

## بررسی وابستگی عوامل هیدرولیکی موثر بر میزان مکش ناگهانی آلودگی به خطوط انتقال در شرایط گذرا

میلاد پایسته، علیرضا کرامت\*

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۳-۰۲  
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۵-۲۴  
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۵-۲۵  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۶-۰۴

### کلمات کلیدی:

کیفیت آب آشامیدنی  
ضربه قوچ  
جابجایی آلودگی  
مکش ناگهانی آلودگی  
لوله‌های ویسکوالاستیک  
نشت

**خلاصه:** مکش ناگهانی آلودگی بر اثر جریان گذرا مکانیزم پراهمیتی است، که ممکن است منجر به بروز زوال کیفیت آب آشامیدنی شود. موج فشار منفی ضربه قوچ در لحظاتی که به نقاط آسیب سازه‌ای هم‌چون نشت برسد، در صورت غلبه بر فشار اطراف محل نشت، منجر به مکش ناگهانی آلودگی به جریان درون لوله می‌شود. در این تحقیق با مدل‌سازی عددی و ریاضی یک سیستم مخزن-لوله-شیر با نشت به بررسی اندرکنش عوامل هیدرولیکی بر فشارهای وارده به سیستم و متعاقباً حجم آلودگی وارد شده به خطوط انتقال، حین وقوع ضربه قوچ، پرداخته شده‌است. در این پژوهش برای مدل‌سازی جریان گذرا از روش اولری مشخصه‌ها استفاده شد. کل حجم آلودگی ورودی از محل نشت که برگرفته از حل لاگرانژی معادله انتقال آلودگی است، به‌عنوان ملاک مقایسه برای حالت‌های گوناگون اتخاذ شده‌است. این پژوهش در ۷۲ حالت مختلف بررسی مکش ناگهانی آلودگی پرداخته‌است. این حالات مختلف در برگیرنده دو خط انتقال (کوتاه و بلند)، سه محل مختلف نشت، سه سرعت متفاوت برای سیال درون لوله، دو قطر نشت و دو جنس لوله (الاستیک و ویسکوالاستیک) می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که مقدار آلودگی وارد شده، به وضوح در لوله‌های ویسکوالاستیک کمتر از لوله‌های الاستیک می‌باشد، به ویژه زمانی که طول لوله زیاد باشد. نرخ ورود آلودگی در لوله ویسکوالاستیک به نسبت لوله‌های الاستیک، به ترتیب برابر ۰/۰۲۷ و ۰/۴۹۶ در لوله ۲۳۰۰ متری و ۵۴۰ متری می‌باشد. ناحیه بحرانی ورود آلودگی برای نشت‌های کوچک در نزدیکی شیر واقع شده‌است، لیکن تعیین این ناحیه برای نشت‌های بزرگ به دلیل تاثیر بازتاب امواج فشاری از شیر، مخزن و نشت، پیچیده می‌باشد.

شرایط مستعد برای مکش ناگهانی آلودگی در ۶۲/۸٪ از موارد در آمریکا از ۱۹۷۱ تا ۱۹۹۸ اعلام کرد، گرچه او تغییرات معکوس فشار را وابسته به جریان غیرماندگار اعلام نکرد [۲]. آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا<sup>۲</sup> و بنیاد تحقیقات آب آمریکا<sup>۳</sup> نفوذ ناگهانی آلودگی را یکی از ده اولویت حوزه تحقیقاتی معرفی کرده‌است [۳]. شوستر<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۵)، ۲۸۸ شیوع بیماری را بر اثر سیستم توزیع آب از سال ۱۹۷۴ تا ۲۰۰۱ گزارش کردند [۴]. کالین و باکسل (۲۰۱۰)، منبع آلودگی، فشارهای وارده به سیستم و محل مکش آلودگی را به‌عنوان سه عامل موثر در مکش آلاینده‌ها به خطوط انتقال معرفی کردند [۵].

### ۱- مقدمه

کیفیت آب حین عبور از خطوط انتقال، بر اثر فرآیندهای پیچیده فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی دست‌خوش تغییراتی می‌شود. این تغییرات کیفی می‌تواند در تعامل با مواد و تجهیزات هیدرولیکی هم‌چون لوله‌ها، شیر و مخزن و شرایط هیدرولیکی حاکم باشد [۱]. بسیار محتمل است که کیفیت آب، بر اثر جریان غیرماندگار دچار تغییر شود، برای مثال فشار منفی ناشی از جریان غیرماندگار ضربه قوچ می‌تواند مواد آلاینده را از اطراف محل نشت به درون خطوط انتقال مکش کند. لیندلی<sup>۱</sup> (۲۰۰۱) تغییرات معکوس فشار را به عنوان

2 United States Environmental Protection Agency

3 Water Research Foundation

4 Schuster et al.

1 Lindley

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: keramat.alireza@gmail.com





شکل ۱. الف) شیر هوای مستغرق. ب) شیر هوای نیمه مستغرق  
**Fig. 1. a. Completely submerged air valve. b. Semi-submerged air valve.**

### ۱-۱- منبع آلودگی

شوستر و همکاران (۲۰۰۵) ۲۸۸ خرابی در شبکه را از سال ۱۹۷۴ تا ۲۰۰۱ مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها موارد متنوع از وجود عوامل بیماری‌زا را مشاهده کردند. ضمن اینکه، آن‌ها آب و هوای طاقت فرسا، نزدیکی خطوط انتقال به محدوده گونه‌های جانوری، عملکرد ناقص سیستم و مراقبت و نگهداری ضعیف از شبکه را از عوامل بروز آلودگی در شبکه معرفی کردند [۴]. کریم<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۶) وجود آلودگی میکروبی در ۶۶ نمونه خاک جمع‌آوری شده از هشت خطوط انتقال در شش ایالت آمریکا را گزارش کردند. مواد آلاینده موجود در خاک اطراف خطوط انتقال می‌تواند، به صورت مخلوط آب و خاک، مواد شیمیایی و میکروبی را وارد خطوط انتقال آب کند [۶].

### ۱-۲- محل مکش آلودگی

تامسون و وانگ<sup>۲</sup> (۲۰۰۹) مکش آلودگی‌ها را از مسیرهای گوناگونی مانند شیرهای هوای مستغرق، نقاط نشت، محل تعمیرات و اتصالات و صفحات عایق معیوب به خطوط انتقال گزارش کردند [۷]. کریمی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۱) لیستی از جزییات عوامل ایجاد فشار منفی در خطوط انتقال را ارائه دادند، که شامل مواردی چون: تغییرات میزان مصرف خانوار، نیازهای آتش‌نشانی، خاموشی پمپ، بسته شدن شیر، ترکیدن خطوط اصلی، تعمیرات، فلاشینگ و افزایش سطح آب

- 1 Karim et al.
- 2 Thomason and Wang
- 3 Kirmeyer et al.

زیرزمینی می‌باشد [۸]. شکل ۱ نمای یک شیر هوای نیمه‌مستغرق و کاملاً مستغرق را نشان می‌دهد که توسط بسنر و همکاران تهیه شده‌است. در حالت کاملاً مستغرق فاضلاب آلوده به درون خطوط انتقال آب وارد می‌شود [۹].

### ۱-۳- فشارهای وارده

فشارهای وارده بر سیستم می‌تواند بر اثر افزایش فشار خارجی یا کاهش فشار داخلی در خطوط انتقال، منجر به مکش آلودگی شود. مطالعات مربوط به پایش فشار در شبکه، وجود فشار نسبی منفی را نشان می‌دهد. بسنر و همکارانش (۲۰۱۱) فرکانس و مقدار فشار منفی را در نوزده سایت مختلف در مونترال کانادا از ماه ژوئن ۲۰۰۶ تا نوامبر ۲۰۰۷ مورد بررسی قرار دادند. بسنر دو الگو برای فشار نسبی منفی را مورد بحث قرار داد. (۱) حالت‌های گذرا از چند میلی‌ثانیه تا دو دقیقه (۲) پدیده‌های ممتد که نرم زمانی از چند دقیقه تا حتی یک ساعت را شامل می‌شوند. گالیک<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۴) فشار را در ۴۳ مکان مختلف در هشت خطوط انتقال بررسی کردند. در یک دوره ۴۶۴۰ روزه، آن‌ها ۲۱ مورد فشار منفی که کمتر از سه دقیقه طول کشیده بود و عموماً بر اثر خاموشی ناگهانی پمپ بود را رصد کردند [۹]. فشارهای وارده به شبکه می‌تواند بر اثر عملکرد پمپ، جابجایی لوله، باز و بسته شدن شیر و یا تنوع در نیاز آب به وجود آید. یکی از عواملی دیگری که نوسانات فشار در خطوط انتقال را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد، جنس مواد به کار رفته در خطوط انتقال اعم از لوله‌های

4 Gullick et al.

مدل آزمایشگاهی نشان دادند که حین وقوع ضربه قوچ در شبکه، موج فشاری منفی، آلودگی اطراف محل نشت را به درون خطوط انتقال مکش می‌کند و آن را به پایین دست محل نشت انتقال می‌دهد [۱۳]. رضایی<sup>۱</sup> و ناصر (۲۰۱۲) برای مطالعه مکش و انتشار آلودگی از محل نشت در شرایط ضربه قوچ، معادلات هیدرولیک جریان غیرماندگار را با استفاده از روش مشخصه‌ها حل کردند و برای مدل سازی انتشار آلودگی از روش لاگرانژی استفاده نمودند. آن‌ها با در نظر گرفتن اثر خاک اطراف محل نشت مدلی برای تخمین میزان ورود آلودگی از اطراف محل نشت به درون لوله ارائه دادند [۱۴]. جونز و همکاران (۲۰۱۴) ضمن اثبات مکش ناگهانی آلودگی در یک مدل آزمایشگاهی بزرگ مقیاس، حجم مکش آلودگی براساس دبی شرایط اولیه و فشار حالت ماندگار را اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد در یک فشار ثابت (۲۰ متر ستون آب) با افزایش دبی، حجم مکش آلودگی افزایش یافت و در یک دبی خاص (۲/۱ لیتر بر ثانیه) با افزایش فشار حجم مکش آلودگی کاهش یافت [۱۵]. نتایج آزمایشگاهی فونتاناترا و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۵) نشان داد که میزان آلودگی وارد شده از محل نشت در لوله‌های نیمه پر، بوسیله مکانیسم تراوش بیشتر از آلودگی وارد شده توسط جریان غیرماندگار می‌باشد و میزان آلودگی وارد شده در جریان غیرماندگار به صورت مستقیم به بزرگی فشار منفی و مدت زمان استقرار فشار منفی در محل نشت وابسته است [۱۶].

پایسته و کرامت (۱۳۹۷)، با آنالیز حساسیت عوامل هیدرولیکی موثر بر مکش ناگهانی آلودگی حین وقوع ضربه قوچ در یک سیستم ثابت مخزن-لوله-شیر با نشت، بزرگی فشار منفی در محل نشت حین وقوع ضربه قوچ را مهم ترین عامل در مکش ناگهانی معرفی نمودند. در پژوهش پیشین مولفان، فرم معادلات حاکم بر پدیده ضربه قوچ (تغییر اکسترم‌های نسی در شرایط مختلف) و محدودیت‌های یک سیستم ثابت مخزن-لوله-شیر با نشت، چالش‌هایی را در مطالعه مکش آلودگی ایجاد نمود. برای مثال یک سیستم خط لوله ثابت ظرفیت معینی برای تغییر در سرعت موج فشاری دارد. لذا در این پژوهش سعی شده تا با بررسی پدیده مکش ناگهانی آلودگی در سیستم‌های متفاوت خطوط انتقال بر این چالش‌ها غلبه شود. به عبارت دیگر هدف این پژوهش این است که با بررسی محدوده گسترده‌ای از عوامل هیدرولیکی، شناخت عمیق تری از پدیده مکش ناگهانی آلودگی به وجود آورد تا

الاستیک و ویسکوالاستیک می‌باشد. در سال‌های اخیر استفاده از لوله‌های ویسکوالاستیک، در بخش‌های مختلف صنعت به خصوص در خطوط انتقال آب، به سرعت رو به افزایش است. از مزایای استفاده از لوله‌های ویسکوالاستیک می‌توان به وزن کم، نصب و اتصالات آسان و سریع، قیمت ارزان، مقاومت شیمیایی و مقاومت در برابر خوردگی اشاره کرد که موجب گرایش طراحان به استفاده بهینه از لوله‌های ویسکوالاستیک در طرح‌ها می‌شود. بنابراین همان گونه که رضایی و ناصر (۲۰۱۳) اذعان دارند، مطالعه مکش ناگهانی آلودگی در لوله‌های ویسکوالاستیک از اهمیت زیادی برخوردار است.

پژوهش‌های پیشین جهت بررسی انتشار آلودگی در شرایط غیرماندگار روش‌هایی را ارائه داده‌اند. سه روش کلی برای حل عددی معادله انتقال وجود دارد: روش اولری، روش لاگرانژی و روش ترکیبی اولری و لاگرانژی. روشهای اولری معادلات حاکم روی سیستم مختصات ثابت حل می‌کنند، در حالی که روش‌های لاگرانژی از سیستم مختصات متحرک و الگوریتم‌های جابجایی ذره استفاده می‌کنند. روش‌های ترکیبی اولری و لاگرانژی ترم جابجایی را در مختصات لاگرانژی و ترم پخش را در سیستم اولری حل می‌کنند [۱۰]. باشا و ملاعب (۲۰۰۷) مدل اولری لاگرانژی را ارائه کردند، که جابجایی و پراکندگی مواد را با دقت یکسان برای سرعت های کم و زیاد در خطوط انتقال مدل می‌کرد. عملکرد این مدل به دلیل استفاده از محور مختصات غیر یکنواخت و روش درون‌یابی به کار رفته در آن از سایر مدل‌ها بهتر بود. فرض اولیه در مدل لاگرانژی و مدل ترکیبی اولری و لاگرانژی عدم تغییر سرعت می‌باشد (شرایط ماندگار هیدرولیکی) [۱۱]. فرناندز و کارنی<sup>۱</sup> (۲۰۰۴)، نخستین بار یک مدل عددی جهت شبیه‌سازی انتشار کلر در شرایط ضربه قوچ ارائه کردند که با استفاده از درون‌یابی و همگام‌سازی زمانی معادلات ضربه قوچ و انتقال، عدم تطابق زمانی این دو دست از معادلات را رفع نمودند. آن‌ها با مدل سازی یک سیستم مستهلک کننده انرژی<sup>۲</sup> و بررسی نحوه تغییرات غلظت کلر به دام افتاده در آن سعی کردند رفتار آلودگی در لوله‌های دارای نشت را تحلیل کنند. آن‌ها رفتار آلودگی در محل نشت بر اثر ضربه قوچ را به صورت ورود و سپس خروج آلودگی پیش‌بینی کردند [۱۲]. فاکس<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۳)، در قالب یک

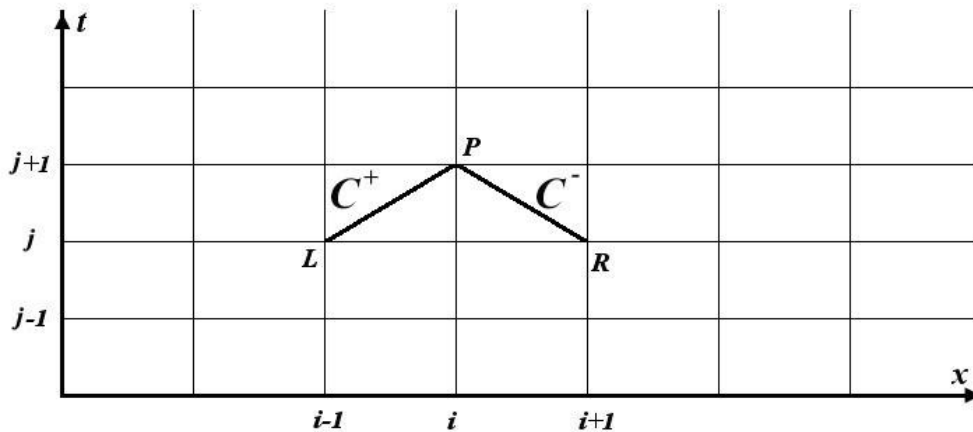
1 Fernandes and Karney

2 external energy dissipater

3 Fox et al.

4 Rezaei and Naser

5 Chiar



شکل ۲. شبکه‌بندی مکان-زمان در روش مشخصه‌ها برای حل معادلات ضربه‌قوچ  
 Fig. 2. Space-time mesh grid for solving waterhammer equation by Method of Characteristics.

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} = \frac{-f Q |Q|}{2DA^2} \quad (2)$$

که در رابطه بالا،  $x$  فاصله در امتداد لوله،  $t$  زمان،  $g$  شتاب جاذبه،  $D$  قطر لوله،  $k$  مدول بالک،  $A$  سطح مقطع لوله  $Q$  دبی،  $H$  ارتفاع معادل فشار،  $f$  ضریب اصطکاک با در نظر گرفتن شرایط ماندگار یا گذرا،  $\epsilon_\phi$  کرنش جانبی می‌باشد که ترم ویسکوالاستیک از طریق این ترم در معادلات اعمال می‌شود که در لوله‌ها با رفتار الاستیک برابر صفر می‌باشد. برای حل معادلات ضربه‌قوچ در حالت الاستیک، با توجه به فرم تفاضل محدود معمولی بر روی دو خط مشخصه  $C^-$  و  $C^+$  که در شکل ۲ نشان داده شده، دبی و ارتفاع آب معادل فشار در نقطه مجهول با استفاده از دو رابطه زیر استخراج می‌شود [۱۹]:

$$C^+ : H_P = C_p - B_p Q_P \quad (3)$$

$$C^- : H_P = C_m + B_m Q_P \quad (4)$$

که در این روابط اندیس  $P$  نشان‌دهنده مقادیر مجهول و مقادیر  $C_p$  و  $C_m$  و  $B_p$  و  $B_m$  پارامترهایی هستند که با استفاده از مقادیر محاسبه شده در گام زمانی قبل به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$C_p = H_L + B Q_L, \quad B = \frac{gA}{c} \quad (5)$$

$$C_m = H_R - B Q_R \quad (6)$$

$$B_p = B + R |Q_L| \quad R = \frac{f \Delta x}{2gDA^2} \quad (7)$$

بتوان بر مبنای آن راهکارهایی عملی جهت مهار این پدیده ارائه کند. از آنجا که بررسی عوامل تاثیرگذار در پدیده مکش ناگهانی آلودگی به صورت آزمایشگاهی و فیلدی مستلزم به کارگیری هزینه‌های گزاف و زمان زیاد می‌باشد، لذا در این پژوهش با ارائه یک مدل عددی در قالب یک خط انتقال کوتاه و طولانی و در ۷۲ حالت مختلف از ابعاد نشت، محل نشت، سرعت سیال و جنس لوله متفاوت، اندرکنش عوامل هیدرولیکی در شرایط مختلف بررسی شده است [۱۷].

## ۲- مواد و روش‌ها

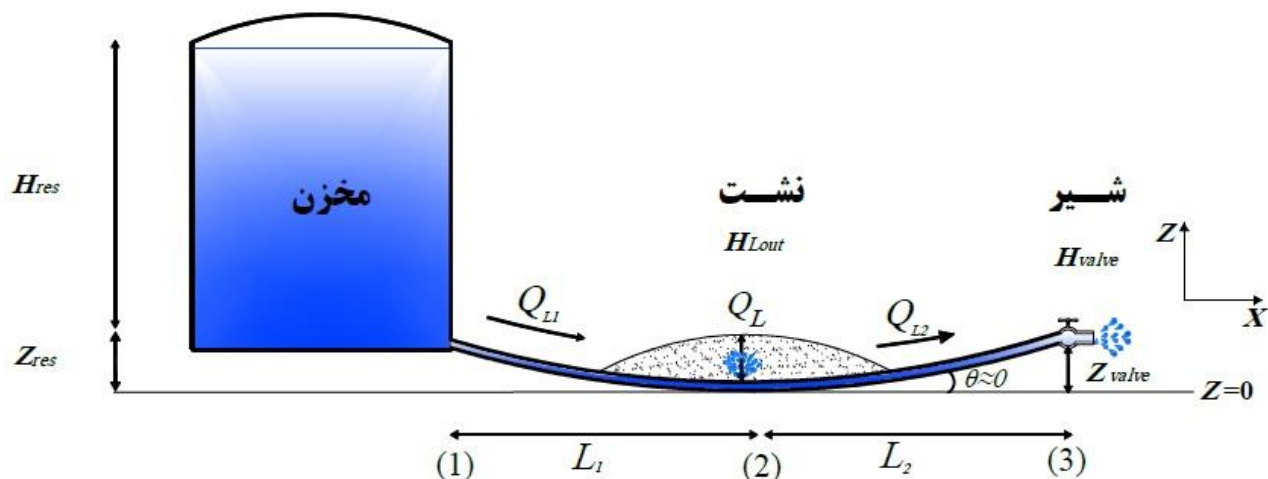
### ۲-۱- مدل‌سازی پدیده ضربه قوچ

تشریح شبیه‌سازی جریان گذرا در قالب معادلات حاکم شرایط اولیه و شرایط مرزی به صورت جداگانه در زیر ارائه می‌گردد.

### ۲-۱-۱- معادلات حاکم

موج فشاری بر اثر پدیده ضربه‌قوچ در مجاری تحت فشار ناشی از تغییر ناگهانی سرعت در پایین‌دست، اتفاق می‌افتد. در استفاده‌های کاربردی جریان گذرا در لوله‌های تحت فشار از دو معادله رایج پایستگی جرم و مومنتم استفاده می‌کنند. رابطه ارائه شده توسط کواس و همکاران (۲۰۰۵) برای سیستم لوله‌های ویسکوالاستیک به صورت زیر می‌باشد [۱۸]:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\rho g}{K} \frac{\partial H}{\partial t} + 2 \frac{\partial \epsilon_\phi}{\partial t} = 0 \quad (1)$$



شکل ۳. شماتیک سیستم مخزن-لوله- شیر همراه با نشست جهت بررسی مکش ناگهانی آلودگی به درون خط انتقال

Fig. 3. Schematic of the reservoir-pipe-valve system with a leak to investigate the contamination intrusion phenomenon.

نشست، دبی محل نشست و دبی بعد از نشست به عنوان مجهولات محاسبه می‌شوند. مطابق شکل ۳ برای تعیین این دو مجهول از دو معادلات ۱۲ و ۱۳ ارائه شده در زیر، استفاده می‌شود. با استفاده از رابطه روزنه با فرض فشار نسبی خارج محل نشست برابر با صفر، می‌توان نوشت [۳]:

$$H_L = \frac{Q_L^2}{2g(C_d A_1)^2} + H_{Lout} \quad (11)$$

که  $H_L$  ارتفاع معادل فشار آب داخل لوله در محل نشست،  $H_{Lout}$  ارتفاع آب آلوده بیرون محل نشست،  $Q_L$  دبی محل نشست،  $C_d$  ضریب روزنه و  $A_1$  سطح مقطع نشست می‌باشد. ضریب روزنه برای نشست  $C_d$  در مدل‌سازی این پژوهش براساس مطالعات آزمایشگاهی کواس [۲۲] برابر ۰/۶۷ در نظر گرفته شده‌است. افت ارتفاع آب معادل فشار  $\Delta H_1$  و  $\Delta H_2$  براساس رابطه افت بین نقاط ۱، ۲ و ۳ در شکل ۳ به صورت زیر ارائه می‌شود. شکل ۳، شماتیک سیستم مخزن-لوله- شیر همراه با نشست که جهت بررسی مکش ناگهانی آلودگی به درون خط انتقال، در این پژوهش مدل‌سازی شده را نمایش می‌دهد. مخزن بالادست، آب را از طریق لوله به محل شیر انتقال می‌دهد. نشست در فاصله  $L_1$  از مخزن واقع شده‌است.  $Z_{res}$  فاصله از سطح تراز مخزن برابر یک متر می‌باشد و لوله با شیب کم در زیر سطح تراز مخزن امتداد یافته‌است. با بسته شدن شیر در نقطه ۳، موج فشار منفی در لوله ایجاد می‌شود که بر اثر استقرار این فشار منفی در محل نشست (نقطه ۲)، آلودگی به درون لوله مکیده می‌شود. اینگونه فرض

$$B_m = B + R |Q_R| \quad (8)$$

سرعت موج فشاری ضربه‌قوچ در لوله با استفاده از رابطه زیر قابل تخمین است [۲۰]:

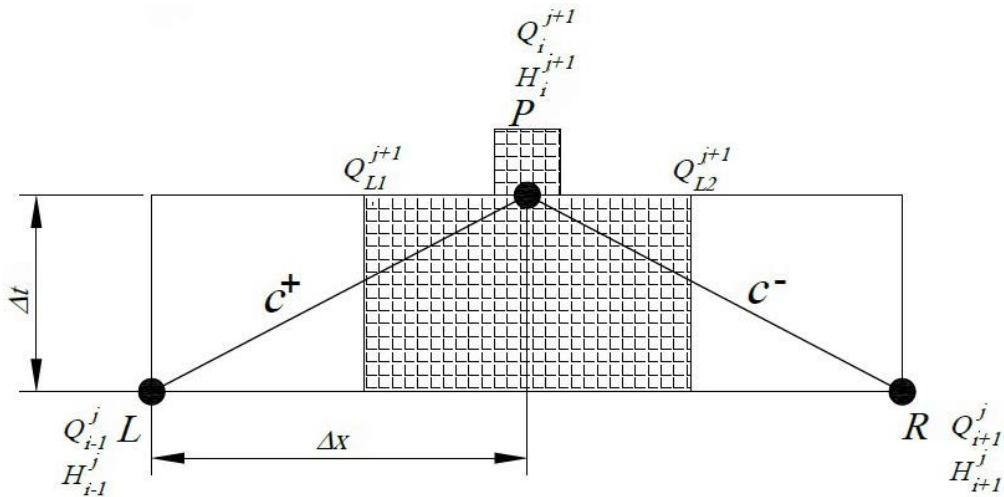
$$c = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{KD}{eE}}} \quad (9)$$

در این رابطه،  $c$  سرعت موج فشاری،  $k$  مدول بالک،  $\rho$  جرم واحد حجم سیال،  $D$  قطر لوله،  $e$  ضخامت جداره لوله و  $E$  مدول الاستیسیته مصالح لوله است. با کاهش سرعت سیال بر اثر بسته شدن ناگهانی شیر در پایین دست فشار سیال افزایش می‌یابد. در صورت تغییر ناگهانی (آنی) سرعت به اندازه  $\Delta V$ ، تغییر ناگهانی فشار با استفاده از رابطه زیر که به رابطه جکوفسکی معروف است، قابل محاسبه است [۲۰].

$$\Delta H_{wh} = -\frac{c}{g} \Delta V \quad (10)$$

### ۲-۱-۲- شرایط اولیه حل معادلات ضربه قوچ

برای تعیین شرایط اولیه جهت حل معادلات ضربه‌قوچ، دبی و ارتفاع آب معادل فشار در کلیه نقاط لوله در ابتدای گام زمانی با استفاده از روابط برنولی، افت، پیوستگی و روزنه در محل نشست، محاسبه شده‌است. با مشخص بودن ارتفاع آب در مخزن، ارتفاع آب معادل فشار در پشت شیر، ضریب زبری لوله، طول لوله و ابعاد محل



شکل ۴. شرایط مرزی ضربه قوچ در محل نشت با توجه به خطوط مشخصه

Fig. 4. Waterhammer boundary condition at leak point due to characteristics line.

که  $H_{res}$ ، ارتفاع پیزومتری آب در مخزن،  $Z_{res}$  فاصله از سطح تراز مخزن،  $f$  ضریب دارسی-ویسباخ،  $D$  قطر لوله،  $g$  گشتاب گرانش،  $A$  سطح مقطع لوله،  $A_1$  مساحت نشت،  $L_1$  طول لوله قبل از نشت،  $Q_L$  دبی محل نشت،  $Q_{L1}$  دبی قبل از نشت و  $H_{Lout}$  ارتفاع پیزومتری آب آلوده بیرون محل نشت،  $L_2$  طول لوله بعد از نشت،  $H_{valve}$  ارتفاع معادل فشار آب در پشت شیر و  $Z_{valve}$  فاصله از سطح تراز شیر می‌باشد. برای حل دو معادله دو مجهول غیرخطی ۱۵ و ۱۶ از روش تکرار نیوتن-رافسون استفاده می‌شود و به‌عنوان شرایط اولیه در حل معادله ضربه قوچ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۲-۱-۳- شرایط مرزی تحلیل هیدرولیک جریان گذرا

برای تعیین مجهولات در گام زمانی  $j+1$  در محل نشت، که شامل دبی قبل از نشت  $Q_{L1}^{j+1}$ ، دبی بعد از نشت  $Q_{L2}^{j+1}$ ، دبی نشت  $Q_L^{j+1}$  و ارتفاع معادل فشار  $H_i^{j+1}$  در محل نشت می‌باشد از حجم کنترل و نحوه استقرار خطوط مشخصه در شکل ۴، استفاده می‌شود. سه نقطه  $L, P, R$  در شکل ۴ سه گره مکانی بعد و قبل و محل نشت می‌باشند. طول گام زمانی  $\Delta t$  به‌عنوان فاصله زمانی بین گره زمانی  $j$  و  $j+1$  مشخص شده‌است. در گام زمانی  $t$ ، مقدار این مجهولات با استفاده از حل ماندگار مشخص است، برای تعیین این مجهولات در گام زمانی  $j+1$ ، با استفاده از معادلات  $C^+$  ۱۷ و  $C^-$  ۱۸ و رابطه

شده‌است که در محل نشت آب آلوده تحت فشار جو استقرار دارد (شرایط نمایش داده شده در شکل ۱).

$$\Delta H_1 = H_L - H_1 = \frac{f}{2DgA^2} L_1 (Q_{L1})^2 \quad (12)$$

$$\Delta H_2 = H_3 - H_L = \frac{f}{2DgA^2} L_2 (Q_{L2})^2 \quad (13)$$

با توجه به رابطه پیوستگی قبل و بعد از نشت، می‌توان نوشت

$$Q_{L1} = Q_L + Q_{L2} \quad (14)$$

با جایگذاری ارتفاع آب معادل مخزن با توجه به سطح مبنا و رابطه ارتفاع معادل فشار محل نشت (رابطه ۱۱) در رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ دو معادله دو مجهول ۱۵ و ۱۶ ایجاد می‌شود، که دبی محل نشت و دبی بعد از نشت با استفاده از این دو معادله محاسبه می‌شود.

$$H_{res} + Z_{res} - \frac{f}{2DgA^2} L_1 (Q_L + Q_{L2})^2 = \frac{Q_L^2}{2g(C_d A_1)^2} + H_{Lout} \quad (15)$$

$$\frac{Q_L^2}{2g(C_d A_1)^2} + H_{Lout} - \frac{f}{2DgA^2} L_2 (Q_{L2})^2 = Z_{valve} + H_{valve} + \frac{Q_{L2}^2}{2gA^2} \quad (16)$$

درصد بازشدگی شیر می‌باشد.

### ۲-۲-۲- مدل‌سازی پخش آلودگی در حالت گذرا

فرم ریاضی انتقال جرم یک خاصیت به وسیله معادله جابجایی-پخش ارائه می‌شود که از قانون فیک<sup>۱</sup> و پایستگی جرم استخراج می‌شود. سیال در خط لوله، به صورت یک‌بعدی فرض می‌شود و توزیع سرعت در هر مقطع به صورت یکنواخت و با یک سرعت میانگین در نظر گرفته می‌شود. معادلات مشتق جزئی سهمی‌گون درجه دو با اعمال ترم چشمه در شرایط مرزی و نادیده گرفتن اثر پخش به جهت سرعت زیاد سیال درون لوله، به فرم زیر ارائه می‌شود [۱۱]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (25)$$

که در معادله بالا،  $\phi$  خاصیت مورد نظر،  $u$  سرعت جریان،  $t$  زمان و  $x$  راستای مکان می‌باشد.

### ۲-۲-۱- روش لاگرانژی برای حل معادله جابجایی-پخش گذرا

برای حل معادله ۲۵ از طریق روش لاگرانژی، از قانون زنجیری<sup>۲</sup> در مشتق ۲۶ استفاده می‌شود [۱۱]:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{dx}{dt} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (26)$$

حال در معادله ۲۶ با فرض  $u = \frac{dx}{dt}$  معادله‌ای به فرم زیر ارائه می‌شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{dx}{dt} \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (27)$$

با مقایسه قانون زنجیری و رابطه قبل معادله جابجایی گذرا ۲۵ به صورت لاگرانژی به فرم ۲۸ ارائه می‌شود:

$$\frac{d\phi}{dt} = 0 \quad (28)$$

رابطه ۲۸ مدل لاگرانژی برای انتشار آلودگی را به بهترین وجه شرح می‌دهد. در روش لاگرانژی آلودگی به صورت بسته‌ای با حجم و غلظت ثابت فرض می‌شود که در طول لوله و با توجه به سرعت‌های مدل هیدرولیکی جابجا می‌شود. در این مدل حجم و غلظت بسته آلودگی در طول هر گام زمانی بدون تغییر در نظر گرفته می‌شود. تعداد

روزنه ۱۹ برای نشت و با جایگذاری این سه معادله در معادله پیوستگی ۲۰، معادله‌ای غیرخطی ۲۱ بدست می‌آید:

$$C^+ : Q_{L1}^{j+1} = \frac{C_p - H_i^{j+1}}{Bp} \quad (17)$$

$$C^- : Q_{L2}^{j+1} = \frac{H_i^{j+1} - C_m}{Bm} \quad (18)$$

$$Q_L^{j+1} = C_d A_l \sqrt{2g |H_i^{j+1} - H_{Lout}|} \quad (19)$$

$$Q_{L1}^{j+1} - Q_{L2}^{j+1} - Q_L^{j+1} = 0 \quad (20)$$

مقادیر  $C_p$  و  $C_m$  و  $B_p$  و  $B_m$  پارامترهایی هستند که با استفاده از مقادیر در گام زمانی قبل محاسبه شده‌اند. با حل معادله ۲۱ میزان ارتفاع معادل فشار در محل نشت  $H_i^{j+1}$  و سه دبی مجهول اطراف نشت محاسبه می‌شوند:

$$\left( \frac{C_p - H_i^{j+1}}{Bp} \right) - \left( \frac{H_i^{j+1} - C_m}{Bm} \right) - \left( C_d A_l \sqrt{2g |H_i^{j+1} - H_{Lout}|} \right) = 0 \quad (21)$$

در نقاط مرزی، یعنی در شیر و نقطه اتصال به مخزن، به ترتیب از مشخصه‌های مثبت و منفی به‌عنوان رابطه کمکی برای تعیین متغیرهای مجهول، استفاده می‌شود. در مخزن با مشخص بودن ارتفاع معادل فشار  $H_{res}^{n+1}$  با استفاده از مشخصه منفی میزان دبی در محل مخزن  $Q_{res}^{n+1}$  محاسبه می‌شود [۱۹].

$$C^- : H_{res}^{n+1} = C_m + Bm Q_{res}^{n+1} \quad (22)$$

در محل شیر با استفاده از مشخصه مثبت و رابطه روزنه دبی  $Q_p$  و ارتفاع معادل فشار  $H_p$  محاسبه می‌شوند.

$$\frac{Q_p}{Q_0} = \tau \sqrt{\frac{H_p}{H_0}} \quad (23)$$

$$\frac{Q_p}{Q_0} = \tau \sqrt{\frac{H_p}{H_0}} \quad (24)$$

که در آن اندیس 0 نشان‌دهنده شرایط جریان پایدار و پارامتر  $\tau$

1 Ficks law  
2 Chain law

دبی در محل نشت ضربه قوچ قابل استخراج است، استفاده شده است.

$$VCPT = \int_0^{\infty} \theta(-Q_L(t)) \times Q_L(t) \times dt \quad (31)$$

که  $VCPT$  حجم کل بسته‌های آلودگی،  $Q_L$  دبی محل نشت،  $dt$  گام زمانی هیدرولیکی ضربه قوچ،  $\theta$  هویساید فانکشن<sup>۳</sup> است که مقدار آن برای مقادیر مثبت یک و برای مقادیر منفی، صفر است. رابطه ۳۱ به صورت زیر ساده می‌شود.

$$VCPT = \Delta t \sum_{j=Nin}^n Q_{L(j)} \quad (32)$$

که  $\Delta t$  گام زمانی هیدرولیکی ضربه قوچ،  $Nin$  تا  $n$  تعداد کل گام‌های زمانی است که مقدار دبی محل نشت  $Q_L$  منفی است و مکش آلودگی به درون خط انتقال روی می‌دهد، می‌باشد. ماهیت غیرماندگار ضربه قوچ باعث می‌شود پس از مکش آلودگی در محل نشت، با رسیدن موج فشاری مثبت بعدی و افزایش فشار آب در محل نشت بخشی از آلودگی وارد شده به لوله مجدداً از محل نشت خارج شود. بنابراین ممکن است حجم آلودگی مستقر درون لوله در زمان میرا شدن کامل ضربه قوچ از مقدار  $VCPT$  کمتر باشد. در واقع  $VCPT$  فارغ از اینکه غلظت آلودگی وارد شده به محل نشت چه مقدار باشد به عنوان معیاری برای بررسی و تخمین ریسک مکش آلودگی به درون لوله در شرایط مختلف در نظر گرفته شده است. در واقع پارامتر  $VCPT$  هم از سهولت در محاسبه برخوردار است و هم به دلیل اندازه‌گیری بیشینه حجم آلودگی وارد شده به محل نشت، اعتبار لازم جهت تشخیص و تحلیل حساسیت مکش ناگهانی آلودگی را برخوردار می‌باشد. در این پژوهش فرض بر این است که شرایط اطراف محل نشت به صورت فاضلاب همگن در تعامل با فشار هوای آزاد مطابق شکل ۱ می‌باشد، لذا ضریب روزنه برای مدل‌سازی نشت براساس نتایج آزمایشگاهی کواس ۰/۶۷ در نظر گرفته شده است.

### ۳- اعتمادسنجی

در این پژوهش به دلیل وجود خطا در تعیین ضرایب خزش در مدل‌سازی خطی ویسکوالاستیک دیواره لوله با طول کم به وسیله

بسته‌های آلودگی بوجود آمده به مدل هیدرولیکی و تعداد سیکل‌های رفت و برگشتی موج فشاری ضربه قوچ وابسته است. به عبارتی حین وقوع ضربه قوچ و با استقرار موج فشاری منفی در محل نشت، آلودگی وارد لوله می‌شود و به سمت پایین دست یا بالادست محل نشت منتقل می‌شود. با آغاز سیکل بعدی ضربه قوچ موج فشاری مثبت به محل نشت می‌رسد و منجر به پاک شدن آلودگی در بالادست و انتقال مجدد بخشی از آلودگی به خارج از لوله و همچنین پایین دست محل نشت می‌شود. با استهلاك موج ضربه قوچ، حرکت رفت و برگشتی آلودگی در اطراف محل نشت پایان می‌یابد و در نهایت بخشی از آلودگی در لوله به دام می‌افتد [۱۲].

حجم آب آلوده وارد شده به لوله با توجه به گام‌های زمانی که دبی محل نشت منفی است و مکش آلودگی رخ می‌دهد محاسبه می‌شود. حجم بسته آلودگی  $VCPT$ <sup>۱</sup> و محل پیشانی آلودگی،  $LCP$ <sup>۲</sup> با استفاده از ۲۹ و ۳۰ قابل محاسبه است [۳].

$$VCPT(j) = \Delta t \sum_{j=Nin}^m Q_L(j) \quad (29)$$

$$LCP(j) = \frac{\Delta t \sum_{j=Nin}^m Q_{L1,2}(j)}{A} \quad (30)$$

ماهیت غیرماندگار ضربه قوچ موجب می‌شود جهت دبی در اطراف محل نشت دائم دچار تغییر شود، این امر سبب می‌شود رفتار آلودگی وارد شده به لوله به صورت رفت و برگشتی باشد. اگر نحوه بسته شدن شیر به صورت کامل باشد، بسته آلودگی در اطراف محل نشت به دام می‌افتد. چنانچه بستن شیر به صورت تدریجی باشد بسته آلودگی به سمت مصرف کننده پایین دست حرکت می‌کند. پس چون دبی ناشی از ضربه قوچ در محل نشت دائم در حال تغییر است، برای تعیین محل پیشانی آلودگی در لوله با توجه به جهت دبی در آن گام زمانی، از دبی بالادست  $Q_{L1}$  و دبی پایین دست نشت  $Q_{L2}$  استفاده می‌شود. در رابطه ۳۰،  $A$  سطح مقطع لوله است.

در این پژوهش برای بررسی ریسک مقدار مکش آلودگی و عوامل موثر بر آن از بررسی میزان غلظت آلودگی و مقدار جابجایی آن، صرف نظر شده است و از پارامتر  $VCPT$  که مستقیماً با استفاده از

1 Volume of contaminated parcel

2 Location of contaminated parcel

3 Heaviside funcion



#### ۴- بحث و نتیجه گیری

##### ۴-۱- بررسی اندرکنش عوامل موثر در مکش ناگهانی آلودگی در سیستم خط انتقال کوتاه و بلند

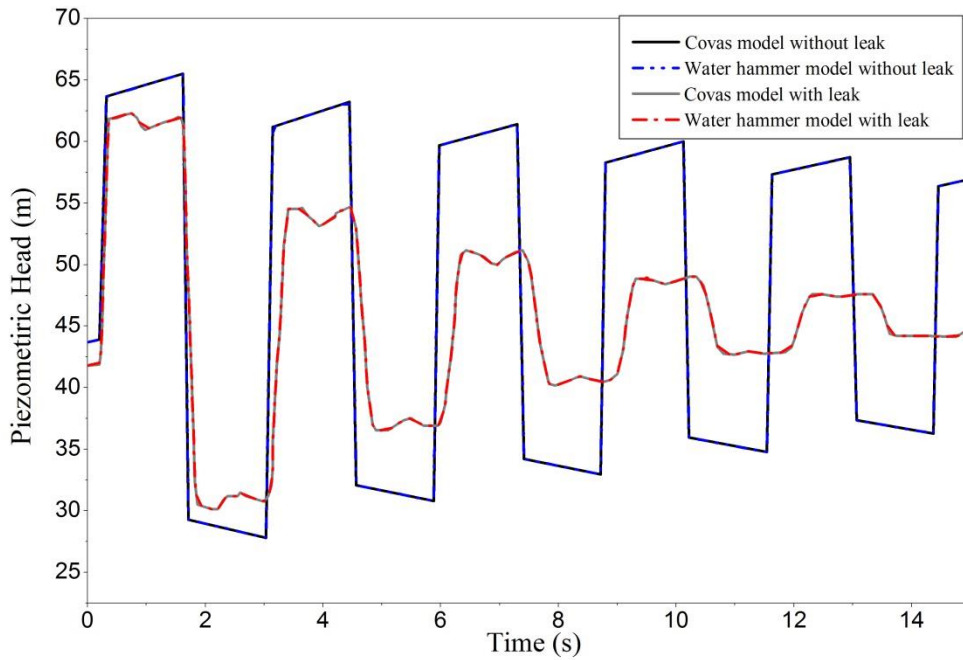
در این پژوهش به جهت ارائه شناختی جامع از پدیده مکش ناگهانی آلودگی در شرایط متغیر، بررسی هم‌افزایی عوامل تاثیرگذار و ارائه راهکارهای عملی برای مهار آن به بررسی پدیده در ۷۲ حالت متفاوت پرداخته شده‌است. در هر کدام از حالات محل‌های متنوع نشت، ابعاد گوناگون نشت، سرعت‌های متفاوت سیال و فشار مخزن متفاوت در لوله‌های الاستیک و ویسکوالاستیک برای خطوط انتقال کوتاه و بلند مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج به‌صورت کامل در جدول ۳ ارائه شده‌است. جهت بررسی عملکرد لوله‌های الاستیک و ویسکوالاستیک دو شرایط متفاوت برای خط انتقال در نظر گرفته شده‌است، به گونه‌ای که این شرایط جامعیت لازم جهت استنتاج و نتیجه‌گیری کلی را داشته باشد، همچنین امکان مکش آلودگی در شرایط گوناگون بررسی و اثبات شود. در حالت اول برای یک خط لوله با طول ۲۳۰۰ متر و قطر ۶۰۰ میلی‌متر و ارتفاع معادل فشار انتهایی خط انتقال برابر با ۴۰ متر که می‌تواند نمادی از سیستم انتقال آب بین شهری باشد و در حالت دوم یک خط لوله با طول ۵۴۰ متر و قطر ۱۰۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است که نماد سیستم انتقال درون شهری می‌باشد. محل نشت در نقاط وسط یک سوم ابتدایی و یک سوم انتهایی لوله در نظر گرفته شده‌است. دو نسبت باز شدگی

ضربه‌قوچ [۲۱]، از محاسبه دقیق رفتار تاخیری فشار در لوله‌های ویسکوالاستیک صرف‌نظر شد و با تقریب مناسب از سرعت موج کوچک‌تر جهت بررسی اثرات این لوله‌ها در جریان گذرا استفاده شده‌است. نتایج محاسباتی در حالت الاستیک با استفاده از نتایج ارائه شده در تز کوواس مقایسه و صحت‌سنجی شد [۲۲]. مدل کوواس به‌صورت یک سیستم مخزن-لوله-شیر قابل مدل‌سازی است که از یک خط لوله به طول ۲۷۷ متر تشکیل شده‌است، که سایر مشخصات این سیستم در جدول ۱ ارائه شده‌است. از آنجا که پارامتر  $V_{CPT}$  مستقیماً با استفاده از دبی نشت استخراج شده از مدل‌سازی ضربه قوچ استخراج شده‌است، لذا صرفاً صحت مدل‌سازی ضربه قوچ در حالت الاستیک با نشت جهت تایید مدل‌سازی ارائه شده، در این پژوهش بسنده می‌باشد. به‌عبارت دیگر چون مدل‌سازی رفتار لوله‌های ویسکوالاستیک در این پژوهش صرفاً با کاهش سرعت موج فشاری مدل شده‌است، صحت مدل‌سازی الاستیک، مدل‌سازی ویسکوالاستیک را نیز تایید می‌نماید. نتایج حل عددی فشار در نقطه واقع در فاصله ۲۷۰ متری از مخزن بالادست مدل کوواس، ارائه شده در مرجع [۲۲] استخراج شده‌است. برای صحت‌سنجی، نتایج مدل‌سازی این پژوهش در شکل ۵ با نتایج تز کوواس در دو حالت با نشت و بدون نشت مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود جواب‌ها از دقت و همگرایی خوبی برخوردار می‌باشند که این امر نشان دهنده صحیح بودن مدل‌سازی انجام شده‌است.

جدول ۱. مشخصات مخزن و لوله انتقال

Table 1. Reservoir and pipeline specifications.

44/8 m	ارتفاع آب در مخزن ( $H_{res}$ )	50/6 mm	قطر داخلی لوله
1 m	فاصله از سطح تراز مخزن ( $Z_{res}$ )	5000 kg/m <sup>3</sup>	جرم مخصوص لوله
0/0000152 m <sup>2</sup>	مساحت موثر نشت	277 m	طول لوله
270 m	محل استقرار ترنس‌دیوسر	210 GPa	مدول یانگ (steel)
42/3 m	فشار محل نشت	0/46	نسبت پواسن
1/6 m	فاصله از سطح تراز محل نشت	1000 m/s	سرعت موج (steel)
162/4 m	فاصله محل استقرار نشت از مخزن	380m/s	سرعت موج (PVC)
0/98 m <sup>3</sup> /s	دبی جریان پایدار بعد از نشت	0/02	ضریب افت (f)
0/16 s	زمان بسته شدن شیر	15 s	زمان مدل‌سازی



شکل ۵. مقایسه نتایج مدل سازی ضربه قوچ در حالت بدون نشت و با نشت با نتایج آزمایشگاهی کواس  
 Fig. 5. Comparison of modeling results with covas experimental results.(with and without leak).

جدول ۲. مشخصات مخزن و لوله انتقال

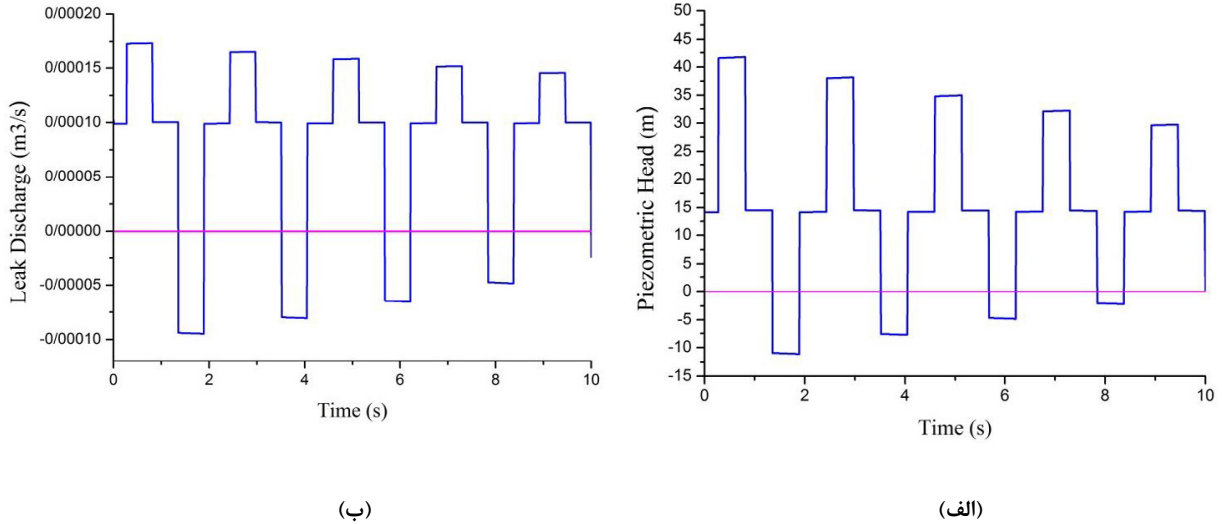
Table 2. Reservoir and pipeline specifications.

آزمایش 2	آزمایش 1		آزمایش 2	آزمایش 1	
متغیر	متغیر	ارتفاع آب در مخزن ( $H_{res}$ )	10/8mm	600mm	قطر داخلی لوله
1m	1m	فاصله از سطح تراز مخزن ( $Z_{res}$ )	540m	2300m	طول لوله
14m	40m	فشار در پشت شیر ( $H_{valve}$ )	390m/s	390m/s	سرعت موج (PVC)
متغیر	متغیر	مساحت موثر نشت	1000m/s	1000m/s	سرعت موج (steel)
متغیر	متغیر	محل استقرار نشت از مخزن	0/02	0/02	ضریب افت (f)
1m	1m	فشار محل نشت ( $H_{Lout}$ )	100s	100s	زمان مدل سازی
0m	0 m	فاصله از سطح تراز نشت	0s	0s	زمان بسته شدن شیر
1m	1m	فاصله از سطح تراز شیر ( $Z_{valve}$ )	0/67	0/67	ضریب روزه نشت

مختلف بررسی شود. جدول ۲ مشخصات کلی آزمایش ۱ و ۲ را نمایش می دهد.

شکل ۶- الف نمودار سری زمانی فشار در محل نشت برای آزمایش دو، به ازای دبی حالت ماندگار ۲/۶ لیتر بر ثانیه، محل نشت ۲۷۰ متری از مخزن و نسبت بازشدگی نشت  $\delta = 0/001$  را نشان می دهد. خط صورتی رنگ فشار در محل نشت برابر با صفر را نشان

نشت برابر با نسبت مساحت نشت به مساحت سطح مقطع لوله  $\delta$  برابر با ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است، به عنوان نشت کوچک و نشت بزرگ و اثر هر کدام جداگانه بررسی شده است. میزان سرعت سیال موجود در لوله برابر با سه مقدار ۰/۵ و ۱ و ۲ متر بر ثانیه اعمال شده است که سرعت های ممکن در سیستم انتقال آب شهری می باشد، تا اثر هر یک در مکش آلودگی به صورت مجزا و در شرایط



شکل ۶. نمودار سری زمانی فشار (الف) دبی (ب) در محل نشت برای آزمایش دو، به ازای دبی حالت ماندگار ۲/۶ لیتر بر ثانیه، محل نشت ۲۷۰ متری از مخزن و نسبت بازشدگی نشت  $\delta = 0.001$

Fig. 6. a. Pressure head time series at the leak location, Test 2, elastic pipe. ( $Q_0=2.6 \text{ l/s}, x_l = 270 \text{ m}, \delta = 0.001$ ) b. Discharge time series at the leak location, Test 2, elastic pipe. ( $Q_0=2.6 \text{ l/s}, x_l = 270 \text{ m}, \delta = 0.001$ )

جدول ۳. مقایسه حجم آلودگی وارد شده در لوله الاستیک و ویسکوالاستیک

Table 3. Volume of contaminant intrusion Comparison in elastic and viscoelastic.

آزمایش (2)					آزمایش (1)				
حجم آلودگی وارد شده به لوله ویسکوالاستیک (لیتر)	حجم آلودگی وارد شده به لوله الاستیک (لیتر)	سرعت سیال (متر بر ثانیه)	محل نشت از مخزن (متر)	نسبت بازشدگی نشت	حجم آلودگی وارد شده به لوله ویسکوالاستیک (لیتر)	حجم آلودگی وارد شده به لوله الاستیک (لیتر)	سرعت سیال (متر بر ثانیه)	محل نشت از مخزن (متر)	نسبت بازشدگی نشت
0/26	0/33	0/50	180	0/001	0/00	4/73	0/50	800	0/001
0/21	0/63	1/00	180	0/001	0/00	44/42	1/04	800	0/001
0/18	0/73	2/03	180	0/001	8/08	82/59	2/09	800	0/001
0/10	0/46	0/51	270	0/001	0/00	6/72	0/50	1100	0/001
0/32	0/88	1/00	270	0/001	0/00	60/47	1/04	1100	0/001
0/27	1/09	2/03	270	0/001	10/99	113/68	2/08	1100	0/001
0/10	0/43	0/51	360	0/001	0/00	5/82	0/50	1500	0/001
0/40	0/88	1/00	360	0/001	0/00	64/02	1/04	1500	0/001
0/34	1/18	2/02	360	0/001	14/06	130/20	2/08	1500	0/001
0/00	0/27	0/51	180	0/01	0/00	0/00	0/50	800	0/01
0/63	0/97	1/07	180	0/01	0/00	45/55	1/01	800	0/01
0/92	1/85	2/12	180	0/01	0/00	175/79	2/08	800	0/01
0/00	0/38	0/52	270	0/01	0/00	0/00	0/51	1100	0/01
0/92	1/16	1.04	270	0/01	0/00	59/64	1/01	1100	0/01
1/36	2/20	2/1	270	0/01	0/92	221/30	2/1	1100	0/01
0/00	0/17	0/50	360	0/01	0/00	0/00	0/5	1500	0/01
0/85	0/95	1/00	360	0/01	0/00	31/65	1/0	1500	0/01
1/48	1/83	2/1	360	0/01	0/00	186/13	2/0	1500	0/01

#### ۴-۱-۲- اندرکنش سرعت سیال و فشار مخزن در مکش ناگهانی آلودگی

افزایش سرعت سیال در کلیه تست‌ها سبب افزایش مکش آلودگی به درون لوله شده‌است، به جز در آزمایش دو به ازای نسبت بازشدگی ۰/۰۰۱ و استقرار نشت در نقاط مختلف میزان آلودگی وارد شده به لوله ویسکوالاستیک در سرعت ۲ متر بر ثانیه کمتر از حالتی است که سرعت ۱ متربرثانیه می‌باشد. دلیل این عملکرد مربوط به نحوه اندرکنش ارتفاع آب فشار مخزن و موج فشاری ناشی از ضربه‌قوچ می‌باشد، در این آزمایش افزایش سرعت سیال درون لوله به سبب افزایش فشار مخزن بالا دست می‌باشد، بنابراین افزایش فشار مخزن بالا دست با افزایش سرعت سیال درون لوله براساس رابطه ۲ منجر به افزایش موج فشار منفی ضربه قوچ می‌شود. از طرفی افزایش فشار مخزن بالادست مخزن سبب افزایش فشار نسبی در امتداد لوله می‌شود. به عبارتی افزایش فشار مخزن در یک محدوده که سرعت بین ۰/۵ تا ۱ متربرثانیه است منجر به غلبه موج فشار منفی ضربه قوچ بر فشار مخزن بالادست می‌گردد و باعث مکش بیشتر آلودگی به درون لوله می‌شود ولی در محدوده سرعت ۲ متربرثانیه فشار مخزن بالادست در امتداد لوله غالب شده و از مکش بیشتر آلودگی توسط موج فشار منفی ضربه‌قوچ به درون لوله جلوگیری نموده‌است. نتایج آزمایشگاهی جونز و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی اثر سرعت سیال و فشار مخزن بالا دست بر حجم مکش آلودگی این موضوع را تایید می‌نماید [۱۵].

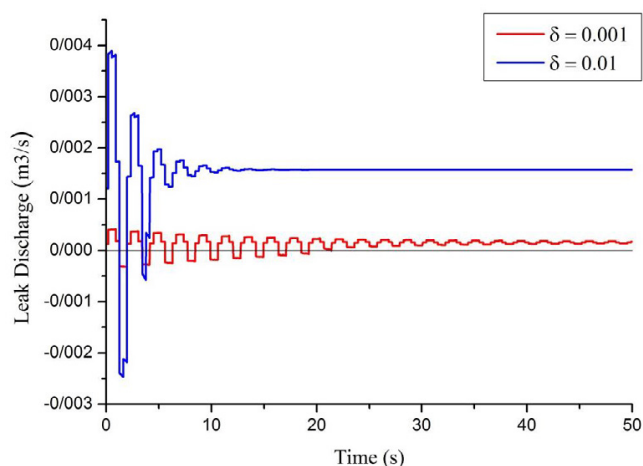
#### ۴-۱-۳- اندرکنش سرعت سیال و اندازه قطر نشت در مکش ناگهانی آلودگی

در سرعت پایین (۰/۵ متربرثانیه) با افزایش قطر نشت میزان آلودگی وارد شده به لوله در کلیه حالات کاهش یافته‌است، این در حالی است که در سرعت متوسط و زیاد (۱ و ۲ متربرثانیه) با افزایش قطر نشت میزان آلودگی وارد شده به لوله افزایش یافته‌است. در واقع در سرعت پایین، افزایش قطر نشت به دلیل افزایش خروج سیال از لوله حین رسیدن موج فشار مثبت ضربه‌قوچ، سبب استهلاک این موج فشاری می‌شود، و این امر سبب کاهش قدرت موج فشار منفی در سیکل سوم ضربه‌قوچ شده که در نهایت سبب کاهش مکش آلودگی به لوله می‌شود. اما در سرعت‌های متوسط و زیاد چون موج فشاری

می‌دهد. تعداد برخورد نمودار فشار در محل نشت با خط صورتی رنگ، در واقع نشان‌دهنده تعداد سیکل‌های ورود آلودگی بر اثر ضربه‌قوچ را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود طی زمان ۱۰ ثانیه مدل‌سازی این آزمایش چهار سیکل ورود آلودگی رخ داده‌است. هم‌چنین شکل ۶-ب نیز نمودار سری زمانی دبی محل نشت برای آزمایش دو، به ازای دبی حالت ماندگار ۲/۶ لیتربرثانیه، محل نشت ۲۷۰ متری از مخزن و نسبت بازشدگی نشت  $\delta = 0/001$  را نمایش می‌دهد. مساحت محصور بین نمودار دبی و خط صورتی رنگ (دبی برابر با صفر) حجم آلودگی وارد شده از محل نشت را نمایش می‌دهد. در واقع این مساحت مفهوم فیزیکی پارامتر  $V_{CPT}$  را نمایش می‌دهد. مقایسه دو نمودار شکل ۶-الف و ۶-ب مطابقت و وابستگی دبی و فشار در محل نشت را براساس رابطه ۱۱ نمایش می‌دهد.

#### ۴-۱-۴- اثر جنس لوله در مکش ناگهانی آلودگی

حجم آلودگی وارد شده به آزمایش یک با میانگین ۳۵/۲ لیتر در کلیه حالات بیش از آزمایش دو با میانگین ۰/۶۸ لیتر می‌باشد که این امر به دلیل ابعاد بزرگتر سیستم انتقال در آزمایش یک می‌باشد. نسبت میانگین آلودگی وارد شده به لوله در آزمایش یک در حالت لوله ویسکوالاستیک به حالت لوله الاستیک برابر با ۲/۷٪ می‌باشد. هم‌چنین نسبت میانگین آلودگی وارد شده به لوله در آزمایش دو در حالت لوله ویسکوالاستیک به حالت لوله الاستیک برابر با ۴۹/۶٪ می‌باشد. در هر دو آزمایش به تفکیک هر یک از حالات، حجم آلودگی وارد شده به لوله ویسکوالاستیک کمتر از حجم آلودگی وارد شده به لوله الاستیک می‌باشد، گرچه در آزمایش دوم این نسبت بزرگتر می‌باشد و لیکن این امر به دلیل ابعاد کوچک‌تر آزمایش دو می‌باشد. جنس مواد بکارگرفته شده در لوله‌های ویسکوالاستیک به گونه‌ای می‌باشد که در برابر افزایش فشار عکس العمل نشان داده و دچار کرنش محیطی می‌شود، این امر نه تنها موجب میرا شدن سریع‌تر موج فشاری ضربه‌قوچ در این نوع لوله‌ها می‌شود بلکه کاهش سرعت موج در این لوله‌ها نیز موجب کاهش بزرگی فشار حین بسته شدن شیر می‌گردد (رابطه ۲)، لذا این نوع لوله‌ها به دلیل استهلاک سریع موج ضربه قوچ نسبت به لوله‌های الاستیک باعث مکش کمتر آلودگی به درون خطوط انتقال می‌گردند.



شکل ۷. نمودار سری زمانی ارتفاع معادل فشار به ازای دو نسبت بازشدگی نشت در آزمایش دو ( $v=2 \text{ m/s}, x_l = 360 \text{ m}$ )

Fig. 7. Pressure head time series at the leak location for different leak ratio, Test 2. ( $v=2 \text{ m/s}, x_l = 360 \text{ m}$ )

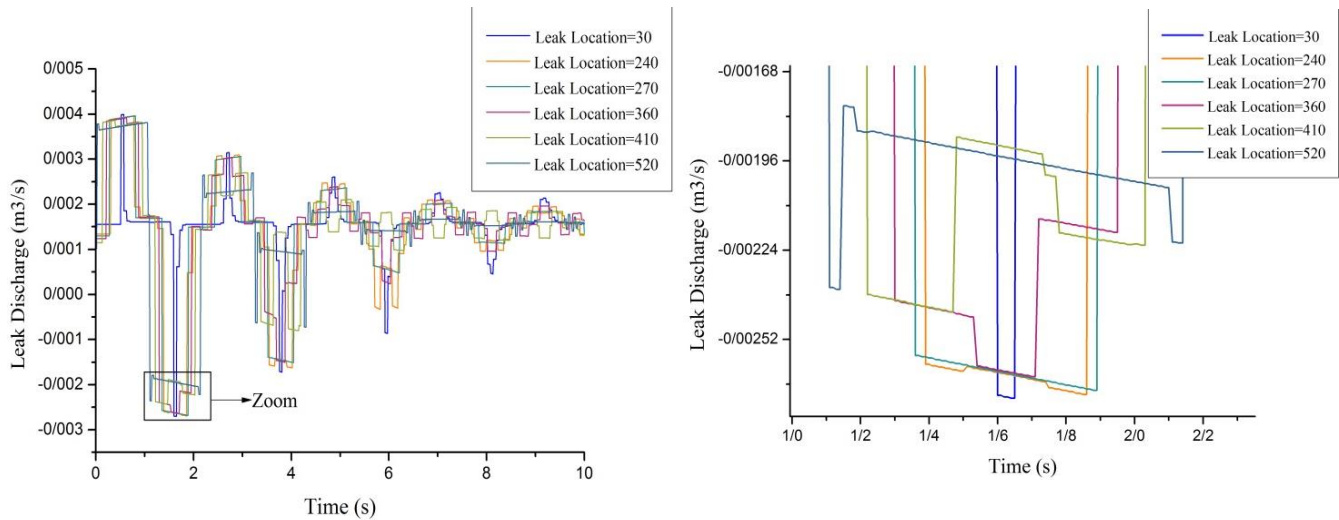
لوله در نشت‌هایی رخ داده‌است که در وسط خط لوله واقع شده‌اند. از آنجایی که ماندگاری فشار منفی در امتداد لوله از مخزن به سمت شیر به صورت خطی تغییر می‌کند لذا می‌بایست عامل این رخداد را در مقدار فشار منفی به ازای مکان‌های متفاوت نشت مورد بررسی قرار داد. موج فشاری ناشی از ضربه‌قوچ پس از شکل‌گیری بر اثر بسته شدن شیر ایجاد می‌شود و در امتداد لوله به سمت مخزن حرکت می‌کند، حال زمانی که این موج فشاری به محل نشت می‌رسد، بر اثر برخورد این موج به محل نشت بخشی از موج به حرکت خود به سمت مخزن ادامه می‌دهد و بخشی از آن باز به سمت شیر بازتاب می‌شود، برخورد و اندرکنش این امواج فشاری اثراتی بر میزان فشار در نقاط مختلف در امتداد لوله ایجاد می‌کند و سبب می‌شود بیشینه مکش آلودگی به ازای نشت در وسط لوله رخ دهد. شکل ۸ نمودارهای سری زمانی دبی برای نشت به ازای سرعت سیال یک متربرثانیه و نسبت بازشدگی نشت  $\delta = 0.01$  در نقاط مختلف در حالت الاستیک برای آزمایش دو را به نمایش کشیده‌است. در حالتی که نسبت بازشدگی نشت  $\delta = 0.01$  می‌باشد به دلیل ابعاد بزرگ‌تر نشت تاثیر موج فشاری بازتاب‌شده از محل نشت به نسبت بیشتر می‌شود و نحوه اندرکنش امواج فشاری در امتداد لوله به‌عنوان عامل تعیین‌کننده در مکش آلودگی وارد عمل می‌شود. اثر تداخل امواج فشاری ناشی از مکان‌های متفاوت نشت بر بیشینه مکش آلودگی به صورت کامل در شکل ۸ به

منفی از قدرت لازم برخوردار است و آستانه حساسیت نسبت به سرعت را پشت سر گذاشته‌است لذا در این حالت پارامتر تاثیرگذار در مکش آلودگی قطر نشت می‌باشد و با افزایش قطر نشت میزان آلودگی وارد شده به لوله نیز افزایش یافته‌است.

#### ۴-۱-۴- اندرکنش مکان نشت و اندازه قطر نشت در مکش ناگهانی آلودگی

اظهار نظر در رابطه با نحوه رفتار مکش آلودگی بر اثر مکان‌های مختلف نشت به دلیل ماهیت موج فشاری ضربه‌قوچ و اندرکنش اثر برخورد این موج با محل نشت تا حدودی پیچیده می‌باشد. نتایج مشاهدات آزمایش یک و دو نشان می‌دهد به ازای نسبت بازشدگی نشت برابر با  $0.001$  در هر دو آزمایش با فاصله گرفتن از مخزن و نزدیک شدن به محل شیر حجم آلودگی وارد شده به خط انتقال افزایش یافته‌است. این امر گواه این است که در نسبت بازشدگی نشت  $\delta = 0.001$  زمان ماندگاری فشار منفی در محل نشت نقش اصلی را ایفا نموده‌است. در واقع هر چقدر محل نشت به شیر نزدیک‌تر باشد زمان ماندگاری فشار منفی در سیکل سوم ضربه‌قوچ در آن نقطه بیشتر خواهد بود لذا حجم آلودگی بیشتری به نقاط نشت در نزدیکی شیر وارد خواهد شد. شکل ۷ دبی محل نشت به ازای دو نسبت بازشدگی نشت برای آزمایش ۲، محل استقرار نشت در فاصله  $360$  متری از مخزن در سرعت سیال  $2$  متربرثانیه و در حالت الاستیک را به تصویر کشیده‌است. به وضوح مشخص است که در نسبت بازشدگی نشت برابر با  $0.001$  به دلیل کوچک بودن ابعاد نشت موج فشار ضربه‌قوچ در فاصله زمانی بیشتری در مقایسه با نسبت بازشدگی نشت برابر با  $0.01$   $\delta$  میرا شده‌است. در نسبت بازشدگی نشت برابر با  $0.001$   $\delta$  تعداد سیکل‌های مکش آلودگی و متعاقب آن مدت زمان ماندگاری فشار منفی در محل نشت بیشتر است. اما در شرایطی که نسبت بازشدگی نشت برابر با  $0.01$  می‌باشد، مقدار فشار منفی در محل نشت به عنوان عامل تاثیرگذار وارد عمل شده‌است و مدت زمان ماندگاری فشار منفی در این حالت تاثیر کمتری را بر حجم مکش آلودگی داشته‌است. از طرف دیگر ابعاد بزرگ‌تر نشت منجر به میرایی هرچه سریع‌تر موج فشاری ضربه‌قوچ شده‌است.

در شرایطی که نسبت بازشدگی نشت برابر با  $0.01$  باشد، در هر دو آزمایش مشاهده می‌شود بیشینه حجم آلودگی وارد شده به



شکل ۸. اثر مکان نشت در نحوه انتشار موج فشار منفی ضربه قوچ  
**Fig. 8. Effect of leak location on waterhammer negative wave propagation.**

این حالت میزان ماندگاری فشار منفی نقش اصلی در مکش آلودگی را به عهده دارد.

#### ۵- نتیجه گیری

نفوذ آلودگی در خطوط انتقال مکانیزم پراهمیتی است، که ممکن است منجر به بروز زوال کیفیت آب آشامیدنی شود. سه عامل موثر در مکش آلاینده‌ها به خطوط انتقال آب، شامل منبع آلودگی، فشارهای وارده به سیستم و محل مکش آلودگی می‌باشد. این پژوهش با توجه به اهمیت مسئله مکش ناگهانی آلودگی به خطوط انتقال آب بر اثر نوسانات جریان غیرماندگار، با ارائه یک مدل ریاضی و عددی، عوامل تاثیرگذار بر این پدیده را در محدوده گسترده‌ای از متغیرها مورد تحلیل و بررسی قرار داده‌است، تا بتواند شناخت نسبتاً جامع را از پدیده مکش ناگهانی آلودگی را ارائه دهد. در این پژوهش در قالب نمونه‌ای از یک خط انتقال کوتاه و بلند در قالب ۷۲ حالت مختلف از ابعاد نشت، محل نشت، سرعت سیال و جنس لوله متفاوت نحوه اندرکنش عوامل تاثیرگذار در مکش ناگهانی آلودگی بررسی شده‌است. در این پژوهش برای مدل‌سازی جریان گذرا از روش اولری مشخصه‌ها استفاده شد. کل حجم آلودگی ورودی  $V_{CPT}$  از محل نشت که برگرفته از حل لاگرانژی معادله انتقال آلودگیست، به عنوان ملاک مقایسه برای حالت‌های گوناگون اتخاذ شده‌است.

نمایش کشیده شده‌است. همانگونه که از شکل ۸ برداشت می‌شود با فاصله گرفتن محل نشت از مخزن زمان ماندگاری فشار منفی افزایش یافته‌است. اما نحوه تغییرات مقدار فشار منفی دست‌خوش تغییراتی شده‌است که همان‌گونه که بیان شد ناشی از اندرکنش امواج فشاری ایجاد شده در امتداد لوله می‌باشند. با نزدیک شدن محل استقرار نشت به محل شیر ماکزیمم فشار منفی کاهش یافته‌است. با دقت در شکل ۸ و با توجه به اینکه سطح محصور در هر نمودار حجم آلودگی وارد شده به لوله را نمایش می‌دهد. می‌توان پی برد که چرا میزان مکش آلودگی به ازای استقرار نشت در وسط لوله بیشینه شده‌است. خط سبز رنگ در شکل ۸ که تغییرات دبی برای نشت در وسط لوله و فاصله ۲۷۰ متری از مخزن را نمایش می‌دهد، بیشترین سطح زیر نمودار را به خود اختصاص داده‌است.

پس به دلیل این‌که اندرکنش امواج فشاری در امتداد لوله به ازای استقرار نشت در وسط لوله رفتار هماهنگ‌تری از خود نشان می‌دهند و از نظر بزرگی فشار منفی و زمان ماندگاری فشار منفی مقدار بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند، لذا حجم آلودگی وارد شده به لوله به ازای نسبت بازشدگی  $\delta = 0/01$  در وسط لوله به بیشینه مقدار خود رسیده است. این در حالیست که همانگونه که پیشتر اشاره شده در نسبت باز شدگی  $\delta = 0/001$  چون ابعاد نشت کوچک است، اثر اندرکنش امواج فشاری در طول لوله کم است و در

## ۶- تشکر و قدردانی

لازم می‌دانم از دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور که زمینه را برای انجام این پژوهش را فراهم آورد، کمال تشکر و قدردانی را به‌عمل آورم.

## مراجع

- [1] Grayman, W. M., Rossman, L. A., & Geldreich, E. E. (1999). Water quality. *Water distribution systems handbook*.
- [2] Lindley, T. R. (2001). *A framework to protect water distribution systems against potential intrusions* (Doctoral dissertation, University of Cincinnati).
- [3] Mansour Rezaei Fumani, S. (2013). *Contaminant intrusion in water distribution systems: Advanced modelling approaches* (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- [4] Schuster, C. J., Aramini, J. J., Ellis, A. G., Marshall, B. J., Robertson, W. J., Medeiros, D. T., & Charron, D. F. (2005). Infectious disease outbreaks related to drinking water in Canada, 1974–2001. *Canadian Journal of Public Health*, 96(4), 254-258.
- [5] Collins, R., Boxall, J., Besner, M. C., Beck, S., & Karney, B. (2010). Intrusion modelling and the effect of ground water conditions. In *Water Distribution Systems Analysis 2010* (pp. 594-585).
- [6] Karim, M. R., Abbaszadegan, M., & LeChevallier, M. (2003). Potential for pathogen intrusion during pressure transients. *Journal-American Water Works Association*, 95(5), 134-146.
- [7] Thomson, J., & Wang, L. (2009). *State of technology review report on condition assessment of ferrous water transmission and distribution systems*. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- [8] Kirmeyer, G. J., Friedman, M., Martel, K., Howie, D., LeChevallier, M., Abbaszadegan, M., ... & Harbour, J. (2001). Pathogen Intrusion into the Distribution

نتایج حاکی از آن است که بیشینه مکش آلودگی در آزمایش یک در حالت لوله الاستیک به ازای سرعت زیاد (۲ متربرثانیه) و نسبت بازشدگی نشت  $\delta = 0/01$  و به ازای استقرار نشت در یک سوم انتهایی لوله و نزدیک به شیر رخ داده‌است، که مقدار آن برابر با  $186/13$  لیتر می‌باشد. همچنین این رویه برای لوله الاستیک و ویسکوالاستیک در آزمایش دو نیز دوباره تکرار شده‌است و بیشترین مکش آلودگی به ازای قطر نشت زیاد و در سرعت‌های زیاد و در یک سوم انتهایی لوله رخ داده‌است. بیشینه حجم آلودگی وارد شده به لوله در حالت الاستیک برابر با  $1/83$  لیتر و در حالت ویسکوالاستیک برابر با  $1/48$  لیتر اندازه‌گیری شده‌است. در حالت لوله ویسکوالاستیک در آزمایش یک به دلیل پایین بودن سرعت موج فشاری ضربه‌قوچ و بالا بودن فشار در محل شیر، موج فشاری ضربه‌قوچ توان تولید فشار منفی را نداشته‌است. پس بنابراین به عنوان یک توصیه اجرایی می‌توان اظهار نمود که نشت‌ها با قطر زیاد و مستقر در نزدیکی شیر بحرانی‌ترین حالت مکش آلودگی را شکل می‌دهند، بنابراین جهت جلوگیری و اعمال پیشگیری‌های لازم از مکش آلودگی ناگهانی ناشی از ضربه قوچ بررسی‌های میدانی در یک سوم انتهایی لوله از اهمیت بالاتری برخوردارند.

در کلیه شرایط به تفکیک مشاهده می‌شود حجم آلودگی وارد شده به لوله ویسکوالاستیک کمتر از حجم آلودگی وارد شده به لوله الاستیک می‌باشد که این امر به وضوح برتری لوله‌های ویسکوالاستیک را در جلوگیری از مکش آلودگی به رخ می‌کشد. میرا شدن سریع‌تر موج فشاری ضربه‌قوچ و کاهش سرعت موج فشاری دو عامل تاثیرگذار در این نوع لوله‌هاست که سبب کاهش مکش آلودگی به درون لوله می‌گردد. بررسی نتایج آزمایش یک در حالت الاستیک و ویسکوالاستیک نشان می‌دهد، یکی از مهم‌ترین عوامل جلوگیری از مکش آلودگی بر اثر ضربه‌قوچ هد پایین‌دست در محل شیر می‌باشد. در واقع برای جلوگیری از مکش آلودگی بهترین راه از بین بردن عوامل ایجادکننده آن است، پس اگر طراحی خطوط انتقال به گونه‌ای باشد که فشار منفی در آن ایجاد نشود به تبع مکش آلودگی در محل نشت نیز رخ نمی‌دهد. پس بنابراین فشار در محل شیر یکی از عواملی است که هم به راحتی قابل کنترل توسط طراح است و هم نقش موثری در جلوگیری از ورود آلودگی ایفا می‌کند، بنابراین شرط عدم مکش آلودگی به صورت  $H_{valve} \geq \Delta H_{wh}$  قابل کنترل است.

- due to transients in distribution systems. *Procedia Engineering*, 89, 1306-1313.
- [16] Fontanazza, C. M., Notaro, V., Puleo, V., Nicolosi, P., & Freni, G. (2015). Contaminant intrusion through leaks in water distribution system: experimental analysis. *Procedia Eng*, 119, 426-433.
- [17] Payasteh M., Keramat A. (2020). Sensitivity Analysis of Hydraulic Parameters on Contaminant Intrusion in Transient Conditions. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(5).
- [18] Covas, D., Stoianov, I., Mano, J. F., Ramos, H., Graham, N., & Maksimovic, C. (2005). The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part II—Model development, calibration and verification. *Journal of Hydraulic Research*, 43(1), 56-70.
- [19] Chaudhry, M. H. (2014). Applied hydraulic transients.
- [20] Joukowski, N. E. (1898). Memoirs of the imperial academy society of St. Petersburg. *Proceedings of the American Water Works Association*, 24, 341-424.
- [21] Keramat, A., & Haghighi, A. (2014). Straightforward transient-based approach for the creep function determination in viscoelastic pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(12), 04014058.
- [22] Covas, D. I. C. (2003). *Inverse transient analysis for leak detection and calibration of water pipe systems-modelling special dynamic effects* (Doctoral dissertation, University of London).
- System, 254 pp. *AWWA and AWWARF, Denver, CO, USA*.
- [9] Besner, M. C., Prévost, M., & Regli, S. (2011). Assessing the public health risk of microbial intrusion events in distribution systems: conceptual model, available data, and challenges. *Water research*, 45(3), 961-979.
- [10] Ruan, F., & McLaughlin, D. (1998). An efficient multivariate random field generator using the fast Fourier transform. *Advances in water resources*, 21(5), 385-399.
- [11] Basha, H. A., & Malaeb, L. N. (2007). Eulerian-Lagrangian method for constituent transport in water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(10), 1155-1166.
- [12] Fernandes, C., & Karney, B. (2004). Modelling the advection equation under water hammer conditions. *Urban Water Journal*, 1(2), 97-112.
- [13] Fox, S., Shepherd, W., Collins, R., & Boxall, J. (2014). Experimental proof of contaminant ingress into a leaking pipe during a transient event. *Procedia Engineering*, 70, 668-677.
- [14] Mansour-Rezaei, S., & Naser, G. (2013). Contaminant intrusion in water distribution systems: An ingress model. *Journal-American Water Works Association*, 105(1), E29-E39.
- [15] Jones, S., Shepherd, W., Collins, R., & Boxall, J. (2014). Experimental quantification of intrusion

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Payesteh, A. Keramat, *Interdependence of Hydraulic Parameters in Transient Induced Contaminant Intrusion in a Pipeline*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(5) (2019) 1017-1032.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14486.5670](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14486.5670)

