل تغییر سطح مقطع، ولی در زمان‌های طولانی، در نزدیک-ترین مقطع به شیر رخ می‌دهد.

در سیستم سری همگرا در تمام زمان‌های بازشدن شیر، بیشترین کاهش فشار اولیه مربوط به نزدیک‌ترین مقطع به شیر است و همچنین در هر مقطع از خط لوله مقادیر کاهش فشار اولیه به ترتیب کاهشی در سیستم سری واگرا، خط لوله ساده و در انتها سیستم سری همگرا رخ می‌دهد و نیز در جریان میرای افزایش‌دهنده، تنها در لوله‌های سری واگرا فشار منفی دیده می‌شود.

### 6- سپاسگزاری

نگارندگان از دانشگاه شهید چمران اهواز به خاطر در

شکل 5 که مربوط به تغییرات کاهش فشار اولیه در سیستم واگرا است، در بازه‌های زمانی کوتاه (تصویر سمت چپ، تغییرات فشار را در بازه‌های زمانی کوتاه بهتر نشان می‌دهد). مشاهده می‌شود که بیشترین کاهش فشار اولیه مربوط به مقاطع سوم و چهارم (نزدیک‌ترین مقطع به محل تغییر سطح مقطع) است ولی در بازه‌های زمانی طولانی، تغییرات کاهش فشار اولیه در شش مقطع همانند خط لوله ساده می‌شود.

همان‌طور که در بخش ابتدای این بخش توضیح داده شد وقتی بازکردن شیر سریع باشد، تغییر شکل موج فشاری که ناشی از تغییر سطح مقطع می‌باشد، باعث تشکیل موج فشاری انعکاسی تقویت‌کننده امواج فشاری بالادست خود و موج فشاری انتقالی بزرگتر از امواج بالادست خود می‌شود، و چون مقاطع سوم و چهارم نزدیک‌ترین مقاطع به محل تغییر سطح مقطع هستند، بیشتر از بقیه مقاطع از تغییر شکل موج فشاری تأثیر می‌پذیرند. به عبارتی در سیستم سری واگرا تغییر شکل موج فشاری در جهت تقویت امواج فشاری و اصطکاک در جهت تضعیف امواج عمل می‌کند و در زمان‌های کوتاه انرژی و قدرت تغییر شکل موج فشاری بیشتر از اصطکاک است و در زمان‌های طولانی برعکس می‌شود.

زرگر، س. (1392) "بررسی تغییرات موج فشاری در جریان های میرایافته". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.

کوچک زاده، ص. و پرورش ریزی، ع. (1384). "مقدمه ای بر هیدرولیک جریان های ناپایدار". انتشارات دانشگاه تهران.

نجمایی، م. (1374). "ضربه قوچ". ویرایش اول، چاپ اول، انتشارات مولف.

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*. 33, pp. 44-58.

Meniconi, S., Brunone, B., Ferrante, M., and Massari, C. (2010). "Fast transient as a tool for partial blockage detection in pipes: First experimental result", 12th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference (WDSA 2010).

Parker, K.H. and Jones, C.J.H., (1990). "Forward and backward running waves in the arteries: analysis using the method of characteristics". *Journal of Biomechanical Engineering*. 112, pp. 322-326.

Streeter, V.L. and Wylie, E. B., (1967). *Hydraulic Transients*, New York, ch. 3.

اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی برای انجام این تحقیق قدردانی می نمایند.

## 7- فهرست علائم

A	سطح مقطع لوله
c	سرعت انتقال موج
CH	مقطع اندازه گیری تغییرات فشار
$F_1$	موج فشاری مستقیم از شیر
$f_1$	موج انعکاسی از محل تغییر سطح مقطع
$F_2$	موج انتقالی از محل تغییر سطح مقطع
$f_2$	موج انعکاسی از مخزن
L	طول لوله
T	زمان بازکردن یا بستن شیر

## 8- منابع

آشفته، ج. و پزشکی نژاد، ع. (1369). "هیدرولیک کاربردی جریانهای میرا". انتشارات فنی حسینان.

حامدی، م. ح. (1380). "هیدرولیک لوله ها". انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

حقیقی پور، ص. (1391). "بررسی هیدرولیکی جریانهای میرا در خطوط لوله سری با استفاده از مدل فیزیکی و عددی". پایان نامه دکتری، دانشگاه شهید چمران اهواز.