

آنالیز حساسیت عوامل هیدرولیکی موثر بر مکش ناگهانی آلودگی در شرایط گذرا

میلاذ پایسته، علیرضا کرامت*

گروه عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۶-۱۲-۲۷
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۳-۰۴
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۳-۰۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۳-۱۳

کلمات کلیدی:

کیفیت آب آشامیدنی
ضربه قوچ
مکش ناگهانی آلودگی
خطوط انتقال
آنالیز حساسیت

خلاصه: کیفیت آب حین عبور از خطوط انتقال، بر اثر فرآیندهای پیچیده فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی دستخوش تغییرات مهمی می‌شود. یکی از این فرآیندها که در سالهای اخیر توجه محققین را به خود جلب کرده‌است، مکش ناگهانی آلودگی بر اثر جریان گذرا می‌باشد. موج فشار منفی ضربه قوچ در لحظاتی که به نقاط آسیب‌سازهای همچون نشت برسد، منجر به مکش ناگهانی آلودگی (Contaminant intrusion) از فضای اطراف نشت به جریان درون لوله می‌شود که می‌تواند سلامت جامعه را بخطر بیندازد. هدف این پژوهش تعیین نحوه اثرگذاری عوامل هیدرولیکی بر ماندگاری فشار منفی و بزرگی فشار منفی و متعاقباً حجم مکش آلودگی در یک سیستم مخزن-لوله-شیر با نشت می‌باشد. در این پژوهش برای مدل‌سازی جریان گذرا از روش اولری مشخصه‌ها استفاده شد. کل حجم آلودگی ورودی V_{CPI} از محل نشت که برگرفته از حل لاگرانژی معادله انتقال آلودگیست، به عنوان ملاک مقایسه برای حالت‌های گوناگون اتخاذ شده‌است. حجم ورود آلودگی در قالب مثال‌های عددی مختلفی بررسی گردید. نتایج در قالب گراف‌هایی که بیانگر اثر هر عامل در حجم ورود آلودگی می‌باشد، ارائه گردید. نتایج حاکی از آن است که حجم مکش آلودگی بیشترین حساسیت را به بزرگی فشار منفی در محل نشت دارد. در مدل ارائه شده فشار مخزن، سرعت سیال درون لوله، سرعت موج فشاری، قطر لوله، قطر نشت و مکان نشت به ترتیب اولویت عوامل هیدرولیکی تاثیرگذار در مکش ناگهانی آلودگی هستند. بررسی اندرکنش این عوامل در حجم مکش آلودگی به‌عنوان موضوعی برای پژوهش‌های آتی قابل طرح است.

تغییر شود، نه تنها با افزایش ریسک ترکیدن لوله، بلکه بوسیله کندن مواد زاید در دیواره لوله بر اثر سرعت و تنش برشی زیاد و انتقال آن‌ها به سمت مصرف‌کننده، هم‌چنین فشار منفی ناشی از جریان غیرماندگار ضربه قوچ می‌تواند مواد آلاینده را از محل نشت به درون شبکه توزیع مکش کند.

تحقیقات بورچاردت^۱ و همکاران (۲۰۰۹) و بسنر^۲ و همکاران (۲۰۱۱)، وجود ویروس در نمونه آب جمع‌آوری شده از شیر آب خانگی را نشان داده‌است. گزارش‌های بسنر و همکارانش (۲۰۱۱) نشان می‌دهد که پدیده‌های مکش ناگهانی آلودگی به خوبی ثبت

۱- مقدمه

کیفیت آب حین عبور از شبکه توزیع، بر اثر فرآیندهای پیچیده فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی دست‌خوش تغییرات مهمی می‌شود. این تغییرات کیفی می‌تواند در تعامل با مواد و تجهیزات هیدرولیکی هم‌چون لوله‌ها، شیر و مخزن و شرایط هیدرولیکی حاکم باشد [۱]. افزایش مواد شیمیایی و میکروبی بر اثر خوردگی داخلی دیواره لوله، ماندن بیش از حد آب در لوله‌ها و مخازن ذخیره‌سازی و رشد و کاهش مواد عفونی توسط تجهیزات می‌تواند از عوامل تاثیرگذار در کیفیت آب به‌شمار روند. کلیه این عوامل، به مکانیسم هیدرولیکی جریان، وابسته‌اند. بسیار محتمل است که کیفیت آب، بر اثر جریان گذرا دچار

1 Borchardt et al.

2 Besner et al.

* نویسنده 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.

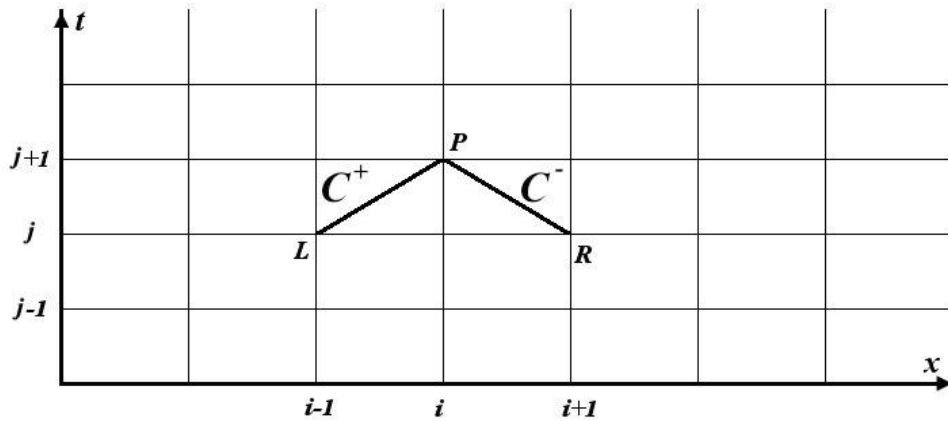
دادند. جونز و همکاران (۲۰۱۴) ضمن اثبات مکش ناگهانی آلودگی در یک مدل آزمایشگاهی بزرگ مقیاس، حجم مکش آلودگی براساس دبی شرایط اولیه و فشار حالت ماندگار را اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد در یک فشار ثابت (۲۰ متر ستون آب) با افزایش دبی، حجم مکش آلودگی افزایش یافت و در یک دبی خاص (۲/۱ لیتر بر ثانیه) با افزایش فشار حجم مکش آلودگی کاهش یافت. نتایج آزمایشگاهی فونتانازا و همکاران^۵ (۲۰۱۵) نشان داد که میزان آلودگی وارد شده از محل نشت در لوله‌های نیمه‌پر، بوسیله مکانیسم تراوش بیشتر از آلودگی وارد شده توسط جریان گذرا می‌باشد و میزان آلودگی وارد شده در جریان گذرا به‌صورت مستقیم به بزرگی فشار منفی و مدت زمان استقرار فشار منفی در محل نشت وابسته است.

تمرکز این پژوهش بررسی عوامل هیدرولیکی تاثیرگذار بر فشارهای وارد به سیستم و تعیین میزان اثرگذاری هر کدام از عوامل می‌باشد. براساس نتایج فونتانازا و همکاران (۲۰۱۵) زمان ماندگاری فشار منفی و میزان بزرگی فشار منفی، حجم مکش آلودگی به درون لوله را تحت تاثیر قرار می‌دهد. حال در این پژوهش سعی شده تا عوامل هیدرولیکی موثر بر این دو عامل و نحوه تاثیرگذاری آن‌ها بر مکش ناگهانی آلودگی، هر چه بیشتر شناسایی شود. از آنجا که بررسی عوامل تاثیرگذار در پدیده مکش ناگهانی آلودگی به‌صورت آزمایشگاهی و فیلدی مستلزم بکارگیری هزینه‌های گزاف و زمان زیاد می‌باشد، در پژوهش‌های پیشین که توسط جونز و همکاران (۲۰۱۴) صورت گرفته، به‌صورت محدود و جزئی به بررسی این عوامل پرداخته شده‌است. لذا در

نشده‌اند. 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 شبکه توزیع آب وارد می‌شود. فرناندز و کارنی^۱ (۲۰۰۴)، نخستین بار یک مدل عددی جهت شبیه‌سازی انتشار کلر در شرایط ضربه‌قوچ ارائه کردند که با استفاده از درونیابی و همگام‌سازی زمانی معادلات ضربه‌قوچ و انتقال، عدم تطابق زمانی این دو دست از معادلات را رفع نمودند. آن‌ها با مدل‌سازی یک سیستم مستهلک کننده انرژی^۲ 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 به‌صورت ورود و سپس خروج آلودگی پیش‌بینی کرد. فاکس^۳ و همکاران (۲۰۱۳ و ۲۰۱۶)، در قالب یک مدل آزمایشگاهی نشان دادند که حین وقوع ضربه‌قوچ در شبکه، موج فشاری منفی، آلودگی اطراف محل نشت را به درون شبکه توزیع مکش می‌کند و آن را به پایین دست محل نشت انتقال می‌دهد. رضایی^۴ و ناصر (۲۰۱۲) برای مطالعه مکش و انتشار آلودگی از محل نشت در شرایط ضربه قوچ، معادلات هیدرولیک جریان گذرا را با استفاده از روش مشخصه‌ها حل کردند و برای مدل‌سازی 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

- 1 Fernandes and Karney
- 2 External energy dissipater
- 3 Fox et al.
- 4 Rezaei and Naser

5 Fontanazaa



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.

H ارتفاع معادل فشار، f ضریب اصطکاک با در نظر گرفتن شرایط ماندگار یا گذرا، \mathcal{E}_ϕ 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 [۱۱]:

$$C^+ : H_P = C_P - B_P Q_P \quad (3)$$

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

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.

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

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

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

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

سرعت موج فشاری ضربه‌قوچ در لوله با استفاده از رابطه زیر قابل تخمین است [۱۲]:

این پژوهش با ارائه یک مدل عددی سعی شده، تا عوامل تاثیرگذار در محدوده گسترده‌ای مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. از این رو در یک مدل ثابت مخزن-لوله-شیر نشت و با تغییر یک عامل هیدرولیکی به بررسی میزان اثرگذاری آن عامل در مکش آلودگی پرداخته شده‌است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱-۲- مدل‌سازی پدیده ضربه قوچ

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

۲-۱-۱-۲- 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 پایداری جرم و مومنتم استفاده می‌کنند. رابطه ارائه شده توسط کواس و همکاران (۲۰۰۵) برای سیستم لوله‌های ویسکوالاستیک به صورت زیر می‌باشد [۱۰]:

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

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

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،

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

که H_L ارتفاع معادل فشار آب داخل لوله در محل نشت، H_{Lout} ارتفاع آب آلوده بیرون محل نشت، Q_L دبی محل نشت، C_d ضریب روزنه و A_1 سطح مقطع نشت می‌باشد. ضریب روزنه برای نشت C_d در مدل‌سازی این پژوهش براساس مطالعات آزمایشگاهی کواس [۲۲] برابر ۰/۶۷ در نظر گرفته شده‌است. افت ارتفاع آب معادل فشار ΔH_1 و ΔH_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 نشت 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. نشت 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 نشت (نقطه ۲)، آلودگی به درون لوله مکیده می‌شود. اینگونه فرض شده‌است که در محل نشت آب آلوده تحت فشار جو استقرار دارد (شرایط نمایش داده شده در شکل ۱).

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

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

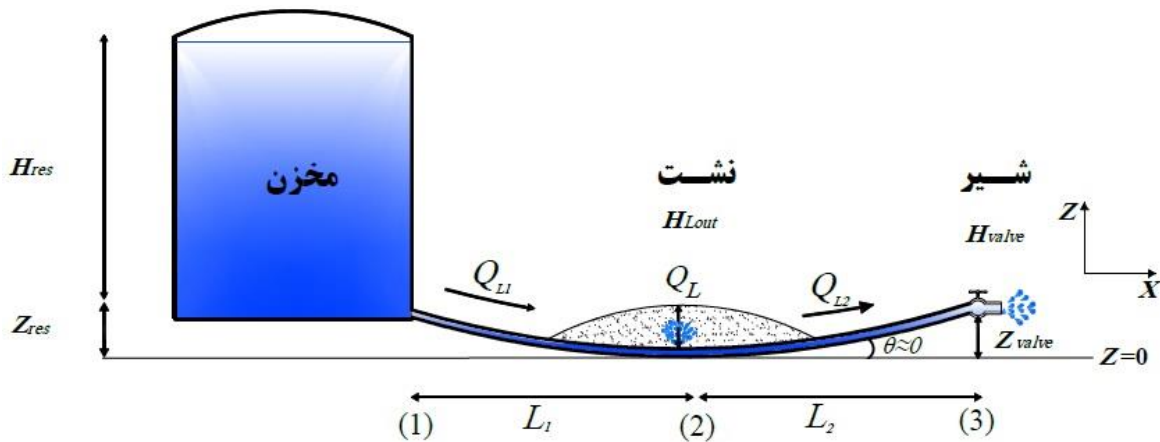
$$c = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{KD}{eE}}} \quad (9)$$

در این رابطه، c سرعت موج فشاری، k مدول بالک، ρ 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 پایین‌دست فشار سیال افزایش می‌یابد. در صورت تغییر ناگهانی (آنی) سرعت به اندازه ΔV ، تغییر ناگهانی فشار با استفاده از رابطه جکوفسکی معروف است، قابل محاسبه است [۱۱].

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

۲-۱-۲- شرایط اولیه حل معادلات ضربه‌قوچ

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 نشت، محاسبه شده‌است. با مشخص بودن ارتفاع آب در مخزن، ارتفاع آب معادل فشار در پشت شیر، ضریب زبری لوله، طول لوله و ابعاد محل نشت، دبی محل نشت و دبی بعد از نشت به‌عنوان مجهولات محاسبه می‌شوند. مطابق شکل ۳ برای تعیین این دو مجهول از دو معادله ۱۲ و ۱۳ ارائه شده در زیر، استفاده می‌شود. با استفاده از رابطه روزنه با فرض فشار نسبی خارج محل نشت برابر با صفر، می‌توان نوشت [۱۳]:



شکل ۳. شماتیک سیستم مخزن-لوله- شیر همراه با نشت 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.

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 ضربه‌قوچ 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 Δt به عنوان 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 روزنه ۱۹ برای نشت و با جایگذاری این سه معادله در معادله پیوستگی ۲۰، معادله‌ای غیرخطی ۲۱ به‌دست می‌آید:

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

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

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

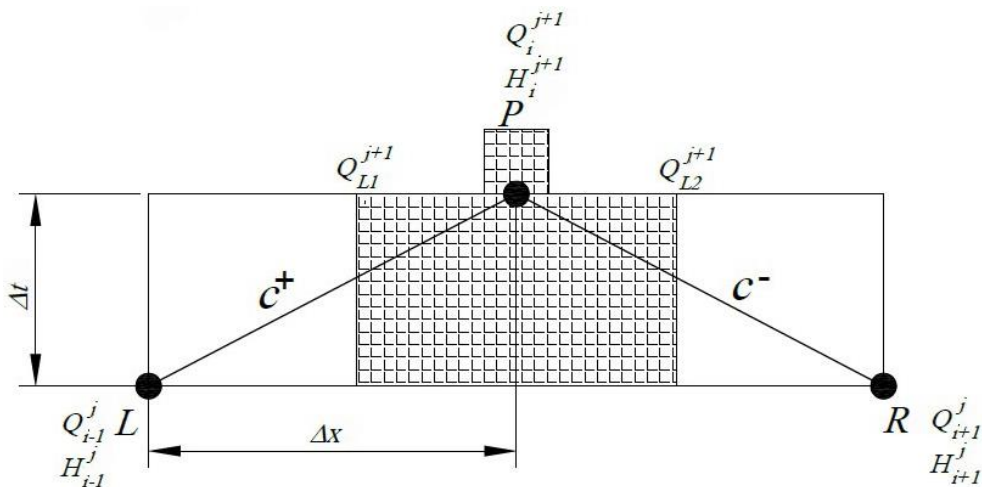
$$Q_{L1} = Q_L + Q_{L2} \quad (14)$$

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

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

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

که H_{res} ارتفاع پیزومتری آب در مخزن، Z_{res} فاصله از سطح تراز مخزن، f ضریب دارسی-وایسباخ، D قطر لوله، g شتاب گرانش، A سطح مقطع لوله، A_1 مساحت نشت، L_1 طول لوله قبل از نشت، Q_L دبی محل نشت، Q_{L2} دبی بعد از 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



شکل ۴. شرایط مرزی ضربه‌قوچ در محل نشت با توجه به خطوط مشخصه
Fig. 4. Waterhammer boundary condition at leak point due to characteristics line.

می‌شود. سیال در خط لوله، به صورت یک بعدی 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 [۱۴]:

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

که در معادله بالا، ϕ 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^۲ در مشتق ۲۶ استفاده می‌شود [۱۵]:

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

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 بسته‌های آلودگی بوجود آمده به مدل هیدرولیکی و تعداد سیکل‌های رفت و برگشتی موج فشاری ضربه‌قوچ وابسته است. به عبارتی حین وقوع ضربه‌قوچ 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 ضربه‌قوچ موج فشاری

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

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

مقادیر C_m و C_p و B_m و B_p 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:

$$\left(\frac{C_p - H_i^{j+1}}{B_p} \right) - \left(\frac{H_i^{j+1} - C_m}{B_m} \right) -$$

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

در نقاط مرزی، یعنی در شیر و نقطه اتصال به مخزن، به ترتیب از مشخصه‌های مثبت و منفی به عنوان 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 [۲۰].

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

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

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

$$\frac{Q_p}{Q_0} = \tau \sqrt{\frac{C_p - B_p Q_p}{H_0}} \quad (24)$$

که در آن اندیس 0 نشان‌دهنده شرایط جریان پایدار و پارامتر τ درصد بازشدگی شیر می‌باشد.

۲-۲-۲- مدل سازی پخش آلودگی در حالت گذرا

فرم ریاضی انتقال جرم یک خاصیت به وسیله معادله جابجایی-پخش ارائه می‌شود که از قانون فیک^۱ و پایستگی جرم استخراج

dt گام زمانی هیدرولیکی ضربه قوچ، θ هویساید فانکشن^۳ است که مقدار آن برای مقادیر مثبت یک و برای مقادیر منفی، صفر است. رابطه ۳۱ به صورت زیر ساده می شود.

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

که Δt گام زمانی هیدرولیکی ضربه قوچ، Nin تا n تعداد کل گام های زمانی است که مقدار دبی محل نشت Q_L منفی است و مکش آلودگی به درون خط انتقال روی می دهد، می باشد. ماهیت غیرماندگار ضربه قوچ باعث می شود 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 اندازه گیری بیشینه حجم آلودگی وارد شده به محل نشت، اعتبار لازم جهت تشخیص و تحلیل حساسیت مکش ناگهانی آلودگی را برخوردار می باشد. 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 می باشد، لذا ضریب روزنه برای مدل سازی نشت براساس نتایج آزمایشگاهی کواس ۰۰،۶۷/۶۷ در نظر گرفته شده است.

۳- صحت سنجی

نتایج محاسباتی در حالت الاستیک با استفاده از نتایج ارائه شده در تز کوواس مقایسه و صحت سنجی شد [۱۶]. مدل کواس به صورت یک سیستم مخزن-لوله-شیر قابل مدل سازی است از یک خط لوله به طول ۲۷۷ متر تشکیل شده است، که سایر مشخصات این سیستم در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج حل عددی فشار در نقطه واقع در فاصله ۲۷۰ متری از مخزن بالادست مدل کواس، ارائه شده در مرجع [۱۶] استخراج شده است. برای صحت سنجی نتایج مدل سازی این پژوهش در شکل ۵ با نتایج تز کواس در دو حالت با نشت و بدون

مثبت به محل نشت می رسد و منجر به پاک شدن آلودگی در بالادست و انتقال مجدد بخشی از آلودگی به خارج از لوله و هم چنین پایین دست محل نشت می شود. با استهلاک موج ضربه قوچ، حرکت رفت و برگشتی آلودگی در اطراف محل نشت پایان می یابد و در نهایت بخشی از آلودگی در لوله به دام می افتد [۴].

حجم آب آلوده وارد شده به لوله به توجه به گام های زمانی که دبی محل نشت منفی است و مکش آلودگی رخ می دهد محاسبه می شود. حجم بسته آلودگی^۱ $VCPT$ و محل پیشانی آلودگی، LCP ^۲ با استفاده از ۲۹ و ۳۰ قابل محاسبه است [۱۳].

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

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

ماهیت غیرماندگار ضربه قوچ موجب می شود جهت دبی در اطراف محل نشت دائم دچار تغییر شود، این امر سبب می شود 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 می افتد. چنانچه بستن شیر به صورت تدریجی باشد بسته آلودگی به سمت مصرف کننده پایین دست حرکت می کند. 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 می شود. 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 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 بسته های آلودگی، Q_L دبی محل نشت،

1 Volume of contaminated parcel

2 Location of contaminated parcel

3 Heaviside funcion

جدول ۱. مشخصات مخزن و لوله انتقال
Table 1. Reservoir and pipeline specifications.

۴۴/۸ m	ارتفاع آب در مخزن (H_{res})	۵۰/۶ mm	قطر داخلی لوله
۱ m	فاصله از سطح تراز مخزن (Z_{res})	۵۰۰۰ kg/m ³	جرم مخصوص لوله
۰/۰۰۰۰۱۵۲ m ²	مساحت موثر نشت	۲۷۷ m	طول لوله
۲۷۰ m	محل استقرار ترنسدیوسر	۲۱۰ GPa	مدول یانگ (steel)
۴۲/۳ m	ارتفاع معادل فشار محل نشت	۰/۴۶	نسبت پواسن
۱/۶ m	فاصله از سطح تراز محل نشت	۱۰۰۰ m/s	سرعت موج (steel)
۱۶۲/۴ m	فاصله محل استقرار نشت از مخزن	۳۸۰ m/s	سرعت موج (PVC)
۰/۹۸ m ³ /s	دبی جریان پایدار بعد از نشت	۰/۰۲	ضریب افت (f)
۰/۱۶ s	زمان بسته شدن شیر	۱۵ s	زمان مدلسازی

زمان ماندگاری فشار منفی^۱ TNP و بزرگی فشار منفی در محل نشت، نیز بررسی و در قالب یک شکل ارائه شده تا مکانیسم اثرگذاری هر عامل به وضوح مشخص شود. مشخصات فیزیکی مدل در قالب جدول ۲ به صورت کامل نمایش داده شده است.

نشت با نتایج حل عددی ارائه شده در این پژوهش مقایسه شده اند. همانطور که مشاهده می شود جوابها از دقت و همگرایی خوبی برخوردار می باشند که این امر نشان دهنده صحیح بودن مدل سازی انجام شده است.

۴-۱-۱- بررسی اثر قطر لوله در مکش ناگهانی آلودگی

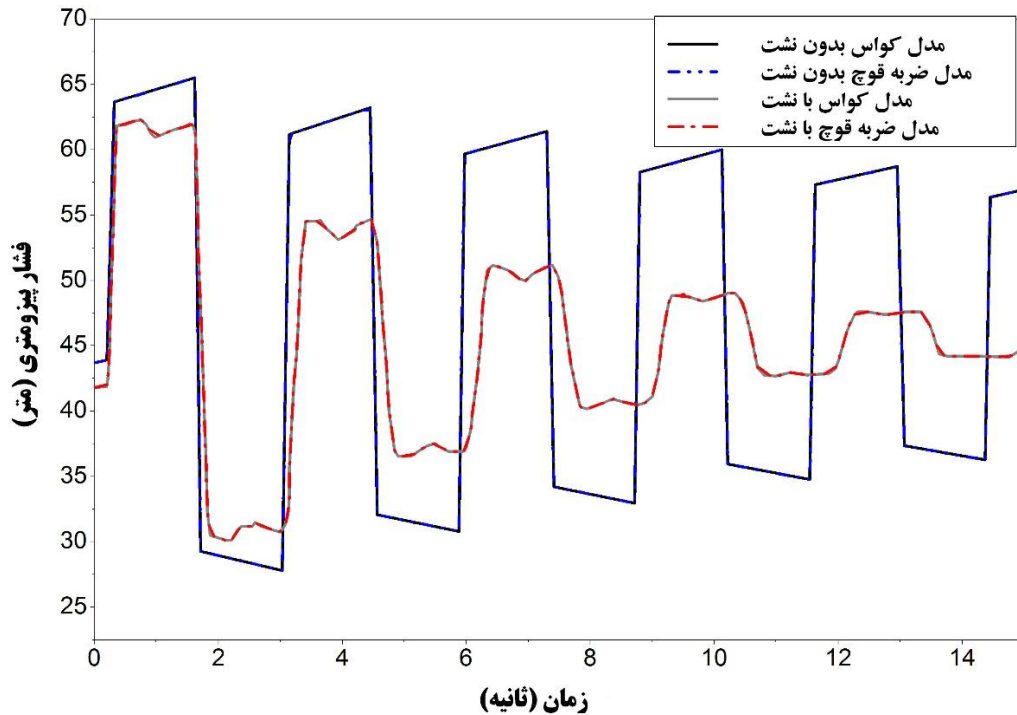
شکل ۶-الف، مقدار مکش آلودگی بر حسب لیتر در برابر تغییرات قطر لوله بر حسب میلی متر را نمایش می دهد. همان گونه که مشاهده می شود با افزایش قطر لوله مقدار آلودگی وارد شده به لوله افزایش یافته است. شکل ۶-ب نشان می دهد با افزایش قطر لوله مقدار فشار منفی ناشی از ضربه قوچ به صورت خطی در حال افزایش می باشد. در واقع با افزایش قطر لوله میزان مقاومت در برابر جریان کاهش می یابد که منجر به بالا رفتن سرعت سیال درون لوله می شود. افزایش سرعت سیال در لوله با توجه به رابطه ۱۰ به صورت مستقیم سبب افزایش موج فشار منفی ناشی از ضربه قوچ می شود. شکل ۶-ج نیز تغییرات مدت زمان ماندگاری فشار منفی TNP در محل نشت با افزایش قطر لوله را نمایش می دهد. صرف نظر از داده مربوط به قطر برابر با ۸۰ میلی متر که برای نخستین بار فشار

۴- بحث و نتیجه گیری

۴-۱- بررسی میزان اثرگذاری عوامل موثر در مکش آلودگی بر اثر ضربه قوچ در یک مدل ثابت

در این پژوهش در قالب یک مدل ثابت مخزن-لوله- شیر همراه با نشت (شکل ۳) و با تغییر یک عامل هیدرولیکی میزان اثرگذاری این عامل بر حجم مکش آلودگی مورد بررسی قرار می گیرد. همانگونه که از رابطه ۳۱ برداشت می شود، میزان آلودگی وارد شده به لوله تابع سه عامل کلی زمان ماندگاری فشار منفی، مقدار فشار منفی در محل نشت و مساحت موثر نشت می باشد. زمان ماندگاری فشار منفی و مقدار فشار منفی دو عامل کلی هستند که هر کدام وابسته به زیرعواملی هم چون فشار مخزن، سرعت سیال درون لوله، سرعت موج، قطر لوله و فاصله محل نشت تا مخزن می باشند. حال به بررسی هر کدام از این زیر عوامل در میزان مکش ناگهانی آلودگی پرداخته می شود. برای ایجاد شناخت بیشتر نسبت به پدیده، اثر هر عامل در

1 Time of negative pressure



شکل ۵. مقایسه نتایج مدل‌سازی 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).

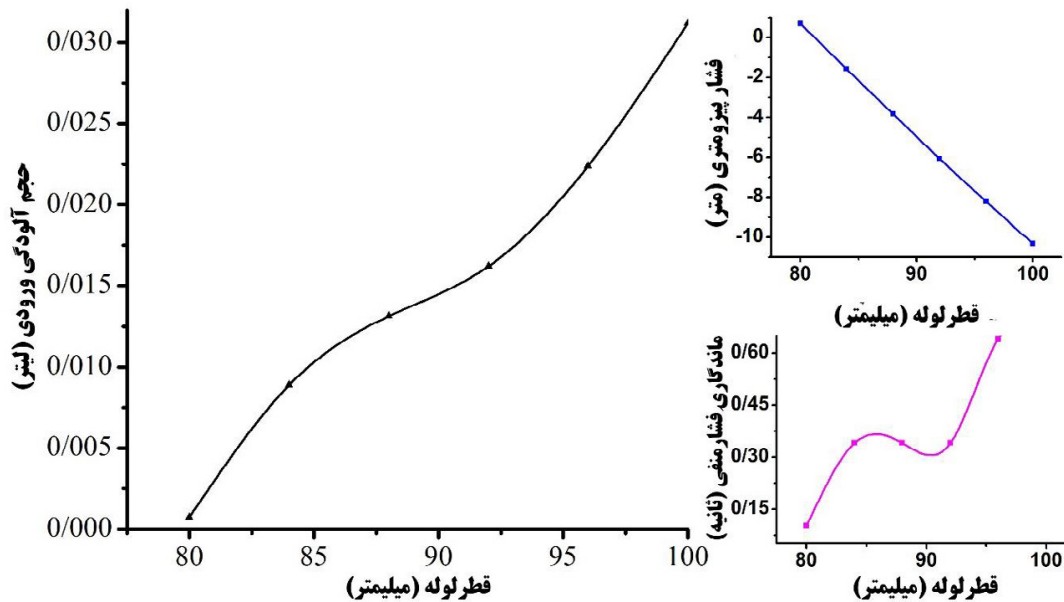
به مکش آلودگی می‌شود. افزایش تعداد سیکل ورود آلودگی بر اثر افزایش قطر لوله، سبب ایجاد جهش در شکل ۶-الف و ۶-ج شده‌است. شکل ۷ نمودار سری زمانی ارتفاع معادل فشار در محل نشت برای سه قطر ۸۰، ۹۶ و ۱۰۳ میلی‌متر نمایش می‌دهد. بیشینه فشار پیرومتری منفی در محل نشت برای این سه قطر متفاوت برابر با ۰/۷، ۸/۲- و ۱۰/۳- متر می‌باشد که نشان می‌دهد با افزایش قطر لوله بزرگی فشار منفی نیز افزوده شده‌است. هم‌چنین شکل ۸ نیز نمودار سری زمانی دبی در محل نشت برای سه قطر ۸۰، ۹۶ و ۱۰۳ میلی‌متر نمایش می‌دهد. مساحت محصور بین نمودار دبی و خط صورتی رنگ (دبی برابر با صفر) مفهوم فیزیکی پارامتر $VCPt$ را نمایش می‌دهد. مقایسه دو نمودار شکل ۷ و ۸ مطابقت و وابستگی دبی و ارتفاع معادل فشار در محل نشت را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که انحنا در نمودار دبی برای دو قطر میلی‌متر ۸۰ در سیکل اول و ۹۶ میلی‌متر در سیکل به دلیل حاکم شدن اثر فشار آب در خارج از محل نشت است. به عبارتی چون فشار درون سیستم ناشی از ضربه قوچ کمتر از H_{Lout} شده‌است، نفوذ آلودگی مازاد بر فشار منفی ضربه قوچ از محل نشت رخ داده‌است.

منفی منجر به مکش آلودگی شده‌است، تا اندازه قطر ۹۶ میلی‌متر مدت زمان ماندگاری فشار منفی با تقریباً ثابت بوده‌است، ولی شیب نمودار به یک‌باره پس از نقطه با قطر ۹۶ میلی‌متر یک جهش قابل توجه را ثبت می‌کند. این جهش در افزایش زمان ماندگاری فشار منفی موجب افزایش مکش آلودگی به درون لوله می‌شود و اثر آن در شکل ۶-الف نیز به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. در شکل ۶-الف نیز از نقطه با قطر ۹۶ میلی‌متر شیب نمودار دچار جهش می‌شود و آلودگی با سرعت بیشتری وارد لوله می‌شود. در واقع این جهش در نمودار به دلیل افزایش تعداد سیکل‌های مکش آلودگی به لوله بر اثر ضربه قوچ می‌باشد.

همانگونه در شکل ۷ مشاهده می‌شود افزایش قطر لوله موجب افزایش بزرگی و ماندگاری موج فشاری منفی ضربه قوچ می‌شود. افزایش قطر لوله سبب می‌شود مکش آلودگی به لوله در دو سیکل انجام شود. خط صورتی رنگ فشار برابر با صفر پیرومتری در محل نشت بر اثر ضربه قوچ را نمایش می‌دهد. تعداد برخورد این خط با نمودار فشار در محل نشت، تعداد سیکل ورود آلودگی را نمایش می‌دهد که طی آن، فشار منفی در محل نشت مستقر شده و منجر

جدول ۲. مشخصات مخزن و لوله انتقال
Table 2. Reservoir and pipeline specifications.

۷۷ m	ارتفاع آب در مخزن (H_{res})	۹۰ mm	قطر داخلی لوله
۱ m	فاصله از سطح تراز مخزن (Z_{res})	۳۴۰ m	طول لوله
۷۴ m	ارتفاع معادل فشار در پشت شیر (H_{valve})	۲۱۰ GPa	مدول یانگ (steel)
0.00000635 m^2	مساحت موثر نشت	۱۰۰۰ m/s	سرعت موج (steel)
۱۷۰ m	محل استقرار نشت از مخزن	۰/۰۲	ضریب افت (f)
۱ m	ارتفاع معادل فشار محل نشت (H_{Lout})	۱۰۰ s	زمان مدلسازی
۰ m	فاصله از سطح تراز نشت	۰ s	زمان بسته شدن شیر
۱ m	فاصله از سطح تراز شیر (Z_{valve})	۰/۶۷	ضریب روزنه نشت



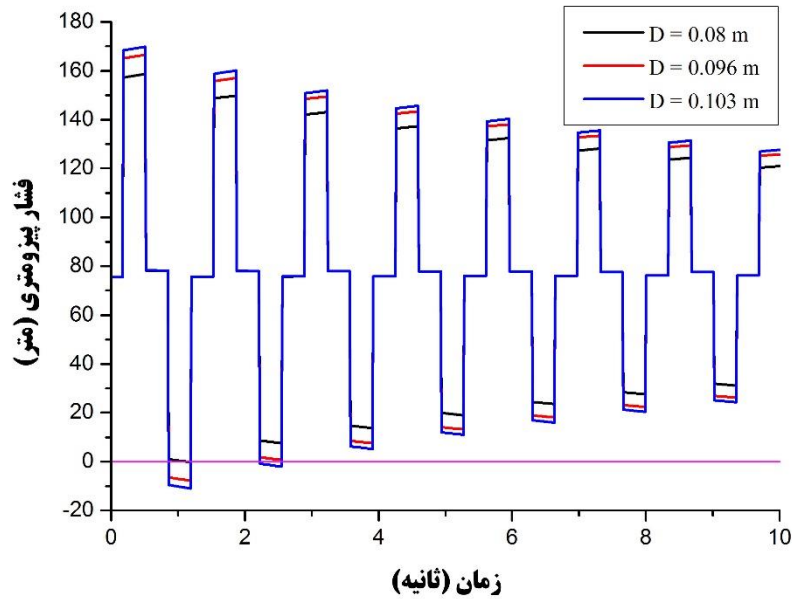
شکل ۶. الف) بررسی اثر قطر لوله در مکش ناگهانی آلودگی. ب) بررسی اثر قطر لوله در مقدار فشار منفی در محل نشت. ج) بررسی اثر قطر لوله در زمان ماندگاری فشار منفی در محل نشت.

Fig. 6. a. Investigation of pipe diameter effect on contaminant intrusion. b. Investigation of pipe diameter effect on negative pressure amount at leak point. c. Investigation of pipe diameter effect on negative pressure duration at leak point.

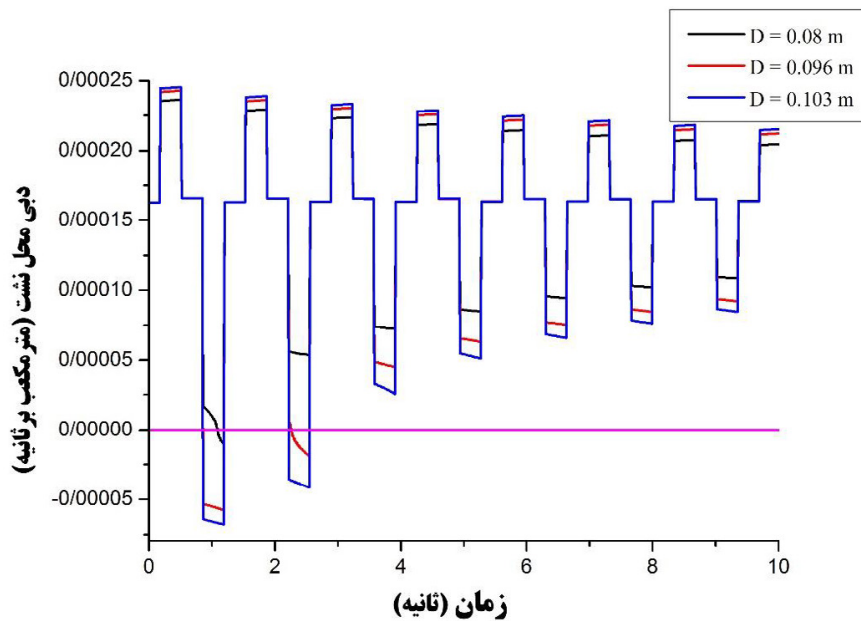
فشاری ضربه قوچ با رسیدن به محل نشت خنثی می‌شود. با رسیدن موج فشاری به محل نشت و افزایش فشار، حجم زیادی از سیال به دلیل ابعاد نشت از لوله خارج می‌شود، این امر سبب استهلاک موج فشاری می‌شود. استهلاک موج فشاری باعث می‌شود، سیکل سوم ضربه قوچ که با موج فشاری منفی همراه است، شکل نگیرد. بنابراین وجود نشت بزرگ سبب می‌شود، در محل نشت فشار منفی

۴-۱-۲- بررسی اثر قطر نشت در مکش ناگهانی آلودگی

شکل ۹-الف، مقدار مکش آلودگی برحسب لیتر در برابر تغییرات قطر نشت را نمایش می‌دهد. مطابق با فیزیک مسئله واضح است، در صورت صفر بودن قطر نشت حجم مکش آلودگی به لوله نیز صفر خواهد بود. از سوی دیگر در صورت بزرگ بودن قطر نشت از یک مقدار معین، نشت مانند یک تانک ضربه گیر عمل می‌کند و کلیه موج



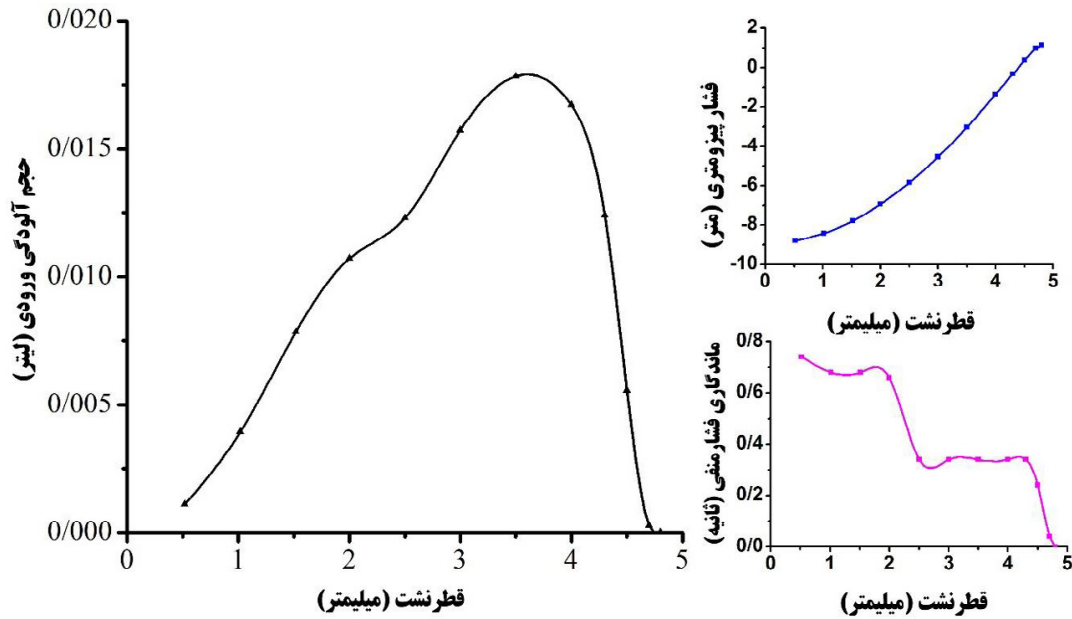
شکل ۷. نمودار سری زمانی ارتفاع معادل فشار در محل نشت برای سه قطر متفاوت لوله
 Fig. 7. Head time series at leak point for three different pipe diameter.



شکل ۸. نمودار سری دبی محل نشت برای سه قطر متفاوت لوله
 Fig. 8. discharge time series at leak point for three different pipe diameter.

منفی در محل نشت کاهش یافته است. واضح است که با افزایش قطر نشت میزان میرا شدن موج فشاری ضربه قوچ افزایش می یابد و این امر سبب کاهش فشار منفی ناشی از ضربه قوچ در محل نشت می شود. شکل ۹-ج، نیز اثر افزایش قطر نشت در ماندگاری فشار منفی را نمایش می دهد. با افزایش قطر نشت ماندگاری فشار منفی تقریباً ثابت

به وجود نیاید و در این حالت نیز مقدار آلودگی وارد شده به لوله بر اثر ضربه قوچ صفر می شود. لذا همانگونه که مشاهده می شود نمودار فرم صعودی-نزولی پیدا خواهد کرد. بیشینه میزان مکش آلودگی به ازای نشت با قطر ۳/۵ میلی متر رخ داده است که این مقدار ۳/۹٪ قطر لوله می باشد. شکل ۹-ب، نشان می دهد با افزایش قطر نشت میزان فشار



شکل ۹. الف) بررسی اثر قطر نشت در مکش ناگهانی آلودگی. ب) بررسی اثر قطر نشت در مقدار فشار منفی در محل نشت. ج) بررسی اثر قطر نشت در زمان ماندگاری فشار منفی در محل نشت.

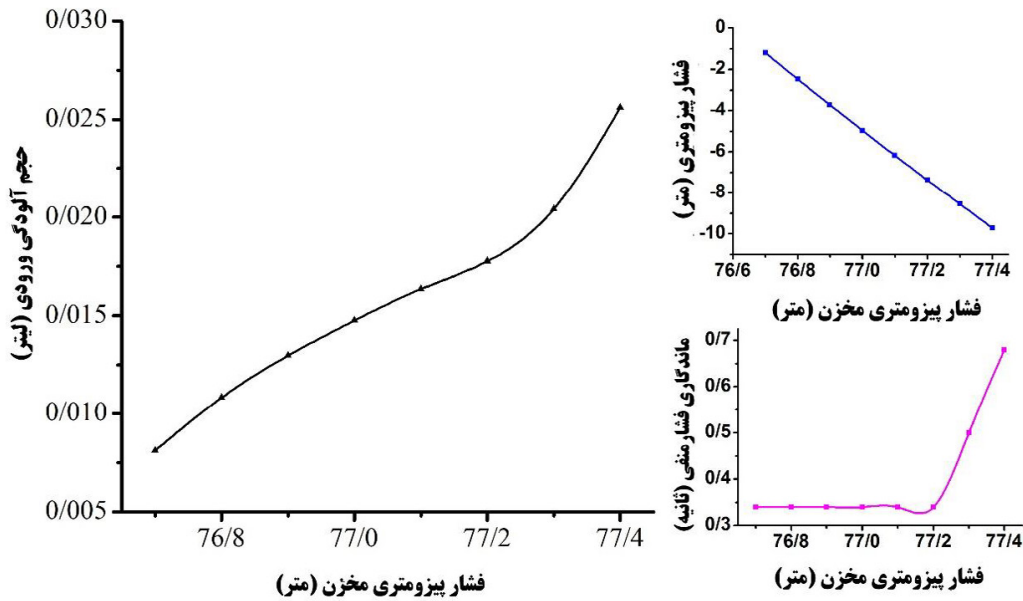
Fig. 9. a. Investigation of leak diameter effect on contaminant intrusion. b. Investigation of leak diameter effect on negative pressure amount at leak point. c. Investigation of leak diameter effect on negative pressure duration at leak point.

سرعت سیال، سبب می‌شود حین بسته شدن شیر و وقوع ضربه قوچ انرژی جنبشی سیال تبدیل به انرژی فشاری شود. این امر باعث افزایش فشار در پشت شیر و بوجود آمدن موج فشاری ضربه قوچ در امتداد لوله می‌شود. مدت ماندگاری فشار منفی در محل نشت به ازای فشارهای مختلف در مخزن تقریباً ثابت بوده است. در شکل ۱۰-ج، به ازای فشار مخزن بالا دست ۷۷/۲ در نمودار جهش رخ داده است. این امر چنانچه پیشتر بدان اشاره شد، بر اثر افزایش تعداد سیکل‌های مکش آلودگی به لوله می‌باشد. این اثر در شکل ۱۰-الف نیز به وضوح مشهود است. شیب نمودار ۱۰-الف نیز در فشار ۷۷/۲ متر تغییر کرده و صعودی‌تر شده است، به این معنا که با افزایش تعداد سیکل ورود آلودگی، حجم آب آلوده ورودی با سرعت بیشتری افزایش یافته است. در شرایط یکسان، ثابت بودن فشار در محل شیر و ثابت بودن مشخصات فیزیکی لوله، اثرگذاری عامل سرعت سیال در لوله کاملاً مشابه و وابسته به میزان فشار مخزن می‌باشد. با توجه به شکل ۱۱-الف با افزایش سرعت سیال درون لوله میزان آلودگی وارد شده به لوله با شیب صعودی افزایش یافته است. افزایش سرعت منجر به افزایش مقدار فشار منفی ناشی از ضربه قوچ در محل نشت شده است ۱۱-ب، مدت ماندگاری فشار منفی در محل نشت متناسب

بوده است و نزول ناگهانی در قطر ۲ میلی‌متر نشان‌دهنده کاهش تعداد سیکل‌ها مکش آلودگی می‌باشد. نزول دوم در نمودار ۹-ج ناشی از صفر شدن ماندگاری فشار منفی بر اثر عدم وقوع موج فشاری منفی می‌باشد. آنچنان که از شکل ۹-ب و ۹-ج برداشت می‌شود، مقدار فشار منفی کاهش یافته و مدت زمان ماندگاری فشار منفی، صرف‌نظر از نزول‌ها، تقریباً ثابت بوده است، از طرفی افزایش قطر و مساحت نشت با توجه به رابطه ۱۱ نقش مثبت در مکش آلودگی ایفا می‌کند، که برآیند اثر این سه عامل در مکش آلودگی منتج به شکل ۹-الف شده است.

۴-۱-۳- بررسی اثر ارتفاع آب مخزن و سرعت سیال ماندگار درون لوله در مکش ناگهانی آلودگی

شکل ۱۰-الف، مقدار مکش ناگهانی آلودگی برحسب لیتر در برابر تغییرات فشار مخزن برحسب متر را نمایش می‌دهد. افزایش فشار پیرومتری مخزن با افزایش انرژی پتانسیل سیستم و با توجه به رابطه داری ۱۲، منجر به افزایش سرعت سیال درون لوله می‌شود. با توجه به رابطه ۱۰، افزایش سرعت سیال به صورت مستقیم و خطی بر فشار منفی ضربه قوچ اثر می‌گذارد (شکل ۱۰-ب). زیرا افزایش



شکل ۱۰. الف) بررسی اثر فشار مخزن بالا دست در مکش ناگهانی آلودگی. ب) بررسی اثر فشار مخزن بالا دست در مقدار فشار منفی در محل نشت. ج) بررسی اثر فشار مخزن بالا دست در زمان ماندگاری فشار منفی در محل نشت.

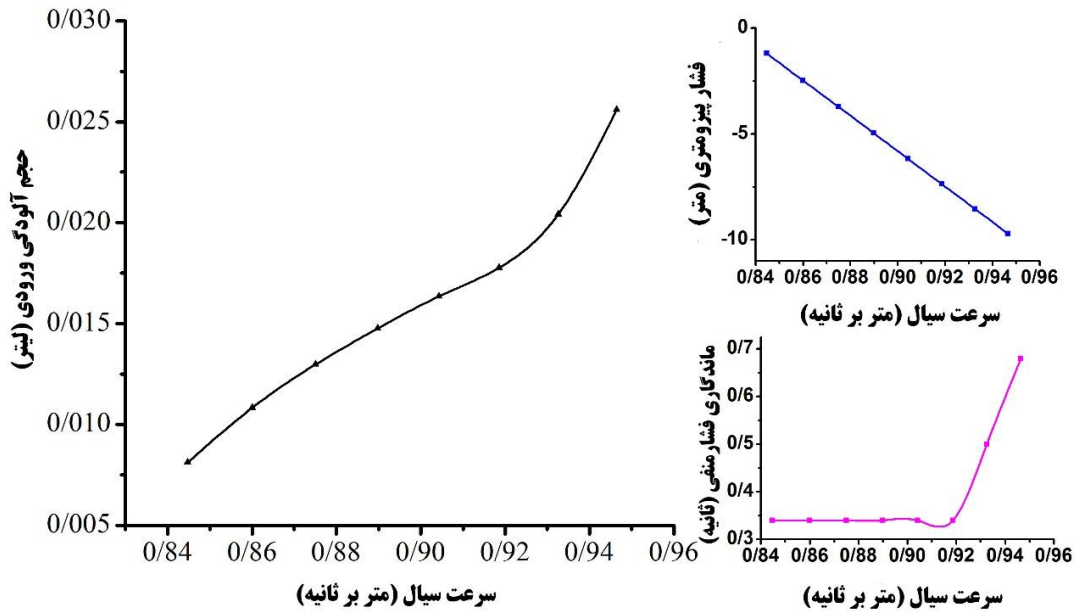
Fig. 10. a. Investigation of reservoir head effect on contaminant intrusion. b. Investigation of reservoir head effect on negative pressure amount at leak point. c. Investigation of reservoir head effect on negative pressure duration at leak point.

آغاز می‌شود، بنابراین هرچه محل نشت به شیر نزدیک‌تر باشد مدت ماندگاری فشار منفی در آن نقطه بیشتر می‌شود. زیرا موج فشاری مثبت که در سیکل چهارم ضربه قوچ رخ می‌دهد، باید فاصله بین مخزن تا نشت را طی کند. هر چه این فاصله بیشتر باشد، موج فشاری مثبت دیرتر به آن نقطه می‌رسد. نتایج شکل ۱۲-ج این استدلال را تایید می‌کند، همانگونه که مشاهده می‌شود، مدت زمان ماندگاری فشار منفی در محل نشت به‌صورت خطی و متناسب با جابجایی محل نشت از مخزن به سمت محل شیر، افزایش یافته است. شکل ۱۲-ب نشان می‌دهد با تغییر محل نشت از مخزن به سمت شیر، بیشینه فشار منفی در محل نشت کاهش یافته است. در واقع استقرار محل نشت در حدفاصله وسط لوله تا نزدیکی شیر با کاهش بیشینه فشار منفی ناشی از ضربه‌قوچ همراه بوده است. موج فشاری ناشی از ضربه‌قوچ پس از شکل‌گیری بر اثر بسته شدن شیر، 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 نوساناتی در بیشینه فشار منفی در شکل ۱۲-ب را ایجاد می‌کند. اثر توأم مدت

با میزان سرعت تقریباً ثابت بوده است و در سرعت ۰/۹۲ متر بر ثانیه جهش را تجربه کرده است (شکل ۱۱-ج). این امر تغییر محسوسی را در شیب شکل ۱۱-الف، در نقطه با سرعت ۰/۹۲ متر بر ثانیه به وجود آورده است، که ناشی از سیکل دوم ورود آلودگی می‌باشد.

۴-۱-۴- بررسی اثر مکان نشت در مکش آلودگی ناگهانی در مکش ناگهانی آلودگی

شکل ۱۲-الف، مقدار مکش آلودگی برحسب لیتر در برابر تغییرات مکان نشت را نمایش می‌دهد. با توجه به فیزیک مسئله حین بسته شدن شیر موج فشاری مثبت ضربه‌قوچ در محل شیر ایجاد می‌شود. این موج فشاری مثبت از محل شیر به سمت مخزن حرکت می‌کند و هم‌زمان سرعت سیال درون لوله صفر می‌شود. با رسیدن موج فشاری به مخزن جهت سرعت سیال برعکس می‌شود و سیال از لوله وارد مخزن می‌شود. سرعت منفی سیال از مخزن آغاز می‌شود و به سمت شیر حرکت می‌کند تا جهت سیال به‌طور کامل در امتداد لوله منفی شود. وقتی موج سرعت معکوس به محل شیر برخورد می‌کند، به دلیل بسته بودن شیر ایجاد فشار منفی می‌کند. بنابراین محل ابتدایی ایجاد موج فشاری منفی پشت شیر می‌باشد. موج فشاری منفی از پشت شیر



شکل ۱۱. الف) بررسی اثر سرعت سیال در مکش ناگهانی آلودگی. ب) بررسی اثر سرعت سیال در مقدار فشار منفی در محل نشت. ج) بررسی اثر سرعت سیال در زمان ماندگاری فشار منفی در محل نشت.

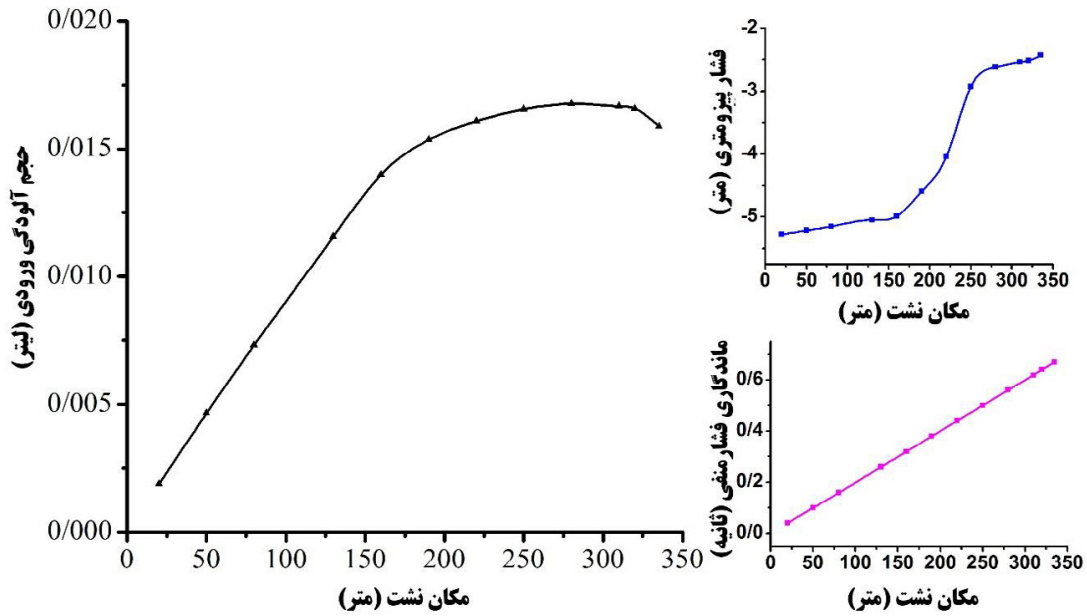
Fig. 11. a. Investigation of fluid velocity effect on contaminant intrusion. b. Investigation of fluid velocity effect on negative pressure amount at leak point. c. Investigation of fluid velocity effect on negative pressure duration at leak point.

می‌شود زیرا با افزایش سرعت موج فشاری، این موج طول لوله را سریع‌تر پیمایش می‌کند، لذا ماندگاری فشار منفی در محل نشت کاسته می‌شود. کاهش زمان ماندگاری فشار منفی در شکل ۱۳-ج مشهود است. جهش ناگهانی در این نمودار در سرعت موج ۱۰۴۰ ناشی از سیکل دوم مکش آلودگی می‌باشد که همانگونه که پیشتر گفته شد بر اثر افزایش پتانسیل ضربه قوچ به دلیل افزایش سرعت موج می‌باشد (رابطه ۲). حجم آلودگی وارد شده به لوله با افزایش سرعت انتشار موج فشاری افزایش یافته‌است. جهش در مدت زمان ماندگاری فشار منفی منجر به تغییر شیب نمودار مکش آلودگی در سرعت ۱۰۴۰ شده‌است که به وضوح در شکل ۱۳-الف قابل مشاهده است.

۴-۱-۶- مقایسه حساسیت حجم ورود آلودگی به عوامل هیدرولیکی تحلیل نتایج حاکی از این است که جهش و نزول در نمودارهای مربوط به ماندگاری فشار منفی به نوعی تابعی از افزایش و یا کاهش بزرگی فشار منفی ضربه قوچ می‌باشد. پس برای اظهار نظر در رابطه با اثر هر عامل هیدرولیکی بر ماندگاری فشار منفی می‌توان جهش‌ها و نزول‌ها را نادیده گرفت. با توجه به این نکته و با بررسی نتایج، می‌توان گفت، قطر لوله، قطر محل نشت، فشار مخزن و سرعت سیال درون

زمان ماندگاری فشار منفی و بزرگی فشار منفی در محل نشت منتج به شکل ۱۲-الف شده‌است. شکل ۱۲-الف حجم آلودگی وارد شده به لوله در برابر مکان‌های متفاوت نشت در لوله را نشان می‌دهد. با جابجا شدن محل نشت از مخزن، حجم آلودگی وارد شده به لوله افزایش یافته‌است و در مکان نشت به ۲۸۰ متری از مخزن حجم آلودگی وارد شده به لوله به بیشینه خود رسیده‌است. در ۱۰٪ انتهایی لوله مکش آلودگی روند نزولی پیدا کرده‌است.

۴-۱-۵- بررسی اثر سرعت موج فشاری در مکش آلودگی ناگهانی شکل ۱۳-الف، مقدار مکش آلودگی بر حسب لیتر در برابر تغییرات سرعت موج فشاری بر حسب متر بر ثانیه را نمایش می‌دهد. سرعت انتشار موج فشاری تابع جنس مصالح لوله می‌باشد و از ۳۰۰ متر بر ثانیه در لوله‌های ویسکوالاستیک تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه در لوله‌های الاستیک متغیر می‌باشد. همانگونه که از شکل ۱۳-ب برداشت می‌شود، با توجه به رابطه ۱۰ افزایش سرعت انتشار موج فشاری به صورت مستقیم بر مقدار فشار منفی ناشی از ضربه قوچ اثرگذار است. افزایش سرعت موج منجر به افزایش فشار منفی ناشی از ضربه قوچ در محل نشت شده‌است. از سوی دیگر، افزایش سرعت انتشار موج فشاری موجب کاهش زمان ماندگاری فشار منفی در محل نشت



شکل ۱۲. الف) بررسی اثر مکان نشت در مکش ناگهانی آلودگی. ب) بررسی اثر مکان نشت در مقدار فشار منفی در محل نشت. ج) بررسی اثر مکان نشت در زمان ماندگاری فشار منفی در محل نشت.

Fig. 12. a. Investigation of leak location effect on contaminant intrusion. b. Investigation of leak location effect on negative pressure amount at leak point. c. Investigation of leak location effect on negative pressure duration at leak point.

را به فشار مخزن بالا دست دارد. سرعت سیال درون لوله، سرعت موج فشاری و قطر لوله به ترتیب اولویت سه عامل تاثیرگذار بعدی هستند. قطر نشت و مکان نشت نیز دو عاملی هستند که حجم مکش آلودگی تقریباً به یک میزان نسبت به آن‌ها حساس می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

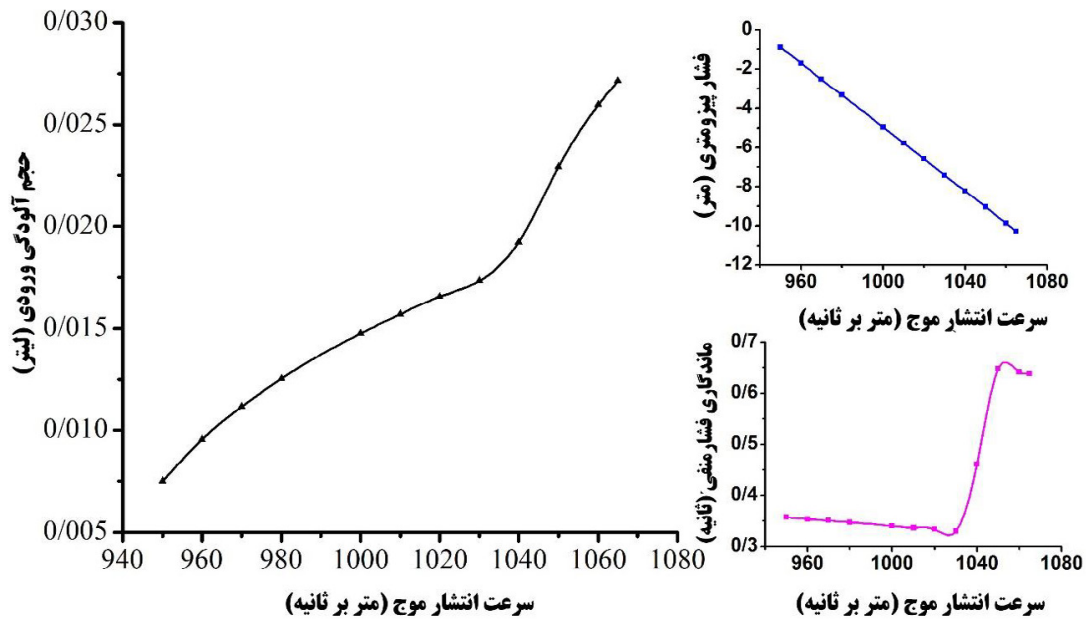
نفوذ آلودگی در خطوط انتقال مکانیزم پراهمیتی است، که ممکن است منجر به بروز زوال کیفیت آب آشامیدنی شود. مقدار نفوذ آلودگی به جریان گذرا به صورت مستقیم به بزرگی فشار منفی و مدت زمان استقرار فشار منفی در محل نشت وابسته است. این پژوهش با توجه به اهمیت مسئله مکش ناگهانی آلودگی به شبکه توزیع آب بر اثر نوسانات جریان گذرا، با ارائه یک مدل عددی، عوامل هیدرولیکی تاثیرگذار بر این پدیده را مورد تحلیل و بررسی قرار داده است. هدف این پژوهش تعیین نحوه اثرگذاری عوامل هیدرولیکی بر ماندگاری فشار منفی و بزرگی فشار منفی و متعاقباً حجم مکش آلودگی می‌باشد. در این پژوهش برای مدل‌سازی جریان گذرا از روش مشخصه‌ها استفاده شده است و کل حجم آلودگی ورودی $VCpt$ از محل نشت به عنوان ملاک مقایسه برای حالت‌های گوناگون اتخاذ شده است. پارامتر $VCpt$ از حل لاگرانژی معادلات انتقال آلودگی

لوله در حالت ماندگار بر مدت ماندگاری فشار منفی در محل نشت بی‌تاثیر هستند. افزایش فاصله نشت از مخزن تاثیر مستقیم و مثبت بر ماندگاری فشار منفی دارد و افزایش سرعت موج سبب کاهش ماندگاری فشار منفی در محل نشت می‌شود.

قطر لوله، فشار مخزن، سرعت سیال درون لوله و سرعت موج تاثیر مستقیم و خطی بر مقدار فشار منفی ناشی از ضربه قوچ دارد. افزایش هر کدام از این چهار عامل سبب افزایش فشار منفی ضربه قوچ می‌شود. افزایش قطر نشت سبب کاهش فشار منفی ناشی از ضربه قوچ می‌شود و با فاصله گرفتن نشت از مخزن فشار منفی ضربه قوچ به صورت پله‌ای کاهش یافته است.

جهت تعیین شدت اثر هر کدام از عوامل هیدرولیکی بر حجم آلودگی مکیده شده بر اثر ضربه قوچ در محل نشت، دو مقدار ثابت حجم آلودگی، برابر با ۰/۰۱ و ۰/۰۱۵ لیتر در نظر گرفته شده است. مقدار هر کدام از عوامل هیدرولیکی متناظر با این دو حجم ثابت از طریق درون‌یابی نمودارها استخراج شدند (جدول ۳). هر کدام از عوامل هیدرولیکی که درصد تغییراتش به ازای این دو حجم ثابت کمتر باشد، عاملی است که حجم مکش آلودگی حساسیت بیشتری نسبت به آن عامل را دارا است.

با توجه به نتایج جدول ۳ حجم مکش آلودگی بیشترین حساسیت



شکل ۱۳. الف) بررسی اثر سرعت موج در مکش آلودگی. ب) بررسی اثر سرعت موج در مقدار فشار منفی در محل نشت. ج) بررسی اثر سرعت موج در زمان ماندگاری فشار منفی در محل نشت.

Fig. 13. A. Investigation of wave velocity effect on contaminant intrusion. b. Investigation of wave velocity effect on negative pressure amount at leak point. c. Investigation of wave velocity effect on negative pressure duration at leak point.

جدول ۳. بررسی میزان حساسیت هر عامل در حجم مکش آلودگی به درون لوله
Table 3. Sensitivity Analysis of Hydraulic Parameters on Contaminant Intrusion.

مکان نشت (متر)	قطر نشت (میلی متر)	قطر لوله (میلی متر)	سرعت موج (متر بر ثانیه)	سرعت سیال (متر بر ثانیه)	فشار مخزن بالادست (متر)	
116.1	1.8799	85.073	963.64	0.85	76.77	$VCPt = 0.01lit$
185.51	2.8963	90.441	1002.6	0.89	77.017	$VCPt = 0.015lit$
69.407	1.0164	5.3672	38.983	0.0342	0.2463	مقدار تغییرات
59.781	54.065	6.3089	4.0454	3.9855	0.3208	درصد تغییرات
0.83	0.92	7.92	12.36	12.54	155.86	شیب نمودار ورود آلودگی بر اثر تغییر هر پارامتر

سرعت سیال درون لوله و سرعت موج تاثیر مستقیم و خطی بر مقدار فشار منفی ناشی از ضربه قوچ دارد. افزایش هر کدام از این چهار عامل سبب افزایش فشار منفی ضربه قوچ می شود. افزایش قطر نشت سبب کاهش فشار منفی ناشی از ضربه قوچ می شود و با فاصله گرفتن نشت از مخزن فشار منفی ضربه قوچ به صورت پله ای کاهش یافته است. نتایج حاکی از آن است که در مدل ارائه شده در این تحقیق،

منتج می شود.

قطر لوله، قطر محل نشت، فشار مخزن و سرعت سیال درون لوله در حالت ماندگار بر مدت ماندگاری فشار منفی در محل نشت بی تاثیر هستند. افزایش فاصله نشت از مخزن تاثیر مستقیم و مثبت بر ماندگاری فشار منفی دارد و افزایش سرعت موج سبب کاهش ماندگاری فشار منفی در محل نشت می شود. قطر لوله، فشار مخزن،

In Proc. AWWA 2009 Water Quality Technology Conference, Seattle, Wash.

- [3] 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.
- [4] Fernandes, C., & Karney, B. (2004). Modelling the advection equation under water hammer conditions. *Urban Water Journal*, 1(2), 97-112.
- [5] 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.
- [6] Fox, S., Shepherd, W., Collins, R., & Boxall, J. (2016). Experimental quantification of contaminant ingress into a buried leaking pipe during transient events. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1), 04015036.
- [7] Mansour-Rezaei, S., & Naser, G. (2013). Contaminant intrusion in water distribution systems: An ingress model. *Journal-American Water Works Association*, 105(1), E29-E39.
- [8] Jones, S., Shepherd, W., Collins, R., & Boxall, J. (2014). Experimental quantification of intrusion due to transients in distribution systems. *Procedia Engineering*, 89, 1306-1313.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Chaudhry, M. H. (2014). Applied hydraulic transients.
- [12] Joukowski, N. E. (1898). Memoirs of the imperial

حجم مکش آلودگی بیشترین حساسیت را به فشار مخزن بالادست دارد. سرعت سیال درون لوله، سرعت موج فشاری، قطر لوله، قطر نشت و مکان نشت به ترتیب عوامل تاثیرگذار بعدی هستند.

تحلیل رفتار حجم آلودگی ورودی در برابر سرعت سیال، فشار مخزن بالادست و قطر لوله رفتار مشابهی را نشان می‌دهد و با افزایش هر کدام حجم آلودگی ورودی به لوله افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر ریسک نفوذ آلودگی به ازای قطرهای بزرگتر، سرعت‌های و فشارهای بالا افزایش می‌یابد، که این امر توجه بیشتر در بررسی میدانی از خطوط انتقال را طلب می‌کند.

حجم آلودگی ورودی به ازای قطر نشت و مکان نشت دارای بیشینه می‌باشد، در واقع به ازای قرارگیری نشت در مکان‌هایی خاص از لوله و به ازای قطرهایی مشخص محل نشت، حجم آلودگی ورودی به لوله افزایش می‌یابد. در مدل ارائه شده در این پژوهش به ازای استقرار نشت در فاصله ۸۲/۳٪ طول لوله از مخزن بیشترین حجم ورود آلودگی مشاهده شد، هم‌چنین به ازای قطر نشت برابر با ۳/۹٪ قطر لوله ورود بیشینه آلودگی رخ داده‌است.

بررسی تغییرات حجم ورود آلودگی به ازای سرعت انتشار موج ضربه‌قوچ نشان می‌دهد، در سرعت موج‌های پایین‌تر حجم آلودگی ورودی کمتر می‌باشد. با توجه به اینکه سرعت انتشار موج در لوله‌ها به صورت مستقیم به جنس لوله‌ها وابسته است، لذا می‌توان به عنوان یک فرضیه طرح کرد که ورود آلودگی در لوله‌های پلی‌اتیلن کمتر از لوله‌های فلزی است. سرعت انتشار موج در لوله‌های پلی‌اتیلن کمتر از لوله‌های فلزی می‌باشد.

۶- تشکر و قدردانی

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

مراجع

- [1] Grayman, W. M., Rossman, L. A., & Geldreich, E. (1999). Water quality. *Water distribution systems handbook*.
- [2] Borchardt, M., Spencer, S., Kieke, B., Lambertini, E., & Loge, F. (2009). Do water distribution systems contribute to acute gastrointestinal illness incidence.

- planning and management*, 122(2), 137-146.
- [15] 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.
- [16] 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).
- academy society of St. Petersburg. *Proceedings of the American Water Works Association*, 24, 341-424.
- [13] Mansour Rezaei Fumani, S. (2013). *Contaminant intrusion in water distribution systems: Advanced modelling approaches* (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- [14] Rossman, L. A., & Boulos, P. F. (1996). Numerical methods for modeling water quality in distribution systems: A comparison. *Journal of Water Resources*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Payasteh, A. Keramat, *Sensitivity Analysis of Hydraulic Parameters on Contaminant Intrusion in Transient Conditions*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(5) (2019) 907-924.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14230.5595](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14230.5595)

