بررسی پدیده مکش ناگهانی آلودگی از محل نشت بر اثر جریان گذرا

میلاد پایسته[1*]، احمد احمدی[2]، علیرضا کرامت[3,4]

۱- دانشجوی دکتری اب وسازه های هیدرولیکی، دانشکده عمران؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران

۲- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور، دزفول، ایران

۴- دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه پلی تکنیک هنگ کنگ، هنگ هوم، هنگ کنگ

*m67.payesteh@gmail.com

چکیده

مکش ناگهانی آلودگی در سیستم‌های توزیع آب یک پدیده پیچیده و تصادفی است که نیاز به مدل‌های عددی کارآمد برای تخمین جرم آلاینده نفوذی و پیش‌بینی سرنوشت آن دارد. موج فشار منفی ناشی از ضربه‌قوچ، هنگامی که به نقاط آسیب‌پذیر مانند نشت می‌رسد، باعث مکش ناگهانی آلودگی از اطراف نشت به درون لوله می‌شود. موج فشاری مثبت بعدی می‌تواند بخشی از آلودگی را مجدداً از محل نشت خارج کند. این مطالعه یک حل‌گر عددی اولری-لاگرانژی در نرم افزار متلب معرفی می‌کند که قادر به کمّی‌سازی سیستماتیک خروج مجدد آلاینده با در نظر گرفتن اندرکنش نوسانات موج فشاری است. مقایسه نتایج محاسباتی حجم مکش آلودگی با داده‌های آزمایشگاهی نشان‌دهنده میانگین شاخص خطای (nRMSE= ۴٪.۹۵) است که صحت مدلسازی هیدرولیکی و نشت را تایید می‌کند. انتشار آلودگی در شرایط گذرا با استفاده از روش لاگرانژی مدلسازی شد و نتایج دقت بالای آن را با بیشینه خطای (nRMSE=۵٪.۵) نشان می‌دهد. نتایج تحلیل حساسیت جامع شامل ۳۶ سناریوی مختلف نشان می‌دهد که هد فشار نسبی در طول لوله مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر حجم مکش آلاینده‌ها است. بیشینه نرخ خروج مجدد آلاینده‌ها در نزدیکی شیرهای پایین‌دست تا حدود ۶۸٪ مشاهده شد؛ در حالیکه بخش‌های میانی لوله بیشترین میزان مکش و به‌دام‌افتادگی آلاینده‌ها را ثبت کردند. این یافته‌ها نشان می‌دهد گرچه اثر خروج مجدد آلودگی در شرایط خاص قابل توجه است، لیکن می‌توان در جهت اطمینان بیشتر از آن صرفنظر نمود. این یافته‌ها درک بهتری از دینامیک مکش ناگهانی آلاینده‌ها فراهم کرده، شبیه‌سازی رخدادهای مکش ناگهانی آلودگی در سیستم‌های توزیع آب را بهبود می‌بخشند و در نهایت راهبردهای مدیریتی کاراتر جهت تأمین آب سالم را فراهم می‌آورد.

کلمات کلیدی

ضربه‌قوچ؛ مکش و خروج ناگهانی آلودگی؛ انتقال آلودگی؛ نشت؛ روش اولری و لاگرانژی.

۱- مقدمه

آب برای زندگی انسان حیاتی است. توسعه و ایمنی زیرساخت‌های توزیع آب نقش مهمی در سلامت و رفاه انسان از جنبه مادی، فرهنگی، اجتماعی، سیاسی و اقتصادی ایفا می‌کنند. ایمنی شبکه توزیع آب نقش استراتژیک و مهمی در حفظ سلامت عمومی و رشد صنعتی دارد [۱]. مدیریت نشت‌ها در شبکه توزیع آب بسیار مهم است زیرا ممکن است ورود آلودگی از طریق نشت و ترک لوله‌ها، به‌ویژه حین وقوع جریان گذرا رخ دهد که این امر تهدیدی جدی برای سلامت عمومی جامعه محسوب می‌شود [۲]. ورود آلودگی از طریق آبهای زیرزمینی و خاک اطراف لوله‌ها یک تهدید کم‌تر شناخته شده اما خطرناک محسوب می‌شود که ممکن است در طول

ACCEPTED MANUSCRIPT

جریان گذرا با فشار پایین یا منفی رخ دهد [۳, ۴]. حجم ورود آلودگی از محل نشت یکی از شاخص‌های مهمی است که می‌تواند نشان‌دهنده درجه ریسک بهداشتی باشد [۵].

سه عامل موثر در مکش ناگهانی آلودگی عبارتند از منبع آلودگی، فشارهای وارد به سیستم (به‌طور خاص فشار پایین/ منفی) و مسیرهای ورود آلودگی [۶, ۷]. منبع آلودگی شامل هر ماده‌ای مانند میکروب‌ها یا مواد شیمیایی است که بتواند به سیستم وارد شود و شاخص کیفی آب را مختل کند. بررسی جوامع میکروبی و نحوه تغییرات نوع آنها درون شبکه‌های توزیع آب، در ابتدای شبکه تأمین و ۲۴ ساعت پس از آن، نشان‌دهنده ورود ناگهانی باکتری‌های جدید به لوله‌ها یا رشد مجدد باکتری‌ها در بین چرخه‌های تأمین آب است [۸].

فشارهای منفی وارده به سیستم در شرایط خاص، باعث حرکت مواد آلاینده به داخل سیستم می‌شود. پژوهش‌های میدانی در شبکه توزیع شهر پارانای برزیل حاکی از همبستگی بالا بین شاخص‌های هیدرولیک جریان و کیفیت آب است. برای مثال، هنگام غیرفعال شدن پمپ‌ها، افزایش سطح کدورت به‌طور ناگهانی از ۱/۰ به ۲/۴ NTU مشاهده شد. نتایج نشان داد، رابطه‌ی بین دینامیک جریان و فشار با کدورت دارای ضریب همبستگی قابل توجه حدود ۰/۷ است [۹].

مطالعات نشان می‌دهند که آلاینده‌ها اغلب از طریق مسیرهای مختلفی مانند شیرهای هوای مستغرق، نشت‌ها، تعمیرات و اتصالات، مهره‌های معیوب، مفاصل و اتصالات سرویس‌ها وارد لوله می‌شوند [۱۰]. علاوه بر این، آلاینده‌ها ممکن است به‌طور عمدی از طریق یک حمله سایبری وارد شبکه توزیع آب شوند که منجر به تغییر در عملکرد شبکه می‌شود [۱۱]. خاک، آب زیرزمینی و آب موجود در محفظه‌های شیر هوا ممکن است حاوی ترکیبات میکروبی یا شیمیایی باشند. محققان دریافتند که غلظت آلاینده‌های میکروبی در آب و خاک و مدت زمان ماندگاری فشار پایین، بر ریسک آلودگی شبکه تأثیر می‌گذارد [۲, ۱۲, ۱۳]. سه عامل ذکر شده موثر در مکش باید همواره تحت نظارت قرار گیرند تا خطرات ناشی از آنها کاهش یابد.

برای اولین بار در سال ۲۰۰۴، شواهد آزمایشگاهی از مکش ناگهانی ناشی از فشار منفی جریان گذرا ارائه شد [۱۴, ۱۵]. وقوع فشار منفی معمولا به دلیل عملیات پمپ، تعویض لوله، باز و بسته شدن شیرها و تغییرات تقاضا است. با وجود این‌که تغییرات فشار در شبکه توزیع آب شهری به طور قابل توجهی بزرگ نیستند، اما براساس گزارشات، ماهیت تقریباً دائمی آن‌ها می‌تواند خطر شکست لوله و سپس نشتی را به دلیل خستگی سیستم افزایش دهد [۱۶].

مدلسازی عددی مکش آلودگی از محل نشت در شرایط ضربه‌قوچ نخستین بار در قالب شبیه‌سازی یک مستهلک‌کننده انرژی (مخزن تعدیل[1]) صورت پذیرفت. دینامیک پیچیده مکش آلودگی ناشی از ضربه‌قوچ مورد بررسی قرارگرفت و رفتار آلودگی در محل نشت به‌صورت ورود و خروج ناگهانی ارزیابی شد [۱۷]. مورا و همکاران حجم مکش آلودگی را با مدل آزمایشگاهی اندازه‌گیری کردند و برای شبیه‌سازی تغییرات فشار در خطوط لوله طی جریان گذرا از نرم‌افزارهای تجاری دینامیک سیالات محاسباتی استفاده کردند [۱۸]. مدل انتقال آلاینده با روش لاگرانژی کوپل‌شده با مدل هیدرولیکی گذرا براساس روش اولری مشخصه‌ها برای مطالعه مکش ناگهانی توسط رضایی و ناصر ارائه شد [۱۹]. آنها رفتار آلودگی را فقط در لوله‌های چدنی مورد بررسی قرار دادند و اثر اندرکنش نوسانات فشاری در محل نشت را نادیده گرفتند.

تأثیر محیط متخلخل پیرامون نشت بر نرخ مکش آلودگی توسط ینگ و همکاران [۲۰] بررسی شد و یک رابطه جدید برای پیش‌بینی جریان روزنه نشت پیشنهاد شد که مطابقت قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی داشت. مطالعات نشان داد که مقدار آلودگی وارد شده مکانیسم تراوش در لوله‌های نیمه‌پر بیشتر از آلودگی وارد شده توسط جریان‌های گذرا است [۲۱]. یو و همکاران [۵] با مشاهده کاهش سطح آب در لوله شاهد از روش اندازه‌گیری حجمی برای تخمین حجم مکش آلودگی استفاده کردند. آنها اشاره کردند که بخشی از آب آلوده که به دلیل فشار منفی وارد لوله می‌شود، ممکن است به سرعت توسط موج فشار مثبت بعدی خارج شود. روش حجمی مورد استفاده آنها، حجم آلایندگی برگشتی به بیرون از محل نشت را محاسبه نمی‌کرد. فاکس و همکاران [۷] پدیده مکش ناگهانی را با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی بررسی کردند که شامل یک لوله با نشت دفن شده در شن بود. هدف مطالعه آنها ارائه شواهد درباره چگونگی ورود آلاینده‌ها به دلیل جریان گذرا بود. نتایج آنها تأیید کرد که مکش آلودگی رخ می‌دهد اما هیچ خروج مجدد

[1] Surge tank

ACCEPTED MANUSCRIPT

آلاینده‌ها از محل نشت مشاهده نگردید. جونز و همکاران [۲۲] در قالب یک مدل آزمایشگاهی تلاش کردند تا حجم مکش آلودگی را به‌صورت کمی اندازه‌گیری کنند و همبستگی بین حجم مکش آلودگی و فشارهای وارده به سیستم را مشاهده کردند. آنها همچنین روشی برای تخمین حجم مکش آلودگی با استفاده از ارتفاع معادل فشار آب (هد فشاری[1]) اندازه‌گیری‌شده در طول زمان پیشنهاد دادند. مدل آزمایشگاهی آنها فاقد توانایی جهت ارزیابی حرکت رفت و برگشتی آلاینده‌ها اطراف نشت بود و پدیده خروج مجدد آلودگی را در نظر نگرفت. حجم مکش آلودگی با عوامل مختلف مانند سرعت جریان، فشارهای داخلی و خارجی و قطر روزنه همبستگی قابل توجهی داشت [۲۳]. محمود و همکاران [۲۴] نشان دادند که مصرف بیشتر آب در یک منطقه خطر آلودگی در شبکه توزیع را به دلیل بالا رفتن سرعت جریان افزایش می‌دهد. کرامت و همکاران [۲۵] بر ورود آلاینده‌ها به لوله‌های الاستیک و ویسکوالاستیک تمرکز کردند و نشان دادند که ورود آلاینده‌ها در لوله‌های ویسکوالاستیک (به دلیل کاهش سرعت انتشار موج فشاری) به‌طور قابل توجهی کمتر از لوله‌های الاستیک است، به‌ویژه در خطوط انتقال طولانی با دوره‌های طولانی فشار منفی. مطالعه آنها در جهت اطمینان بیشتر در محاسبه ریسک مکش آلودگی، اثر خروج مجدد آلودگی را در نظر نگرفت.

همانگونه که در بخش مرور منابع آورده شد، غالب مطالعات مکش آلودگی در سالهای اخیر به‌صورت آزمایشگاهی و با روش اندازه‌گیری حجمی صورت پذیرفته‌اند. مشکل اساسی مدل‌های آزمایشگاهی مبتنی بر روش اندازه‌گیری حجمی این است که در این روش اثر اندرکنش نوسانات فشار با محل نشت و خروج مجدد آلودگی قابل اندازه‌گیری نیست. همچنین به دلیل محدودیت فنی و اقتصادی امکان تغییر زیاد در اجزا مدل آزمایشگاهی وجود ندارد. لذا همانگونه که یو[2] و همکاران [۵] پیشنهاد می‌کنند، ارائه یک مدل عددی دقیق در زمینه مکش آلودگی در خطوط انتقال آب بسیار کارساز و مفید می‌باشد. چرا که با وجود امکان تغییرات اجزا سیستم زمینه مناسب جهت تعیین ریسک مکش آلودگی در شرایط گوناگون فراهم می‌آید. بازگشت مجدد آلودگی به بیرون محل نشت می‌تواند تاثیر قابل توجهی در اندازه‌گیری حجم مکش آلودگی داشته باشد، لذا این پژوهش سعی دارد در قالب یک مدل عددی دقیق اندرکنش جریان نشت و موج‌های فشاری جریان گذرا را مدلسازی نماید. موضوعی که به‌شدت در مطالعات پیشین مغفول مانده است. این تحقیق جهت افزایش شناخت مهندسی از دینامیک مکش ناگهانی و خروج مجدد آلاینده‌ها، با استفاده از یک مدل عددی اولری-لاگرانژی در نرم افزار متلب سعی بر کمّی‌سازی سیستماتیک خروج مجدد آلاینده‌ها دارد. مکانیسم‌های مکش ناگهانی و خروج مجدد آلاینده‌ها از نقاط نشت در ۳۶ سناریو مختلف مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های این تحقیق شناخت پدیده مکش آلودگی را افزایش می‌دهد و توصیه‌هایی برای بهبود شیوه‌های مدیریت ریسک و ایمنی در سیستم‌های تامین آب ارائه خواهد کرد.

۲- روش‌شناسی

تعیین دقیق میزان مکش ناگهانی آلاینده‌ها و خروج مجدد آن در شبکه توزیع آب مستلزم حل همزمان معادلات هیدرولیکی جریان (ضربه‌قوچ)، انتقال آلاینده، مدلسازی دقیق حجم مکش و اختلاط در گره نشت است. در بخش روش‌شناسی علاوه بر شرح معادلات حاکم به بررسی روش حل عددی آنها نیز پرداخته می‌شود. روش‌های حل عددی اولری و لاگرانژی به طور گسترده‌ای برای حل معادلات جریان و انتقال آلودگی استفاده شده‌اند. روش اولری، معادلات حاکم را بر یک سیستم مختصات ثابت حل می‌کند و طول لوله‌ها را به‌صورت گسسته شبکه‌بندی می‌کند. پارامترهای هیدرولیکی و کیفیت آب در هر نقطه شبکه و در هر گام زمانی به روزرسانی می‌شوند. در مقابل، روش لاگرانژی انتشار امواج فشاری یا انتقال ذرات آلاینده را ردیابی می‌کند و پارامترها، فقط زمانی که تغییراتی در حالت سیستم رخ می‌دهد به‌روزرسانی می‌شوند. این روش از یک سیستم مختصات متحرک همراه با الگوریتم‌های ردیابی ذرات استفاده می‌کند. این رویکردها کمک قابل توجهی به ارتقاء پایداری عددی، دقت، کارایی و سازگاری در حل مسائل چندفیزیکی و چند مقیاسی مکانیک سیالات می‌کند [۲۶]. استفاده ترکیبی از رویکردهای اولری و لاگرانژی به طور گسترده‌ای برای محاسبه عددی مکش ناگهانی

[1] Pressure head

ACCEPTED MANUSCRIPT

آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، که در آن معمولاً روش اولری خطوط مشخصه[1] برای هیدرولیک جریان و روش لاگرانژی رویدادمحور[2] برای انتقال آلاینده‌ها استفاده می‌شود [۱۹].

۱-۲- معادلات ضربه قوچ

ضربه‌قوچ یک پدیده دینامیکی در سیستم‌های لوله تحت فشار است که می‌تواند مسائل قابل توجهی مانند صدا، لرزش و مشکلات احتمالی مانند خستگی لوله، ترک‌خوردگی و خرابی تجهیزات را سبب شود [۲۷]. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که جریان سیال به‌طور ناگهانی متوقف شود یا جهت آن به سرعت تغییر کند، در نتیجه یک موج فشاری ایجاد می‌شود که در طول لوله حرکت می‌کند و جریان ماندگار درون لوله را دستخوش تغییر می‌کند. دو معادله رایج پایستگی جرم و تکانه به‌صورت زیر برای جریان‌های گذرا در لوله‌های الاستیک مورد استفاده قرار می‌گیرند:

$$\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{a^2}{gA}\frac{\partial Q}{\partial x}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{1}{gA}\frac{\partial Q}{\partial t}+J=0 \qquad (۲)$$

که در آن ارتفاع معادل فشار آب (هد فشاری) H، دبی Q، زمان t، فاصله در امتداد لوله x، سرعت موج فشاری a، شتاب گرانشی g، مساحت مقطع جریان سیال A و اثر اصطکاک J، به‌عنوان پارامترهای مهم در نظرگرفته می‌شوند. برای تعیین دقیق ضریب اصطکاک غیرماندگار، معمولاً از فرمول‌های تجربی که براساس داده‌های آزمایشگاهی استخراج شده‌اند، استفاده می‌شود. مدل برونون و همکاران [۲۸] که بر اساس شتاب لحظه‌ای استوار است، به دلیل سادگی و کارایی آن بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. برای بهبود دقت روش برونون، ویتوسکی و همکاران [۲۹] نسخه اصلاح شده‌ای از این مدل را پیشنهاد دادند که در این تحقیق برای افزایش دقت مدل مورد استفاده قرار گرفته است. پارامتر اصطکاک شامل دو جزء اصلی است: جزء اصطکاک نیمه‌ماندگار[3] (J_s) و جزء اصطکاک غیرماندگار[4] (J_u). جزء غیرماندگار (J_u) تابعی از شتاب‌های محلی[5] و همرفتی[6] به شرح زیر است:

$$J=J_s+J_u=\kappa\frac{Q^2}{2A^2D}+\frac{\sqrt{C^*}}{2A}\left[\frac{\partial Q}{\partial t}+\mathrm{sign}(Q)a\left|\frac{\partial Q}{\partial x}\right|\right] \qquad (۳)$$

در این رابطه ضریب اصطکاک نیمه‌ماندگار κ، قطر لوله D، علامت دبی متوسط $\mathrm{sign}(Q)$ و ضریب کاهش برش واردی[7] C^* استفاده می‌شوند. در این مطالعه، از مدل حباب بخار گسسته[8] برای شبیه‌سازی دقیق پدیده‌های جداسازی ستون سیال استفاده می‌شود. در این روش فرض می شود، حباب کاویتاسیون در محل گره محاسباتی تشکیل می‌شود، فشار داخل حباب در حد فشار بخار آب ثابت می‌ماند (تقریباً ۹۸/۰۶ کیلو پاسکال) و وجود مایع خالص بین حباب کاویتاسیون را نادیده می‌گیرند. تولید حباب‌های کاویتاسیون زمانی رخ می‌دهد که فشار به زیر یا برابر با فشار بخار برسد، در حالی که فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون با حجم حباب کاویتاسیون برابر یا کمتر از صفر ($V_{vc} = < 0$) رخ می‌دهد. گره‌های واقع در بین این دو رخداد به عنوان گره‌های مرزی داخلی شناخته می‌شوند که با فشار بخار اشباع مشخص می‌شوند [۳۰]. حجم حفره در این گره‌ها به‌وسیله تفاوت بین دبی ورودی (Q_{in}) و خروجی (Q_{out}) در گره محاسبه می‌شود، همانطور که در معادله (۴) نشان داده شده است:

---

[1] Method of Characteristics
[2] Event Driven Method
[3] quasi-steady friction
[4] unsteady friction
[5] local accelerations
[6] convective accelerations
[7] Vardy's shear decay coefficient
[8] Discrete Vapour Cavity Model

ACCEPTED MANUSCRIPT

$$V_{vc} = \int_{t}^{t+\Delta t} \left(Q_{out} - Q_{in}\right) dt \quad (۴)$$

در شرایطی که جریان گذرا توسط بسته شدن یک شیر ایجاد می‌شود، تشکیل حباب در موقعیت شیر، همراه با فشار بخار، رخ می‌دهد. این فشار منفی در محل نشت، مکش آلاینده‌ها به داخل خط لوله را تسهیل می‌کند. بنابراین، مدلسازی دقیق جداسازی ستون سیال از اهمیت بالایی در تعیین حجم دقیق پدیده مکش آلاینده برخوردار است.

۲-۲- مدلسازی محل نشت با رابطه روزنه

مدلسازی دقیق مکش آلاینده‌ها مستلزم درک رابطه بین رفتار هیدرولیکی نشت و انتقال آلاینده‌ها است. نشت‌ها معمولاً به‌عنوان روزنه‌های کوچک شبیه‌سازی می‌شوند و رفتار آنها تحت فشار مختلف به‌طور قابل توجهی بر مکش ناگهانی آلاینده تأثیر می‌گذارد. مطالعات اخیر مانند تحقیقات موسمم و همکاران [۳۱] به بررسی تجربی ضرایب روزنه تحت شرایط فشار مثبت و منفی پرداخته‌اند. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که رفتار نشت تحت فشار مثبت را می‌توان برای سناریوهای شامل فشار منفی و جریان‌های مکش ناگهانی آلودگی اعمال کرد. برای مدلسازی نشت‌ها، این مطالعه از یک رابطه روزنه اصلاح‌شده استفاده می‌کند که براساس یافته‌های آزمایشگاهی یو و همکاران [۵] استوار است. این رابطه روزنه اصلاح‌شده شامل یک ضریب تصحیح است که هدف آن بهبود مدل سنتی روزنه است. معادله روزنه اصلاح شده به‌صورت زیر می‌باشد:

$$Q_L = \eta C_d A_l \sqrt{2gH_L} = \eta C_d A_l \sqrt{2g\left|h_{L,\text{out}} - (h_{L,\text{in}} - Z_L)\right|} \quad (۵)$$

$$\eta = 0.012 \frac{k_1^{0.008}}{k_2^{2.422} k_3^{0.513}} \quad (۶)$$

$$k_1 = \frac{u_0}{a} \times 100 \quad (۷)$$

$$k_2 = \frac{H_{res} - h_{L,\text{out}}}{H_a} \quad (۸)$$

$$k_3 = \frac{d}{D} \quad (۹)$$

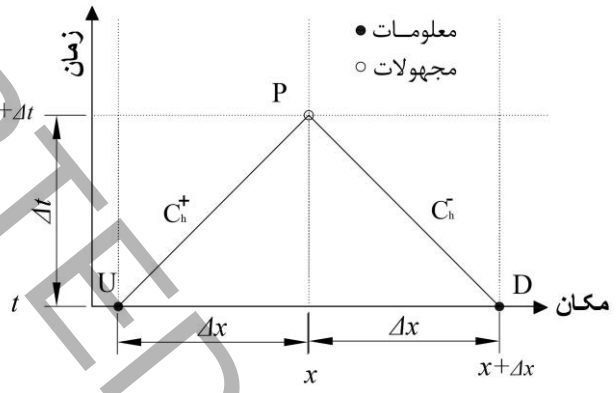
در این رابطه ضریب تصحیح روزنه η، C_d ضریب روزنه، A_l مساحت مقطع نشت، H_L ارتفاع معادل فشار آب (هد فشاری) در نقطه نشت، $h_{L,out}$ ارتفاع معادل فشار آب خارج از لوله در محل نشت، $h_{L,in}$ ارتفاع معادل فشار آب داخل لوله در محل نشت، Z_L ارتفاع نقطه نشت از سطح تراز، Q_L دبی نشت است. همچنین پارامترهای دیگر مانند سرعت اولیه سیال داخل لوله u_0، ارتفاع آب معادل فشار اتمسفر H_a برابر با ۱۰/۳۳ متر آب، H_{res} ارتفاع معادل فشار آب مخزن و قطر روزنه نشت d نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مدلسازی پدیده مکش ناگهانی آلاینده‌ها بسیار مهم است که اثر متقابل بین ضریب تصحیح روزنه و نتایج حاصل از حل سرعت جریان در حالت ماندگار مد نظر قرار گیرد. محاسبه جریان حالت ماندگار و ضریب تصحیح روزنه با استفاده از یک دسته محاسبات عددی سعی و خطا محاسبه می‌شود. مدلسازی عددی ارائه شده در این پژوهش انعطاف‌پذیر است و می‌تواند برای سناریوهای پیچیده‌تر با تعداد نشت متفاوت در سیستم گسترش یابد. این چارچوب پایه‌ای محکم برای تحقیقات میدانی ایجاد می‌کند. در حالی که بسیاری از پارامترهای

ACCEPTED MANUSCRIPT

مورد استفاده در معادلات ممکن است به طور مستقیم در پژوهش میدانی قابل اندازه‌گیری نباشند، هدف اصلی این مطالعه، مدلسازی عددی پدیده مکش ناگهانی آلودگی به‌منظور تعمیق درک ما از آن است.

۳-۲- حل عددی معادلات ضربه قوچ با روش اولری مشخصه‌ها

مسائل جریان گذرا در سیستم‌های هیدرولیکی به طور موثر با استفاده از روش‌های عددی اولری حل می‌شوند که شامل روش مشخصه‌ها، روش حجم محدود و روش تفاضل محدود هستند [۳۲]. در بین این روش‌ها، روش مشخصه‌ها به عنوان رویکرد اصلی برای حل مسائل جریان گذرا شناخته شده است. با اعمال روش مشخصه‌ها بر معادلات حاکم بر جریان گذرا، می‌توان فرم صریح معادلات را بر روی خطوط مشخصه (C^+، C^-) استخراج کرد، آنگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: خطوط مشخصه در صفحه *x-t*

$$C^+ : H_L = C_p - BQ_L \, , B = \frac{a}{gA} \tag{۱۰}$$

$$C^- : H_L = C_m + BQ_L \tag{۱۱}$$

$$C_p = H_U + BQ_U - \frac{a}{g} J_U \Delta t \tag{۱۲}$$

$$C_m = H_D - BQ_D + \frac{a}{g} J_D \Delta t \tag{۱۳}$$

که C_p و C_m بر اساس مقادیر گام زمانی قبل محاسبه می‌شود. معادلات (۱۰) تا (۱۳) برای شبیه‌سازی ضربه‌قوچ در یک شبکه‌بندی مستطیلی اعمال می‌شوند. ترم اصطکاک J به‌صورت صریح محاسبه می‌شود.

۴-۲- شرایط مرزی معادله ضربه‌قوچ در گره نشت

نشت‌ها به عنوان یک روزنه در نظر گرفته می‌شوند، مطابق با مشخصات ارائه شده توسط برگانت و همکاران [۳۳] دو رابطه مجزا برای ایجاد همبستگی بین ارتفاع معادل فشار آب و دبی اطراف نشت‌ها استفاده می‌شود:

$$Q_L^+ - Q_L^- - Q_L = 0 \tag{۱۴}$$

$$H_L^+ = H_L^- = H_L \tag{۱۵}$$

که H_L^+ و H_L^- به ترتیب ارتفاع معادل فشار آب بالادست و پایین‌دست گره نشت می‌باشد. با جایگذاری رابطه (۱۶)، (۱۷) و رابطه نشت (۵) در معادله پیوستگی (۱۴) معادله غیرخطی (۱۸) بدست می‌آید، که با حل آن دبی و هد فشاری اطراف محل نشت قابل محاسبه است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

$$C^+: \quad Q_L^+ = \frac{C_p - H_L^+}{B} \tag{۱۶}$$

$$C^-: \quad Q_L^- = \frac{H_L^- - C_m}{B} \tag{۱۷}$$

$$\left(\frac{C_p - H_L^+}{B}\right) - \left(\frac{H_L^- - C_m}{B}\right) - \left(\eta C_d A_1 \sqrt{2gH_L}\right) = 0 \tag{۱۸}$$

۲-۵- معادله انتقال آلودگی

انتقال آلاینده‌ها توسط معادله جابه‌جایی-پخش-واکنش مدلسازی می‌شود که از ترکیب دو قانون پایستگی جرم و قانون فیک[1] استخراج می شود [۳۴].

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u\frac{\partial \phi}{\partial x} = D_d \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + K_a \phi \tag{۱۹}$$

در این معادله، u سرعت سیال ϕ غلظت آلاینده، K_a نرخ واکنش (تجزیه یا جذب) و D_d ضریب پخش است. در بحث مکش ناگهانی، به دلیل سرعت‌های بالا و تحلیل عدد پیکلت که در این شرایط بسیار بزرگ‌تر از واحد است ($Pe \gg 1$)، ترم پخش نسبت به ترم جابه‌جایی ناچیز و قابل صرفنظر است. در این پژوهش فرض بر اینست که آلاینده واکنش ناپذیر[2] است، لذا جرم آلاینده در طول انتقال بدون تغییر باقی می‌ماند. با این حال، اگر لازم باشد، مدل را می‌توان برای تطبیق با آلاینده‌های واکنش پذیر اصلاح کرد. معادله انتقال را می‌توان با استفاده از رابطه پیشنهادی توسط راسمن و بلوز به‌صورت زیر ساده کرد [۳۵].

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \tag{۲۰}$$

۲-۶- تعادل جرم آلودگی در گره نشت

رفتار دینامیکی ضربه‌قوچ می‌تواند جهت جریان را در نزدیکی نشت تغییر دهد و پدیده‌هایی مانند اختلاط، مکش ناگهانی یا خروج مجدد آلاینده‌ها را ایجاد کند. بنابراین مدلسازی دقیق شرایط مرزی گذرا بسیار مهم است. نشت به‌عنوان یک گره شاخه‌ای در نظر گرفته می‌شود که غلظت در محل نشت با استفاده از میانگین وزنی غلظت‌های جریان ورودی تعیین می‌شود [۳۶]. رابطه‌ی (۲۱) به عنوان یک روش مؤثر برای مدلسازی شرایط مرزی غلظت نزدیک به نشت در حالت گذرا ارائه شده است که از طریق پارامترهای α، β و γ، اثرات جهت جریان در محاسبه غلظت خروجی از گره را لحاظ می‌کند [۲۵].

$\phi_{Ex} = \frac{\left(\frac{1+\alpha}{2}\right)\left\|Q_L^+\right\|\phi_U + \left(\frac{1-\beta}{2}\right)\left\|Q_L^-\right\|\phi_D + \left(\frac{1-\gamma}{2}\right)\left\|Q_L\right\|\phi_0}{\left(\frac{1+\alpha}{2}\right)\left\|Q_L^+\right\| + \left(\frac{1-\beta}{2}\right)\left\|Q_L^-\right\| + \left(\frac{1-\gamma}{2}\right)\left\|Q_L\right\|}$	(۲۱)
$\alpha = \frac{\left\|Q_L^+\right\|}{Q_L^+}$	(۲۲)
$\beta = \frac{\left\|Q_L^-\right\|}{Q_L^-}$	(۲۳)

[1] Fick's law
[2] conservative

ACCEPTED MANUSCRIPT

$\gamma = \frac{\lvert Q_L \rvert}{Q_L}$	(۲۴)

در این معادله، $\emptyset_{Ex}$ غلظت آلاینده در محل نشت، $\emptyset_0$ غلظت آلاینده خارج از محل نشت، $\emptyset_U$ و $\emptyset_D$ غلظت آلاینده در بالادست و پایین‌دست نقطه نشت است. همچنین Q_L دبی نشت، Q_L^+ دبی بالادست محل نشت و Q_L^- دبی پایین‌دست محل نشت است. برای شبیه‌سازی انتقال آلاینده‌ها، مدل دبی اطراف نشت را شناسایی می‌کند. بسته به جهت جریان در طول ورود آلودگی، ممکن است آلاینده‌ها به سمت بالادست، پایین‌دست و یا در هر دو جهت پخش شوند.

۷-۲- حل معادله جابجایی گذرا با روش لاگرانژی

برای حل عددی لاگرانژی معادله (۲۰)، از قانون زنجیری[1] و فرض $u = \frac{dx}{dt}$ استفاده می‌شود، لذا معادله‌ی (۲۰) به فرم زیر ارائه می شود [۳۷]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{dx}{dt}\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0 \rightarrow \frac{d\phi}{dt} = 0 \qquad (۲۵)$$

رابطه (۲۵) مدل لاگرانژی برای انتشار آلودگی را به بهترین وجه نمایش می‌دهد. در روش لاگرانژی با فرض عدم واکنش پذیری ماده آلاینده، حذف ترم پخش در مقابل جابجایی، اختلاط کامل درگره نشت و با تغییر شبکه‌بندی متناسب با سرعت جریان، انتشار آلودگی در شرایط گذرا به تعدادی زیر بازه با شرایط ماندگار تفکیک می‌شود، لذا در این زیر بازه‌های ماندگار، آلودگی به‌صورت بسته‌ای با حجم و غلظت ثابت فرض می‌شود که با توجه به سرعت‌های مدل هیدرولیکی در طول لوله جابجا می‌شود. باید توجه داشت که این بسته‌های مجزا با حجم و غلظت ثابت، در گذر زمان تشکیل یک پروفیل غلظت متغییر در شرایط گذرا را می‌دهند. تعداد بسته‌های آلودگی بوجود آمده به نوسانات جریان 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 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 استهلاک موج ضربه‌قوچ، حرکت رفت و برگشتی آلودگی در اطراف محل نشت پایان می‌یابد و نهایتا بخشی از آلودگی در لوله به دام می‌افتد [۱۹]. 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 VCP[2] و غلظت بسته آلودگی CCP[3] با استفاده از روابط (۲۶) و (۲۷) قابل محاسبه است [۱۹]:

$$VCP = \Delta t \sum_{n=1}^{N} Q_L(t_n) \quad \text{For} \quad t_1 < t_n < t_N \qquad (۲۶)$$

$$CCP = \frac{\sum_{n=1}^{N} \phi_{ex}(t_n)}{N} \quad \text{For} \quad t_1 < t_n < t_N \qquad (۲۷)$$

[1] Chain law
[2] Volume of contaminated parcel
[3] Location of contaminated parcel

ACCEPTED MANUSCRIPT

که $Q_L(t_n)$ دبی محل نشت، t_n زمانی است که آلودگی از محل نشت وارد می‌شود، Δt گام زمانی مدل هیدرولیکی، $\emptyset_{Ex}(t_n)$ غلظت آلودگی در محل نشت که با استفاده از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود و N تعداد گام‌های زمانی است که آلودگی در گره نشت وجود دارد. جرم آلودگی به دام افتاده[1] درلوله، با استفاده از رابطه (۲۸) قابل محاسبه است:

$$RCM = \sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{T} Q_{ij}\phi_{ij}\Delta t \qquad (۲۸)$$

که ϕ_{ij} و Q_{ij} غلظت آلودگی و دبی در گره مکانی i در گام زمانی j، T زمان مدلسازی و K تعداد کل گره‌های مکانی در طول لوله است. با صرفنظر کردن از اثر خروج مجدد آلودگی، حجم ($TVCP$) و جرم کل بسته آلودگی[2] ($TMCP$) وارد شده از محل نشت با استفاده از رابطه (۲۹) و (۳۰) محاسبه می‌شود:

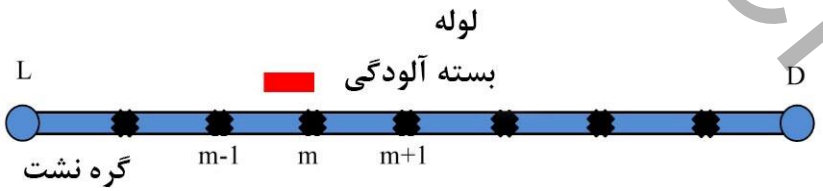
$$TVCP = \Delta t\sum_{n=1}^{M}\max\left(0,-Q_L\left(t_n\right)\right) \qquad (۲۹)$$

$$TMCP = \Delta t\sum_{n=1}^{M}\max\left(0,-Q_L\left(t_n\right)\right)\phi_0 \qquad (۳۰)$$

M تعداد گام زمانی مربوط به جریان گذرا است. $TMCP$ برای اندازه‌گیری کل جرم آلاینده‌هایی که از طریق نشت وارد شده‌اند، استفاده می‌شود. این پارامتر مساحت زیر منحنی دبی-زمان را در شرایطی که دبی محل نشت منفی باشد، محاسبه می‌کند. پارامتر RCM با استفاده از الگوریتم مخزن (معادله ۲۱)، هم ورود و هم خروج مجدد آلاینده‌ها را در نظر می‌گیرد. پارامتر R_{ex} نیز نسبت خروج مجدد آلاینده‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. این پارامتر اهمیت زیادی دارد زیرا میزان نسبی آلاینده‌هایی که حذف شده‌اند را نشان می‌دهد.

$$R_{ex} = \frac{TMCP - RCM}{TMCP}\times 100 \qquad (۳۱)$$

شبیه‌سازی مدل اولری-لاگرانژی مکش آلودگی در نرم افزار متلب به‌صورت زیر آغاز می‌شود: ابتدا پارامترها و تنظیمات تعریف شده توسط کاربر وارد شده، گام زمانی مناسب انتخاب می‌شود، و گره‌های مکانی براساس سرعت انتشار موج تعیین می‌گردند. محاسبات حالت پایدار پیش از بسته‌شدن شیر انجام شده و ضریب اصلاح روزنه در شرایط ماندگار کالیبره می‌شود. شاخص مکانی (i) و شاخص زمانی (j) روی مقدار ۲ تنظیم می‌شوند. گره‌های داخلی (شامل گره‌های نشت) از $i=2$ تا nt برای هر گام زمانی محاسبه می‌گردند. شرایط مرزی نشت در گره $i=iL$ اعمال می‌شود. شرایط هیدرولیکی مخزن و شیر در گره $i=1$ و $i=n-1$ محاسبه می‌گردد. در صورت استفاده از مدل اصطکاک گذرا، شتاب‌ها محاسبه می‌شوند. گره‌های داخلی از نظر تشکیل حفره‌های بخار بررسی می‌شوند (DVCM). اگر گام زمانی فعلی (j) کوچکتر از nt باشد، به گام زمانی بعدی ($j+1$) رفته و شاخص مکانی بازنشانی می‌شود. در غیر اینصورت ($j=nt$) شبیه‌سازی پایان یافته و خروجی مدلسازی هیدرولیکی آماده است. نتایج به‌دست آمده امکان محاسبه پارامتر $TMCP$ را فراهم می‌کنند. غلظت آلاینده در گره نشت ($\emptyset_{Ex}$) به‌عنوان شرایط اولیه برای معادلات انتقال تعیین می‌شود. حجم (VCP) و غلظت (CCP) بسته آلاینده محاسبه می‌گردد. جهت انتشار آلودگی به روش لاگرانژی، همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، حجم و غلظت بسته آلودگی در طول هر گام زمانی بدون تغییر در نظرگرفته می‌شود.



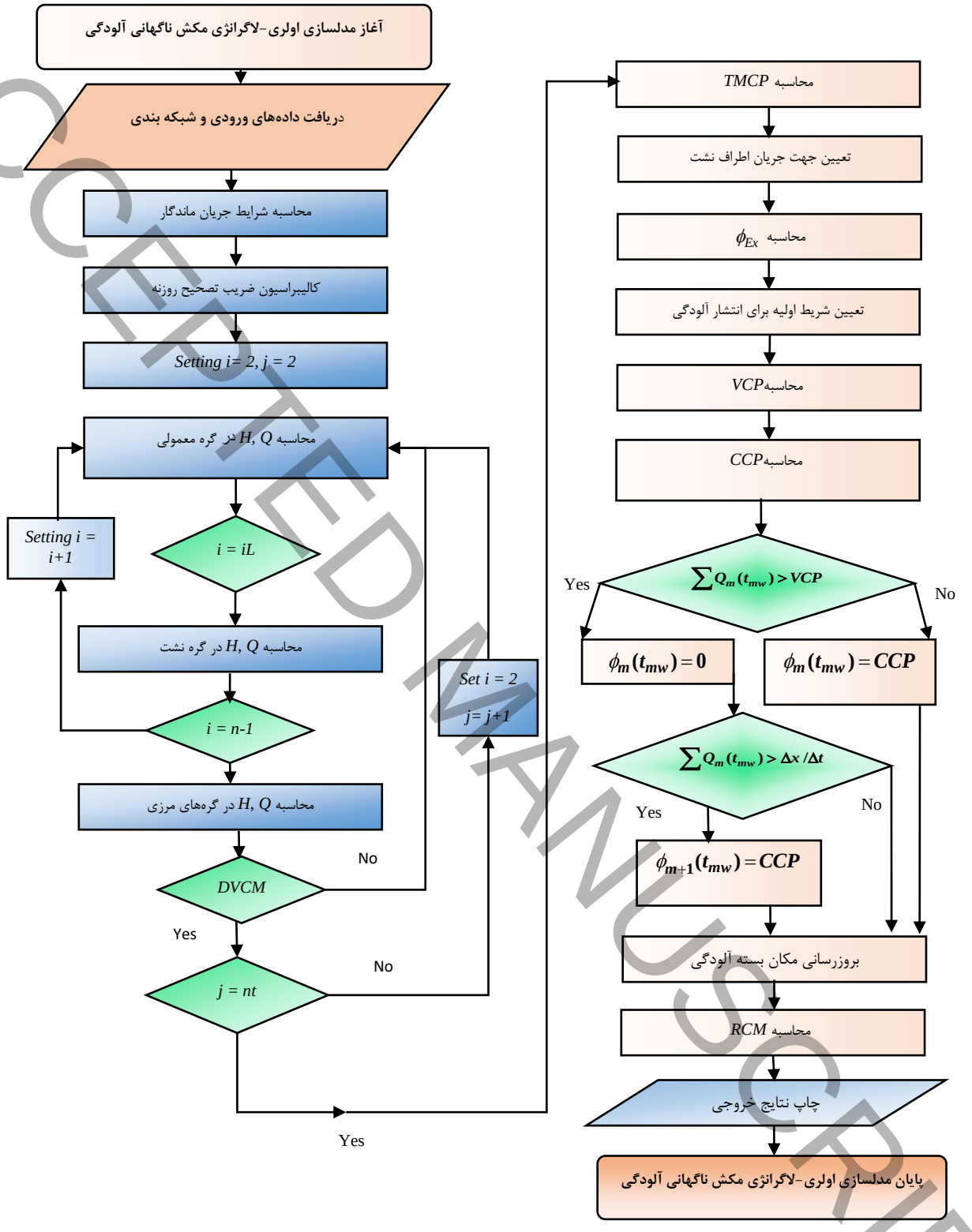
[1] Residual Contaminant Mass (*RCM*)
[2] Total Mass of the Contaminant Parcel (*TMCP*)

ACCEPTED MANUSCRIPT

شکل۲: زمان رسیدن بسته آلودگی به نقطه *m* در زمان *t1*

هنگامی که بسته آلاینده به گره داخلی m در زمان t_{m1} می‌رسد، غلظت در گره m از صفر به CCP تغییر می‌کند. برای محاسبه غلظت آلاینده در گره m در زمان t_{mw}، $\sum Q_m(t_{mw})$ محاسبه می‌شود که t_{mw} زمان مربوط به گام هیدرولیکی w پس از رسیدن آلاینده به گره m نشان می‌دهد. اگر مجموع $\sum Q_m(t_{mw})$ از VCP بیشتر شود، غلظت در گره m از CCP به صفر باز می‌گردد. اگر مجموع جریان از dx/dt تجاوزکند، بسته به گره $m+1$ می‌رسد و غلظت در گره $m+1$ به CCP تغییر می‌یابد. موقعیت بسته آلاینده به‌طور مداوم به‌روزرسانی می‌شود. پس از اتمام زمان شبیه‌سازی، نتایج ذخیره شده و RCM محاسبه می‌گردد. شکل ۳، فلوچارت مدلسازی مکش ناگهانی آلودگی با دیدگاه اولری-لاگرانژی را نشان می‌دهد.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۳: فلوچارت مدلسازی مکش ناگهانی آلودگی با دیدگاه اولری-لاگرانژی.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۳- اعتماد سنجی

با توجه به اینکه مطالعات قبلی صرفا با روش اندازه‌گیری حجمی بوده و فاقد مدلسازی انتقال آلاینده‌های وارد شده از محل نشت است، داده آزمایشگاهی جهت مقایسه با نتایج عددی در خصوص انتقال آلایندگی حین وقوع مکش ناگهانی وجود نداشت [۵, ۲۲]، لذا این مطالعه نتایج خود را در دو مرحله اعتبارسنجی می‌کند. در مرحله اول، اعتبارسنجی مدل هیدرولیکی و نشت با اندازه‌گیری حجم آلودگی وارد شده به لوله و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی یو و همکاران انجام می‌شود. در مرحله دوم، اعتبارسنجی نتایج با مقایسه نتایج مدلسازی عددی انتقال آلاینده در شرایط گذرا با نتایج فرناندز و کارنی [۱۷] انجام می‌شود. لازم به ذکر است صرف اندازه‌گیری جرم مکش آلودگی (از طریق پارامتر *TMCP*) برای اعتبارسنجی مدل هیدرولیکی و نشت کافی است زیرا نحوه انتقال و سرنوشت آلودگی هیچ تاثیری درمقدار این پارامتر ندارد. این پارامتر مستقیما توسط روش شبه تحلیلی مشخصه‌ها و با دقت بالا محاسبه می‌شود لذا می‌تواند به‌عنوان معیاری برای دقت مدل انتقال آلاینده و آنالیز استقلال از شبکه بکارگرفته شود. در مقابل پارامتر *(RCM)* جرم آلودگی باقیمانده را با استفاده از معادلات انتقال ناشی از جریان گذرا نشان می‌دهد. لذا در مرحله دوم صحت‌سنجی پروفیل مکانی-زمانی انتشار آلودگی حائز اهمیت هست که سعی شده در قالب مقایسه با نتایج پژوهش فرناندز و کارنی مورد ارزیابی دقیق قرار گیرد. با توجه به فرض عدم واکنش پذیری آلاینده همگرایی دو پارامتر *(TMCP)*، و *(RCM)* اساس آنالیز استقلال از شبکه در بخش سوم اعتمادسنجی قرار گرفته است.

۳-۱- مقایسه حجم آلودگی مکیده شده با نتایج آزمایشگاهی یو و همکاران [۵]

برای ارزیابی دقت روش عددی ارائه شده در تخمین حجم مکش ناگهانی، مدل آزمایشگاهی که توسط یو و همکاران [۵] طراحی شده بود، به‌صورت عددی شبیه‌سازی شد. سپس نتایج محاسباتی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند. تأسیسات آزمایشگاهی یو، در دانشگاه ژجیانگ[1] واقع شده است، که شامل یک خط لوله فولادی به طول ۵۰/۳ متر با قطر داخلی ۵۰ میلی‌متر است. یک روزنه دایره‌ای با قطر ۳ میلی‌متر در فاصله ۱۲ متری پایین‌دست مخزن آب قرار دارد. برای شبیه‌سازی نشت در لوله، از یک دستگاه مکش ناگهانی استفاده شد. این دستگاه شامل یک مخزن آب پلکسی‌گلاس به ابعاد ۰/۴ متر × ۰/۲ متر × ۰/۵ متر است که مهر و موم شده و از طریق یک لوله جانبی فولادی به لوله اصلی آب متصل می‌شود. جدول شماره (۱) خصوصیات مدل آزمایشگاهی یو و همکاران را نشان می‌دهد.

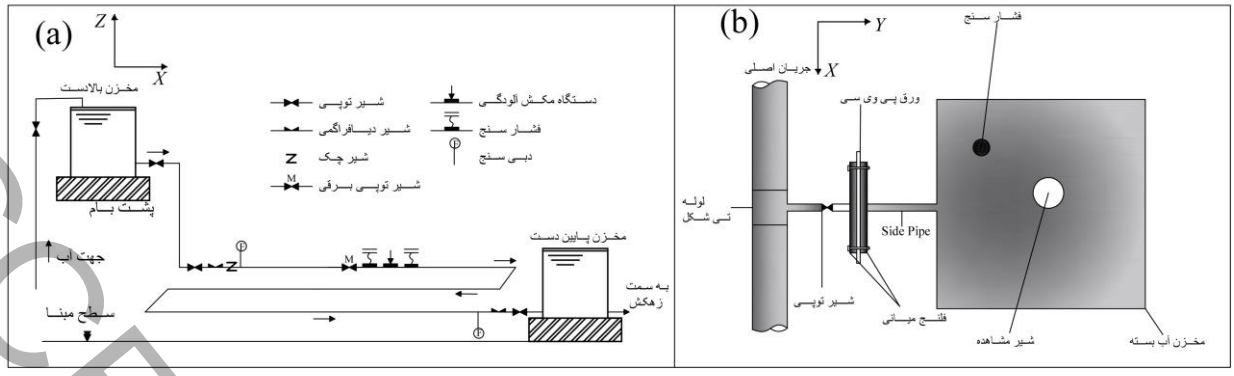
جدول ۱: مشخصات خطوط انتقال و مخزن در آزمایشگاه یو و همکاران [۵].

D (mm)	۵۰	(s) زمان مدلسازی	۱۱
L (m)	۵۰/۳	(m/s) سرعت اولیه	-۰/۳۸-۰/۵۱-۰/۶۴ ۰/۲۵
(mm) قطر روزنه	۳- ۴/۵-۶- ۷/۵	h_{res} (m)	۳
x_l (m)	۱۲	$h_{L,\text{in}}$ (m)	۰/۹۸
c (m/s)	۱۴۲۸	C_d	۰/۶۷
(m) محل استقرار فشارسنج	۱۳-۱۱	(s) زمان بسته شدن شیر	۱

لوله جانبی دارای صفحه‌ای از پیش سوراخ‌شده با یک حفره کوچک در مرکز خود می‌باشد. افزون بر این، یک لوله پلکسی‌گلاس با قطر داخلی ۳۴ میلی‌متر به مخزن آب‌بندی‌شده، متصل شده تا مشاهده تغییرات حجمی و اندازه‌گیری مکش ناگهانی ممکن گردد. شکل ۴ شماتیک مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه آنها را نشان می‌دهد.

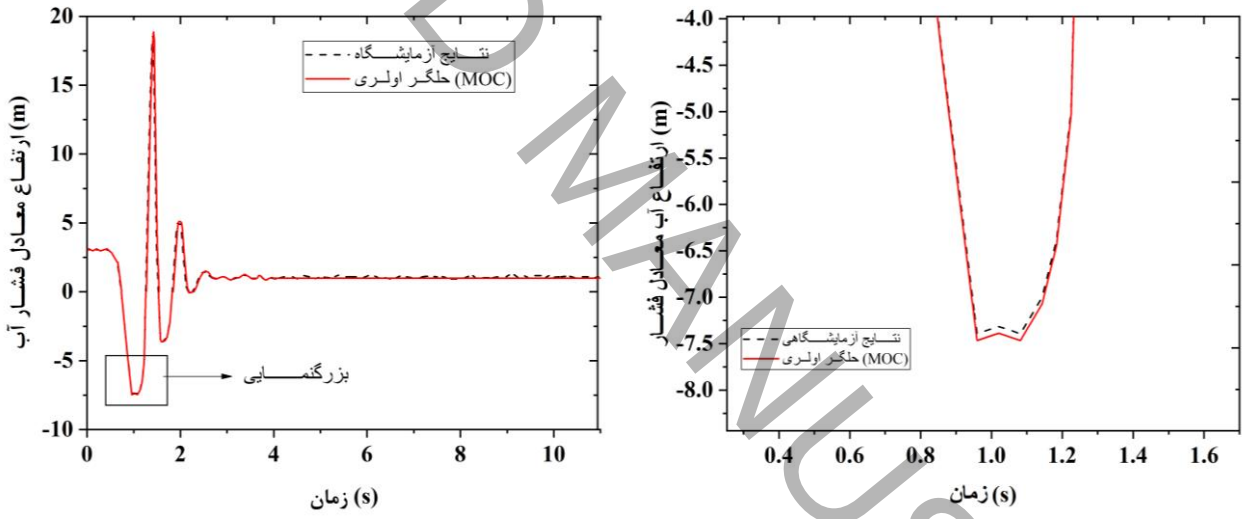
[1] Zhejiang

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۴: شماتیک مدل آزمایشگاهی یو و همکاران و محفظه مکش آلودگی.

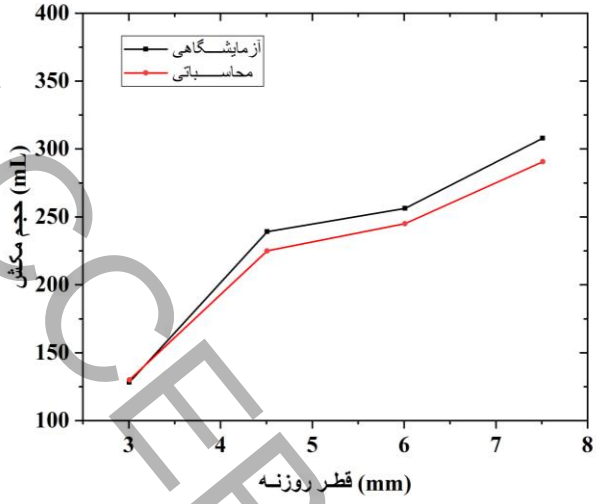
شیر توپی برقی بالادست در یک ثانیه بسته می‌شود تا یک جریان گذرا با فشار منفی ایجاد شود. نتایج عددی ارتفاع معادل فشار آب گذرا ناشی از بسته شدن شیر بالادست، همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، شامل چندین پارامتر کلیدی است: ارتفاع معادل فشار آب خارج نشت ۰/۹۸ متر، ارتفاع معادل فشار آب اولیه مخزن ۳ متر، سرعت جریان اولیه ۰/۶۴ متر بر ثانیه، قطر روزنه ۳ میلی‌متر، شبکه‌بندی مکانی (dx) یک متر و شبکه‌بندی زمانی (dt) ۰/۰۰۰۷ ثانیه است. نتایج این پژوهش با داده‌های ارتفاع معادل فشار آب ارائه شده توسط یو و همکاران مقایسه شده است. شاخص خطای ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) در محدوده ۷/۲٪ اندازه‌گیری شد که نشان می‌دهد، نتایج از دقت قابل قبولی برخوردارند.



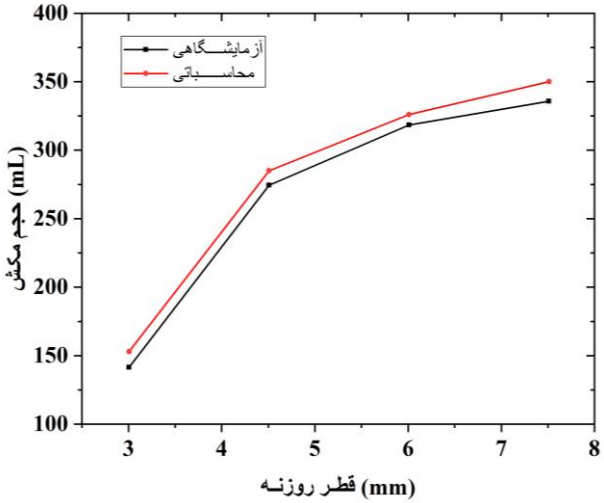
شکل ۵: مقایسه نتایج مدل عددی ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی برای ارتفاع معادل فشار آب (سرعت اولیه سیال ۰/۶۴ متر بر ثانیه و قطر نشت ۳ میلیمتر).

حجم‌های مکش ناگهانی آلودگی برای سرعت‌های مختلف جریان (۰/۶۴- ۰/۵۱- ۰/۳۸- ۰/۲۵ متر بر ثانیه) و قطرهای روزنه متفاوت (۳- ۴/۵- ۶- ۷/۵ میلیمتر) اندازه‌گیری شد. نتایج حجم مکش ناگهانی آلودگی که با استفاده از حل‌کننده اولری مشخصه‌ها بدست آمده‌اند، با حجم‌های مکش اندازه‌گیری شده توسط یو و همکاران مقایسه شدند. اندازه‌گیری دقیق حجم بسته آلایندگی (VCP) درون لوله‌ها چالش‌های قابل توجهی را در مدل‌های آزمایشگاهی ایجاد می‌کند، به‌ویژه زمانی که به روش‌های اندازه‌گیری حجمی اکتفا شده است. این محدودیت روش‌شناختی می‌تواند منجر به نادیده گرفتن احتمال خروج مجدد آلاینده‌ها از نقاط نشت شود، لذا در این بخش برای اعتبارسنجی، حجم کل بسته آلودگی مکیده شده ($TVCP$)، ملاک اندازه‌گیری قرار گرفت. شکل (۶) الف-د نتایج مربوط به حجم مکش آلودگی را برای سرعت‌های اولیه جریان و قطرهای مختلف روزنه به ترتیب: (الف) ۰/۶۴ متر بر ثانیه، (ب) ۰/۵۱ متر بر ثانیه، (ج) ۰/۳۸ متر بر ثانیه و (د) ۰/۲۵ متر بر ثانیه ارائه می‌کنند.

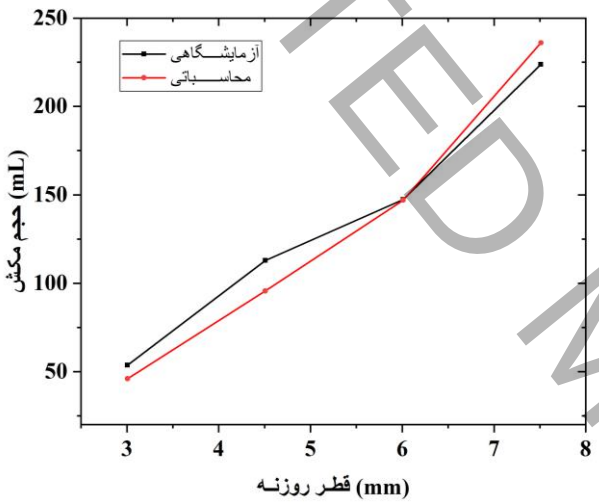
ACCEPTED MANUSCRIPT



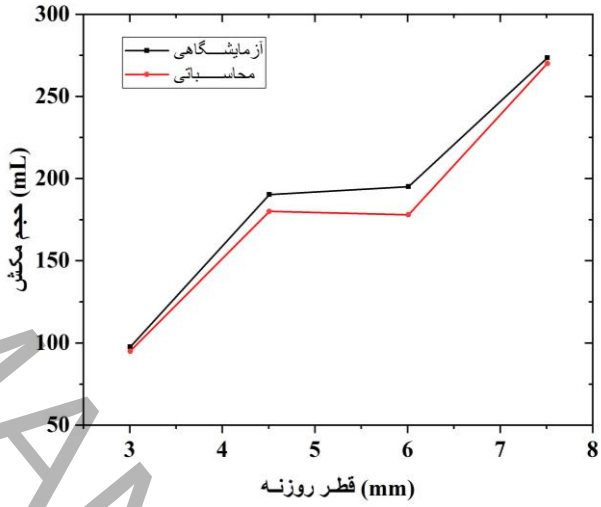
(ب): سرعت اولیه سیال ۰/۵۱ متر بر ثانیه.



(الف): سرعت اولیه سیال ۰/۶۴ متر بر ثانیه.



(د): سرعت اولیه سیال ۰/۲۵ متر بر ثانیه.

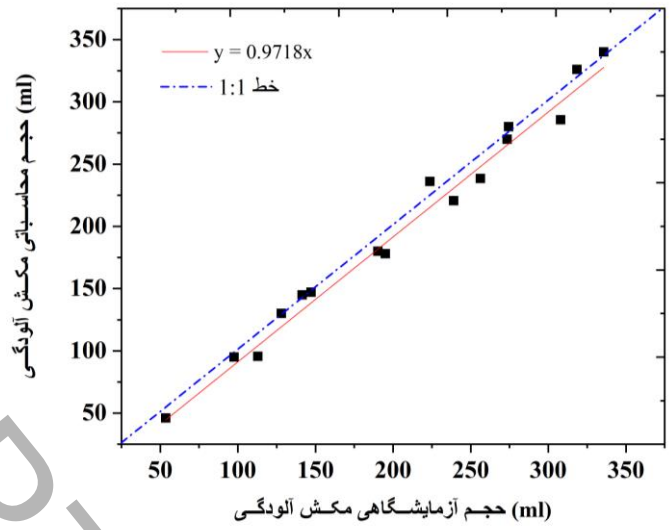


(ج): سرعت اولیه سیال ۰/۳۸ متر بر ثانیه.

شکل (۶): مقایسه حجم مکش برای سرعت اولیه مختلف و قطرهای مختلف روزنه نشت.

شاخص خطای ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) در حالت الف: ۴/۴٪، در حالت ب: ۵/۷٪ در حالت ج: ۱/۵۷٪ در حالت د: ۸/۵۵٪ اندازه‌گیری شد که به طور متوسط برابر با ۴/۹۵٪ در کلیه حالات بود و نشان‌دهنده دقت بالای محاسبات است. شکل ۷ توزیع نقاط نتایج آزمایشگاهی گزارش شده توسط یو و همکاران را با حجم‌های مکش آلودگی محاسبه شده با استفاده از روش مشخصه‌ها، مقایسه می‌کند. گستردگی نتایج در امتداد خط ۴۵ درجه، همراه با ضریب همبستگی (R^2 = ۰/۹۷۱۸) نشان‌دهنده همبستگی قوی بین حجم‌های آلودگی مکیده شده آزمایشگاهی و مقادیر محاسبه شده است.

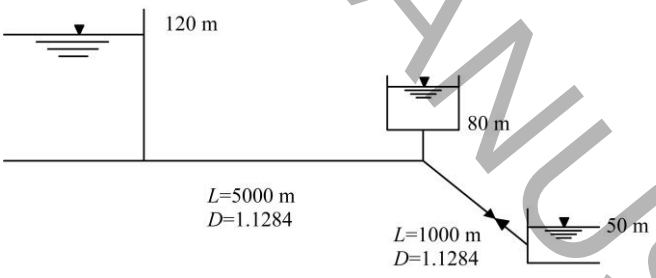
ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۷: مقایسه حجم مکش آلودگی از نتایج آزمایشگاهی و مقادیر محاسبه شده توسط حل کننده اولری.

۲-۳- مقایسه نتایج انتقال آلودگی با مدل عددی فرناندز و کارنی

برای محاسبه انتقال آلاینده‌ها و پیش‌بینی احتمال خروج مجدد آنها از نشت، دقت مدل انتقال آلاینده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از حل‌کننده لاگرانژی رویدادمحور[1](EDM) را با نتایج به‌دست‌آمده از مدل اولری توسعه بازه مدلسازی[2] (EPS) ارائه شده توسط فرناندز و کارنی که تغییر غلظت اطراف یک مخزن تعدیل تحت شرایط ضربه‌قوچ را نشان می‌دهد، مقایسه شد. شکل ۸ سیستم لوله‌کشی مدل فرناندز و کارنی را نشان می‌دهد. جریان در این سیستم به‌طور کامل آشفته است و سیستم با پارامترهای زیر مشخص می‌شود. ارتفاع معادل فشار آب در مخزن بالادست و پایین دست به ترتیب ۱۲۰ و ۵۰ متر و E_S =۰/۳۵۸$m^{2.5}/s$ (پارامتر اندازه شیر). مخزن تعدیل کوچک بوده، مساحت سطح مقطع ۲/۵ مترمربع، طول اولیه ستون آب ۴ متر و ارتفاع مخزن از سطح تراز ۸۰ متر است. جریان گذرا از طریق مکانیسم باز و بسته شدن شیر پایین دست ایجاد می‌شود.



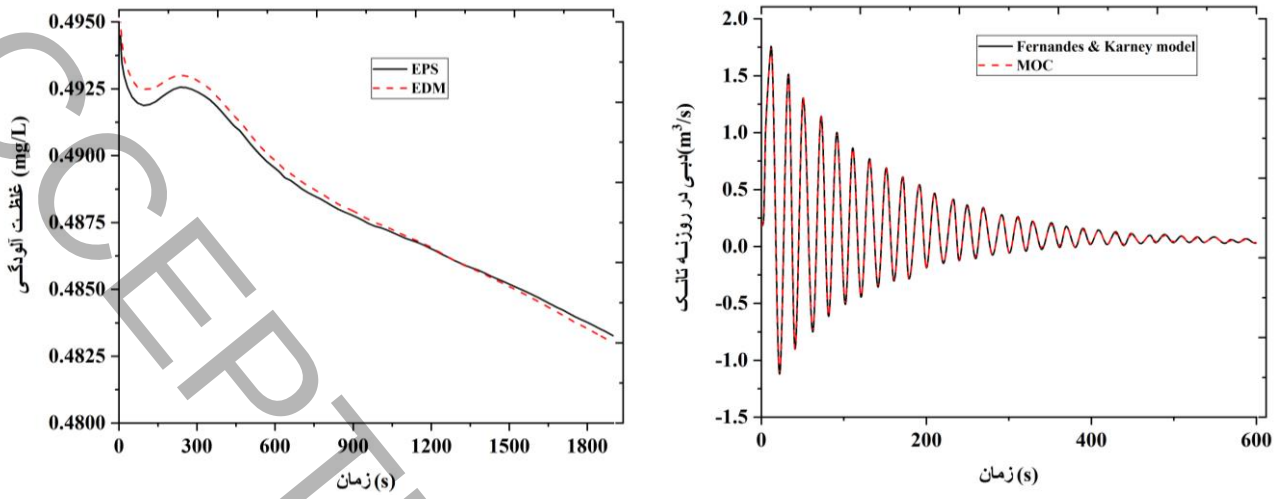
شکل ۸: شماتیک مدل آزمایشگاهی فرناندز و کارنی.

شکل ۹ (الف) نوسانات جریان گذرا در روزنه مخزن تعدیل را ناشی از بسته شدن شیر و تغییر جریان پایدار از ۲/۵ به ۰/۵ مترمکعب بر ثانیه طی زمان ۲۰ ثانیه نشان می‌دهد. مخزن دارای غلظت اولیه‌ای برابر با ۲ میلی‌گرم بر لیتر از آلاینده تجزیه‌ناپذیر است و سیستم در ابتدا بدون آلودگی است ($\phi(x,t_0)=0$ میلی‌گرم بر لیتر). نوسانات جریان گذرا در مخزن تعدیل برای حدود ۲۰۰ ثانیه قابل توجه است و بعد از ۳۰۰ ثانیه تقریبا میرا می‌گردد. در این حالت تغییرات ارتفاع آب معادل فشار در بازه ۸۴ تا ۱۱۴ متر قرار دارد. نوسان جریان‌های ورودی و خروجی مخزن از ۱- تا ۱/۶ مترمکعب بر ثانیه متغیر هستند. در این شرایط شکل ۹ (ب) تغییرات غلظت ماده آلاینده در مخزن پایین دست را نشان می‌دهد که در حین جریان گذرا به سیستم نفوذ کرده است و به مخزن پایین‌دست رسیده

[1] Event-Driven Method
[2] Extended Period Simulation

ACCEPTED MANUSCRIPT

است. گامهای زمانی مدلسازی هیدرولیکی و کیفیت آب در روش EPS به ترتیب ۰/۰۱ و ۰/۱ ثانیه است. گامهای زمانی مدلسازی هیدرولیکی در روش MOC به ترتیب ۰/۰۱ و گام مکانی در روش EDM برای رسیدن به دقت مطلوب ۰/۰۰۱ ثانیه است.



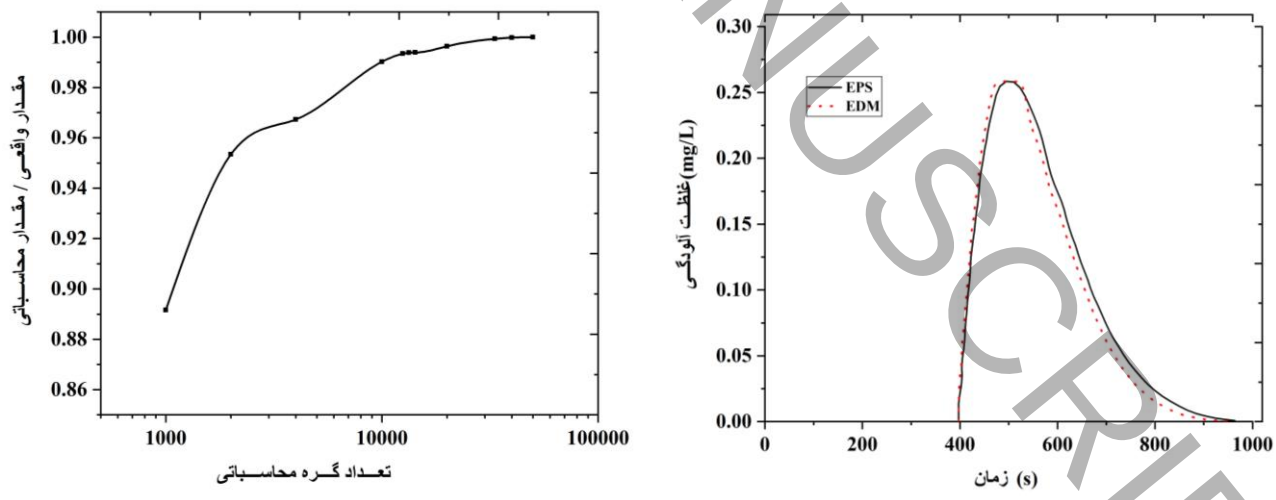
(ب) (الف)

شکل ۹: (الف) دبی در محل مخزن تعدیل، (ب): تغییرات غلظت در مخزن پایین‌دست.

تحلیل خطای نتایج ارائه شده در شکل ۹ (ب) حاکی از آن است که شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) مدل انتقال آلودگی لاگرانژی EDM عدد ۵/۵٪ را در مقایسه با نتایج روش EPS نشان می‌دهد، که این امر دقت قابل قبول نتایج انتقال آلودگی توسط این پژوهش را تایید می‌کند.

۳-۳- آنالیز استقلال از شبکه

شکل ۱۰ (الف) تغییرات غلظت در محل شیر بر اثر باز شدن شیر و تغییر جریان در مدت ۲۰ ثانیه از صفر به ۲/۵ مترمکعب بر ثانیه را در پژوهش فرناندز و کارنی نشان می‌دهد. مخزن دارای غلظت اولیه‌ای برابر با ۲ میلی‌گرم بر لیتر از آلاینده تجزیه ناپذیر است و سیستم در ابتدا بدون آلودگی است ($\phi(x,t_0)=0$ میلی‌گرم بر لیتر).



(ب) (الف)

شکل ۱۰: (الف) تغییر غلظت در نزدیکی شیر، (ب) آنالیز استقلال از شبکه برای پارامتر *RCM*.

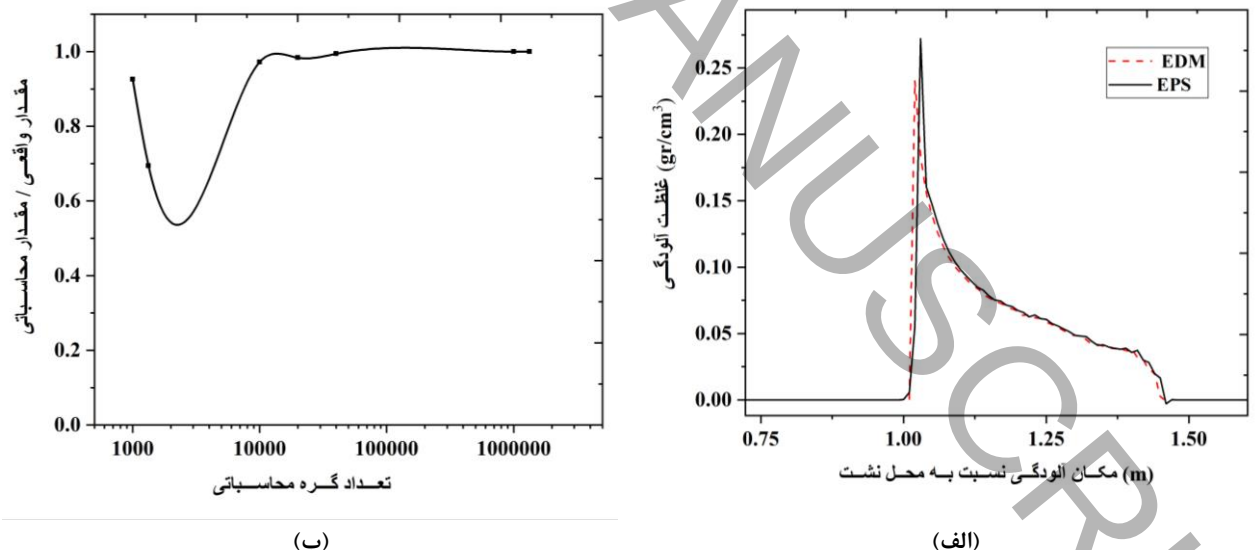
در نتیجه‌ی عملکرد شیر تغییرات نوسان سطح آب از ۱۲۰ متر به ۸۶/۷ متر در حدود ۴۰۰ ثانیه رخ می‌دهد. بر اثر این جریان گذرا پروفیل زمانی آلودگی با حداکثر غلظت ۰/۲۵ میلی‌گرم بر لیتر در محل شیر اندازه‌گیری شد. تحلیل خطای نتایج ارائه شده در شکل

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱۰ (الف)، ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) مدل انتقال آلودگی لاگرانژی EDM در مقایسه با نتایج روش EPS عدد ۳/۷۵٪ را نشان می‌دهد.

جهت ارزیابی عملکرد مدل عددی انتقال آلودگی در شرایط گذرا صرفا به نتایج فرناندز و کارنی اکتفا نشد، و با فرض یک مقدار اولیه برای غلظت آلودگی و شرایط هیدرولیکی جریان در (شکل ۵)، انتشار آلودگی در مدل آزمایشگاهی یو و همکاران نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۱۱ (الف) پروفیل مکانی غلظت آلودگی در نزدیکی روزنه دستگاه مکش یو و همکاران در زمان ۱/۵ ثانیه را نشان می دهد. در این شرایط بیشینه ارتفاع معادل فشار منفی (مطابق شکل ۵) در بازه زمانی ۰/۹۴ تا ۱/۱ ثانیه به ۷/۴- متر می‌رسد. دستگاه مکش دارای غلظت اولیه‌ای برابر با ۱ میلی‌گرم بر لیتر از آلاینده تجزیه ناپذیر فرض شده است و سیستم در ابتدا بدون آلودگی است ($\phi(x,t_0)=0$). محل نشت به‌عنوان مبدا مختصات در نظرگرفته شده است. در روش لاگرانژی EDM شبکه‌بندی مکانی (dx) ۰/۰۰۰۱ متر و شبکه‌بندی زمانی (dt) ۰/۰۰۰۷ ثانیه بود، لذا جهت حل بهینه صرفا محدوده‌ای که در طول زمان پیشانی آلودگی به آن می‌رسید، شبکه‌بندی شد. نحوه انتشار آلودگی با روش EPS و EDM اندازه‌گیری شده و در نمودار شکل ۱۱ الف نمایش داده شده است. خطای ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) حلگر انتقال آلودگی لاگرانژی EDM در مقایسه با نتایج روش EPS عدد قابل قبول ۳/۵۶٪ را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ (الف) نشان می‌دهد روش لاگرانژی EDM به طور کلی دقت عددی قابل قبولی را ارائه می‌دهند و به طور مؤثری پیشانی تیز نمودار انتقال آلودگی را بدون اثر پخشیدگی، حفظ می‌کند.

چنان که پیشتر ذکر شد پارامتر *(TMCP)* مستقیما توسط روش شبه تحلیلی مشخصه‌ها و با دقت بالا محاسبه می‌شود، در مقابل پارامتر*(RCM)* جرم آلودگی باقیمانده را با استفاده از معادلات انتقال ناشی از جریان گذرا در انتهای زمان مدلسازی نشان می‌دهد، لذا با توجه به فرض عدم واکنش‌پذیری آلاینده همگرایی دو پارامتر *(TMCP)* و *(RCM)* جهت آنالیز استقلال از شبکه مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل ۱۰ و ۱۱ (ب) جهت بررسی پایداری حل روش EDM در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ (الف)، با تغییر شبکه‌بندی مکانی میزان همگرایی پارامترهای*(TMCP)* و پارامتر*(RCM)* مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو آزمون با افزایش تعداد گره‌های محاسباتی($n>$ ۱۰۰۰۰) مقدار محاسبه‌شده‌ی *RCM* به مقدار دقیق*TMCP* همگرا شده است که نشان از پایداری و همگرایی مدل عددی ارائه شده است.



شکل ۱۱: (الف) پروفیل غلظت آلودگی در لحظه ۱/۵ ثانیه، (ب) آنالیز استقلال از شبکه برای پارامتر *RCM*.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۴- بحث و نتایج در مورد مطالعاتی

تحقیقات قبلی در زمینه مکش آلاینده‌ها عمدتاً به بررسی جریان گذرا پس از بسته شدن شیر بالادست متمرکز بودند، استقرار شیر در بالادست و استفاده از روش حجمی سبب شد هیچکدام از این پژوهش‌ها اثر بازگشت مجدد آلودگی را در مدل‌های آزمایشگاهی مشاهده نکنند. این درحالیست که مدل ارائه شده توسط فرناندز و کارنی با باز و بسته کردن شیر در پایین دست رفتار آلودگی در اطراف نشت را به‌صورت ورود و سپس خروج مجدد گزارش کردند. مطالعه حاضر در تلاش است تا درک پدیده‌ی مکش آلاینده را با تمرکز بر بسته شدن شیر پایین‌دست به عنوان محرک اصلی جریان گذرا، ارتقا دهد و پدیده بازگشت مجدد آلودگی از محل نشت را در قالب یک مدل عددی در نرم‌افزار متلب اندازه‌گیری نماید. هدف پژوهش، توسعه یک مدل عددی کارآمد و جامع برای مدلسازی مکش ناگهانی به‌منظور افزایش دانش مهندسی از این پدیده پیچیده است.

۴-۱- مشخصات مدلسازی خط انتقال با نشت

شکل ساده شده کلیه مدل‌های عددی و آزمایشگاه در مطالعات گذشته، جهت بررسی پدیده مکش ناگهانی آلودگی به‌صورت مخزن-لوله- شیر همراه با نشت می‌باشد که شماتیک ساده شده آن در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، اختلاف فشار نسبی در محل نشت حین استقرار جریان ماندگار سبب تخلیه آب از سیستم می‌شود. این شرایط رشد میکروبها و مواد عفونت زا را در محل نشت تسهیل می‌کند و اجازه می‌دهد مواد شیمیایی خطرناک در خاک از طریق انحلال، حین وقوع نوسانات فشار منفی ضربه‌قوچ وارد لوله شوند. امواج فشار منفی می‌توانند آلاینده‌های مجاور را از طریق نشت‌ها به داخل لوله بکشند. امواج مثبت بعدی ممکن است بخشی از آلودگی وارد شده را مجدد به خارج از محل نشت منتقل کنند. در شکل ۱۲، Z_{res} ارتفاع مخزن، Q_U و Q_D دبی‌های بالادست و پایین‌دست لوله، Z_{valve} ارتفاع شیر از تراز و h_{valve} ارتفاع معادل فشار آب شیر است. این تحقیق با انجام یک تحلیل حساسیت جامع شامل ۳۶ سناریو و بیش از ۹۰۰ آزمایش مختلف، بر درک خروج مجدد آلاینده‌ها از نقاط نشت تمرکز دارد. جزئیات خاص این ۳۶ سناریو در جدول (۲) قابل مشاهده است.

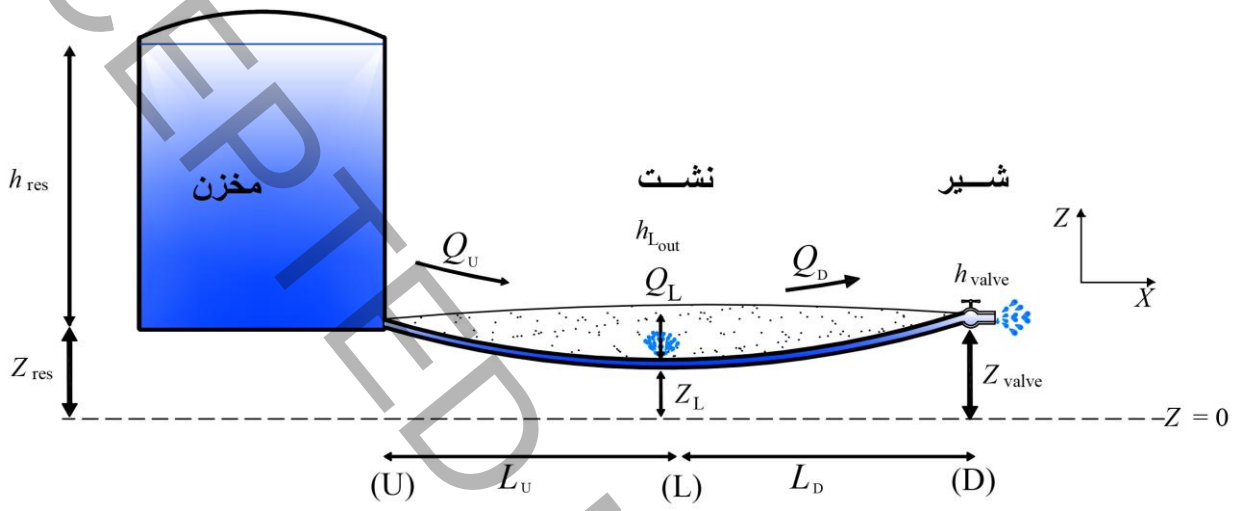
جدول ۲: مشخصات خطوط انتقال و مخزن.

	مشخصات مشترک	تست ۲	تست ۱	
۱	Z_{res} (m)	۶۰۰	۵۰/۶	D (mm)
۱	Z_{valve} (m)	۲۳۰۰	۲۸۰	L (m)
۱	$h_{L,out}$ (m)	۴۰	۱۴	h_{valve} (m)
۰/۰۲	κ	۰/۶۶ -۰/۵ -۰/۳۳	۰/۶۶ -۰/۵ -۰/۳۳	x_l/L
۰/۶۷	C_d	۰/۰۰۱ -۰/۰۱	۰/۰۰۸ -۰/۰۲	δ
۰	Z_L (m)	۱/۲۱ -۱/۰۸-۱/۰۲	۱/۷۸-۱/۳۵-۱/۰۶	θ
۱۰۰۰	a_{steel} (m/s)	۴۸/۵ -۴۳/۵ -۴۰/۸	۲۵-۱۹-۱۴/۹۵	h_{res} (m)
۱۰۰	ϕ_0 (mg/L)	۱/۵ -۱ -۰/۵	۱/۵ -۱ -۰/۵	u_0 (m/s)

با توجه به احتمال وقوع پدیده مکش آلودگی در خطوط انتقال بین شهری و شبکه توزیع شهری، وجود تفاوت در ابعاد و مشخصات هندسی لوله‌ها و درک بهتر پدیده مکش ناگهانی آلودگی در شرایط مختلف، در این مطالعه دو سیستم انتقال با ابعاد مختلف، جهت بررسی رفتار سیستم‌های انتقال آب درون شهری و برون شهری حین وقوع ضربه‌قوچ مورد بررسی قرار گرفته است. برای آزمایش یک، که نمایانگر سیستم انتقال درون شهری است، پارامترها به‌صورت زیر تنظیم شدند: L = ۲۸۰ متر، D = ۵۰/۶ میلی‌متر و h_{valve} = ۱۴ متر، در مقابل، آزمایش دو سیستم‌های انتقال آب برون شهری را با پارامترهای: L =۲۳۰۰ متر، D = ۶۰۰ میلی‌متر و h_{valve} = ۴۰ متر شبیه‌سازی کرد. این تحقیق شامل مجموع ۳۶ سناریو با تغییر سیستماتیک سه عامل کلیدی بود: موقعیت نسبی نشت (x_l/L): نشت‌ها

ACCEPTED MANUSCRIPT

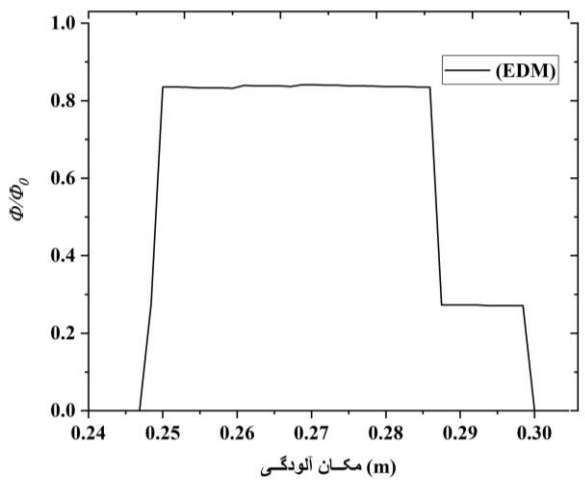
در نقطه میانی و در یک سوم ابتدا و انتهای لوله قرار داده شدند. ابعاد نسبی نشت ($\delta = A_l / A$) که به‌صورت مساحت نشت به مساحت سطح مقطع لوله تعریف می‌شود (برای لوله‌های شهری: ۰/۰۲ = δ و ۰/۰۰۸ = δ، برای لوله‌های بین شهری: ۰/۰۱ = δ و ۰/۰۰۱ = δ). ارتفاع معادل فشار آب نسبی ($\theta = h_{res} / h_{valve}$) در طول لوله، که متناظر با سرعت آب درون خطوط برابر با ۰/۵ -۱ - ۱/۵ متر بر ثانیه می باشد. ابعاد و پارامترهای این سناریوهای مختلف با سعی و خطا به گونه‌ای انتخاب شدند که علاوه بر انطباق با واقعیت، مستعد وقوع پدیده ضربه‌قوچ و مکش ناگهانی آلودگی باشند. در بخش ۴-۲ و ۴-۳، برای درک بهتر سناریوها، نمودار شرایط هیدرولیکی و انتشار آلودگی در حالت‌های خاص خطوط انتقال درون و برون شهری نمایش داده می‌شود تا زمینه برای تحلیل حساسیت و بحث در خصوص پدیده مکش آلودگی در ادامه مهیا شود.



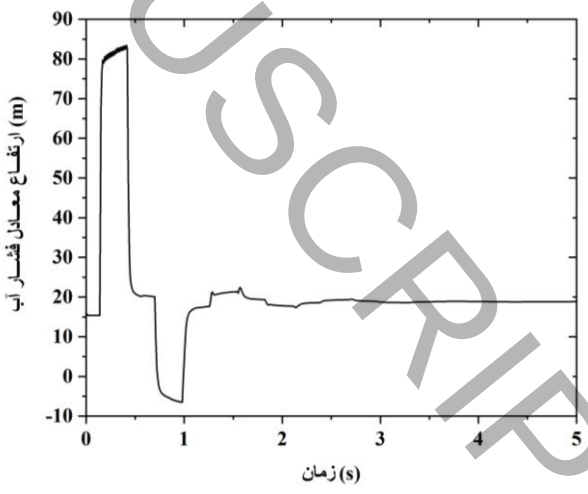
شکل ۱۲: شماتیک سیستم مخزن-لوله-شیر با نشت.

۴-۲- مدل خط انتقال درون شهری

شکل ۱۳ (الف) تغییرات ارتفاع معادل فشار آب در محل نشت را در طول آزمایش یک نمایش می‌دهد. در این شکل سرعت سیال یک متر بر ثانیه، مکان نشت در وسط لوله و ابعاد نسبی نشت $\delta = 0.02$ می‌باشد. سری زمانی ارتفاع معادل فشار آب در محل نشت، نشان دهنده میرایی کامل موج فشاری ضربه‌قوچ پس از دو ثانیه است. با گذشت زمان، حداکثر ارتفاع معادل فشار آب منفی به ۸/۷- متر می‌رسد و همزمان مکش آلاینده‌ها به داخل لوله رخ می‌دهد.



(ب)



(الف)

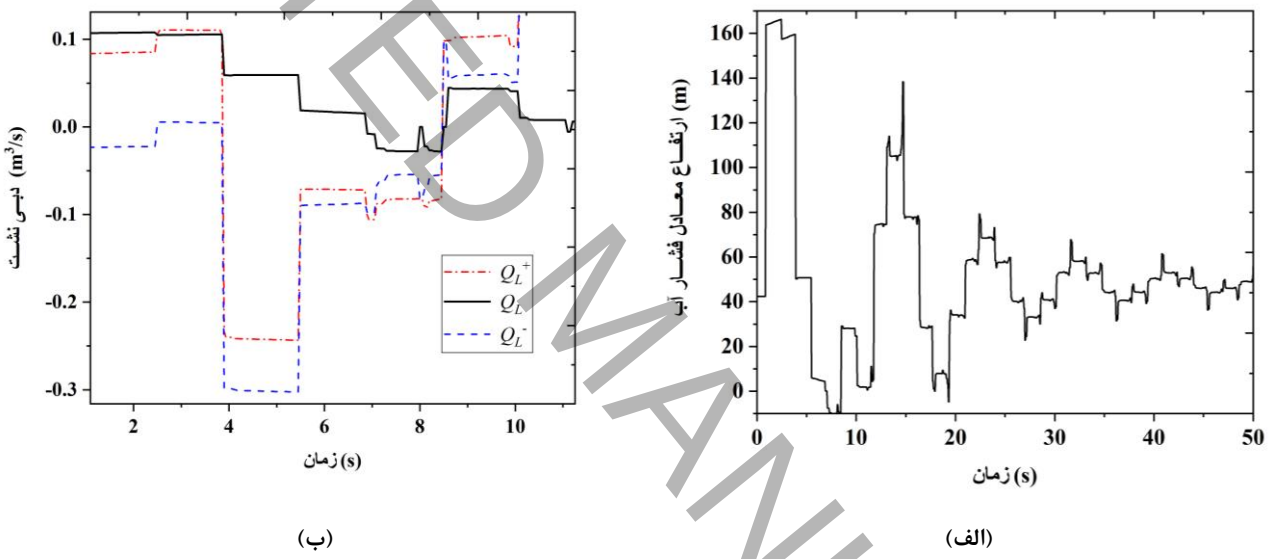
ACCEPTED MANUSCRIPT

شکل ۱۳: (الف) سری زمانی ارتفاع معادل فشار آب و (ب) انتقال آلودگی اطراف محل نشت. تست یک، $t = ۵$ $(u_0 = 1\ \mathrm{m/s}\ ,\ x_l/L = 0.5,\ \delta = 0.02)$.

شکل ۱۳ (ب) نشان می‌دهند که در طول یک چرخه مکش (بین $t = ۰/۷۲$ ثانیه و $t = ۰/۸۹$ ثانیه)، فشار در محل نشت منفی می‌شود، بسته‌ای از آلاینده با حداکثر غلظت ۰/۸۱ وارد لوله می‌شود و در طول زمان مدلسازی به سمت پایین دست محل نشت حرکت می‌کند. در انتهای زمان مدلسازی و میرایی موج فشاری، پیشانی آلودگی به فاصله ۳۰ سانتیمتری از محل نشت رسیده است. شکل ۱۳ (ب) نتایج عددی حاصل از روش‌لاگرانژی (EDM) را برای غلظت آلاینده‌ها در $t = ۵$ با استفاده از گام زمانی ۰/۰۰۲ ثانیه و گام مکانی ۰/۰۰۰۲ نمایش می‌دهد. محل نشت به عنوان محور مختصات در نظر گرفته‌شده است.

۳-۴- مدل خط انتقال برون شهری

شکل ۱۴ (الف) نوسانات ارتفاع معادل فشار آب محل نشت را در آزمایش (۲) نشان می‌دهد. در این شکل سرعت سیال یک و نیم متر بر ثانیه، مکان نشت در یک سوم انتهایی لوله و ابعاد نسبی نشت $\delta = 0.01$ می‌باشد. اثر بارز محل نشت بر افت نوسانات ارتفاع معادل فشار آب در اولین نوسان نمودار ۱۴ (الف) مشهود است که به دلیل ابعاد قابل توجه نشت می‌باشد. پس از ۵۰ ثانیه نوسانات فشاری میرا می‌شوند.



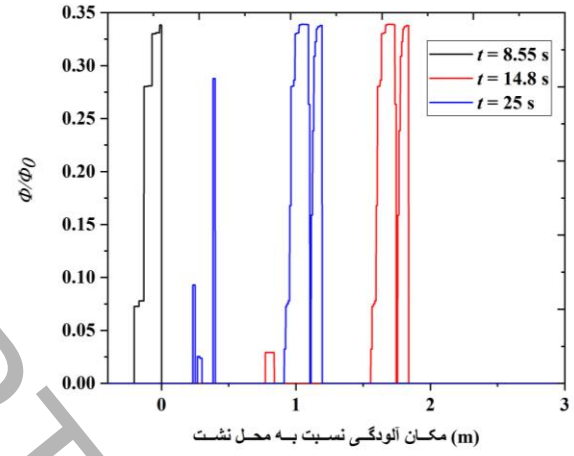
(الف) (ب)

شکل ۱۴: (الف) سری زمانی ارتفاع معادل فشار آب در محل نشت، (ب)سری زمانی دبی در محل نشت، تست دو $(u_0 = 1.5\ \mathrm{m/s}\ ,\ x_l/L = 0.66,\ \delta = 0.01)$.

نکته مهم این است که فشار در محل نشت در پنج نوبت جداگانه به محدوده‌ی منفی رسیده که منجر به ورود پنج بسته آلودگی مجزا به سیستم لوله شده، پدیده‌ای که در شکل ۱۵ (خط آبی رنگ) به وضوح مشهود است. شکل ۱۴ (ب) نوسانات دبی اطراف نشت را حین مکش آلودگی نشان می‌دهد. بین زمان ۶/۹۵ تا ۸/۵۵ ثانیه، مکش آلاینده رخ داد و دبی هم در بالادست و هم در پایین‌دست محل نشت منفی شد. در نتیجه، آلودگی در این بازه زمانی به بالادست نشت منتقل شود، البته با غلظتی کمتر از ϕ_0 به دلیل اختلاط در محل نشت. شکل ۱۵ نتایج عددی حاصل از روش‌لاگرانژی را برای حرکت آلودگی در اطراف نشت در زمان‌های ۸/۵۵- ۱۴/۸- ۲۵ ثانیه، با استفاده از گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه و گام مکانی ۰/۰۰۱ نمایش می‌دهد. محل نشت به عنوان محور مختصات در نظر گرفته‌شده است. از $t = ۳/۸۵$ ثانیه تا $t = ۸/۵۵$ ثانیه، دبی بالادست در محل نشت منفی بود، بنابراین آلاینده از نشت وارد شد و پیشانی آلودگی تا ۳۳/۶ سانتی‌متر بسمت بالادست محل نشت حرکت کرد. در دوره بعدی از $t = ۸/۵۵$ ثانیه تا $t = ۱۴/۸۵$ ثانیه، موج فشار ناشی از

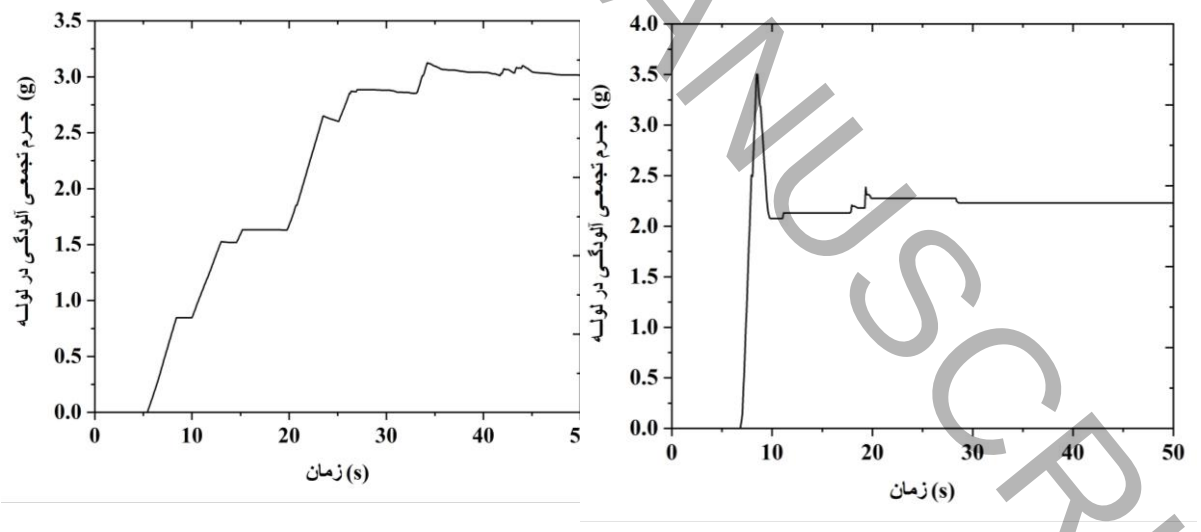
ACCEPTED MANUSCRIPT

ضربه‌قوچ به محل نشت رسید و دبی پایین‌دست مثبت شد، و پیشانی آلودگی ۱۸۳ سانتیمتر به سمت پایین دست حرکت کرد. در بازه زمانی (۱۴/۸۵ ثانیه تا ۱۶/۸ ثانیه)، دبی پایین‌دست نشت دوباره منفی شد و باعث شد که آلودگی مجدد به سمت محل نشت برگردد.



شکل ۱۵: تشکیل و انتقال بسته آلاینده در اطراف نشت، تست دو ($u_0 = 1.5$ m/s , x_l/L=0.66, $\delta = 0.01$).

شکل‌های ۱۶ (الف) و (ب)، جرم تجمعی آلودگی در انتهای زمان مدلسازی را برای ابعاد مختلف نشت در آزمایش دو در حالتی که سرعت یک و نیم متر بر ثانیه و نشت در یک سوم انتهایی لوله قرار دارد، بررسی می‌کند. میرایی امواج فشاری ضربه‌قوچ برای نشت با ابعاد بزرگتر سریعتر اتفاق می‌افتد. همانطور که در شکل ۱۶ (الف) نشان داده شده است، زمانی که نشت ابعاد بزرگتری دارد، موج فشاری تنها پس از یک چرخه مکش منفی به طور کامل میرا می‌شود. برعکس، همانطور که در شکل ۱۶ (ب) نشان داده شده است، به دلیل ابعاد کوچکتر نشت، تا زمان میرایی موج فشاری، پنج چرخه مکش منفی رخ داده است. در نمودارهای جرم تجمعی، جهش‌های رو به بالا نشان‌دهنده مکش آلاینده به درون لوله است، در حالی که افت‌های رو به پایین نشان‌دهنده پدیده‌های خروج مجدد آلودگی هستند.



(ب) (الف)

شکل ۱۶: نمودار تجمعی جرم آلودگی، تست ۲، ($u_0 = 1.5$ m/s , x_l/L=0.66) **الف،** $\delta = 0.01$ **ب،** $\delta = 0.001$.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۴-۴- آنالیز حساسیت

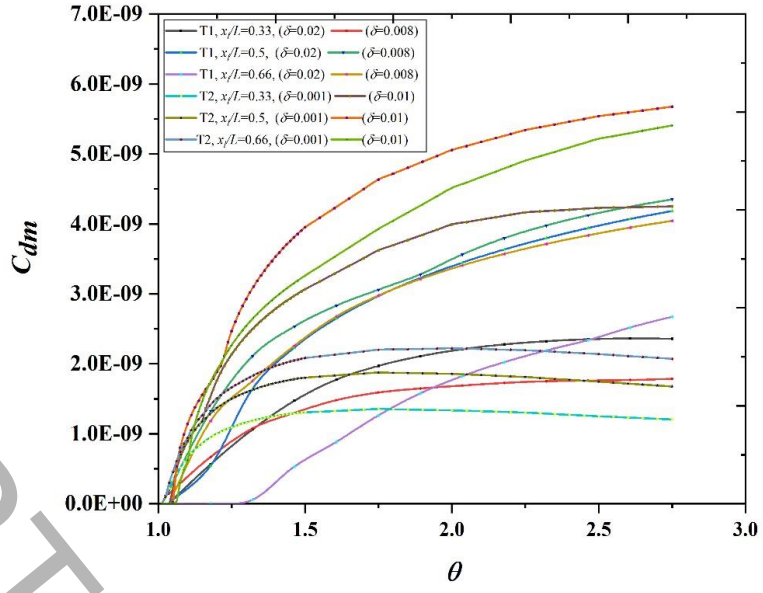
شدت مکش آلودگی به پارامترهای متعددی نظیر سرعت سیال، سرعت موج، ارتفاع معادل فشار استاتیک (هد فشاری) در مخزن و شیر، طول لوله، مکان نشت، قطر نشت، قطر لوله، ضریب زبری و ضریب روزنه وابسته است. برخی از این پارامترها رابطه مستقیم و متقابلی با یکدیگر دارند. به‌عنوان مثال، ارتفاع معادل فشار استاتیک در مخزن و شیر، ضریب زبری و سرعت سیال به‌طور مستقیم و متناظر با هم بر بزرگی فشار منفی ایجادشده توسط ضربه‌قوچ تأثیر می‌گذارند. این پارامترها برای محاسبه حالت ماندگار جریان ضروری هستند و به‌عنوان شرایط اولیه معادله ضربه‌قوچ عمل می‌کنند. کاهش ضریب زبری منجر به افزایش سرعت سیال درون لوله می‌شود. این افزایش سرعت سیال متعاقباً باعث افزایش بزرگی موج فشار منفی در محل نشت شده و مکش آلاینده‌ها به درون لوله را تشدید می کند. برخی پارامترهای وابسته مانند ضریب زبری را می‌توان از تحلیل حساسیت حذف کرد و اثرات آن‌ها را به‌صورت متغیرهای مستقل نمایش داد. ضریب روزنه و قطر نشت هر دو بر میرایی موج فشار منفی ضربه‌قوچ تأثیرگذارند. همچنین، محل نشت و طول لوله بر ماندگاری موج فشار منفی در محل نشت اثر می‌گذارند. سرعت موج ضربه‌قوچ نیز هم بر ماندگاری فشار منفی و هم بر بزرگی فشار منفی ضربه‌قوچ (مطابق با رابطه ژوکوفسکی[1]) تأثیر دارد، لذا برای بهبود تفسیر نتایج، سرعت موج در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر با مقدار آن در لوله‌های الاستیک فرض شده است.

با حذف پارامترهای وابسته سه پارامتر بی‌بعد مکان نسبی نشت (x_l/L)، ابعاد نسبی نشت (δ) و ارتفاع آب معادل فشار استاتیک نسبی (h/h_{valve}) جهت بررسی نحوه تغییرات حجم مکش آلودگی مورد بررسی قرار گرفت. عددی بی‌بعد ($C_{dm}=TMCP/M_{wp}$) جهت بررسی تغییرات جرم نسبی آلاینده وارد شده به لوله تعریف شد که در آن M_{wp} نشان‌دهنده جرم کل آب درون خط لوله است.

برای تحلیل نحوه تأثیرگذاری پارامترهای ورودی مختلف بر حجم آلاینده واردشده به لوله، بیش از ۹۰۰ آزمایش شبیه‌سازی برای سنجش مکش آلودگی انجام شد. شکل ۱۷ تغییرات (C_{dm}) را براساس ارتفاع معادل فشار استاتیک نسبی θ (هد فشاری نسبی) در ۱۲ حالت مختلف نشان می‌دهد. نمودارهای دو آزمون نشان می‌دهند که تا نسبت θ برابر با ۱/۵ حجم آلودگی واردشده به لوله به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. زمانی که این نسبت در بازه ۱/۵ تا ۲ قرار می‌گیرد، حساسیت کاهش می‌یابد. در نسبت‌های بالاتر از $\theta >$ ۲ اکثر نمودارها به یک مجانب افقی نزدیک می‌شوند که نشان‌دهنده ثابت ماندن حجم آلودگی واردشده به لوله است. این پدیده عمدتاً تحت تأثیر غالب شدن فشار مخزن بالادست در شبکه لوله است. اگرچه افزایش فشار مخزن موجب افزایش سرعت جریان سیال و تشدید شدت موج فشار منفی ضربه‌قوچ می‌شود، اما فشار مثبت مخزن در نهایت بر موج فشار منفی ضربه‌قوچ غلبه می‌کند. در نتیجه، حجم مکش آلودگی علیرغم افزایش فشار نسبی، ثابت باقی می‌ماند.

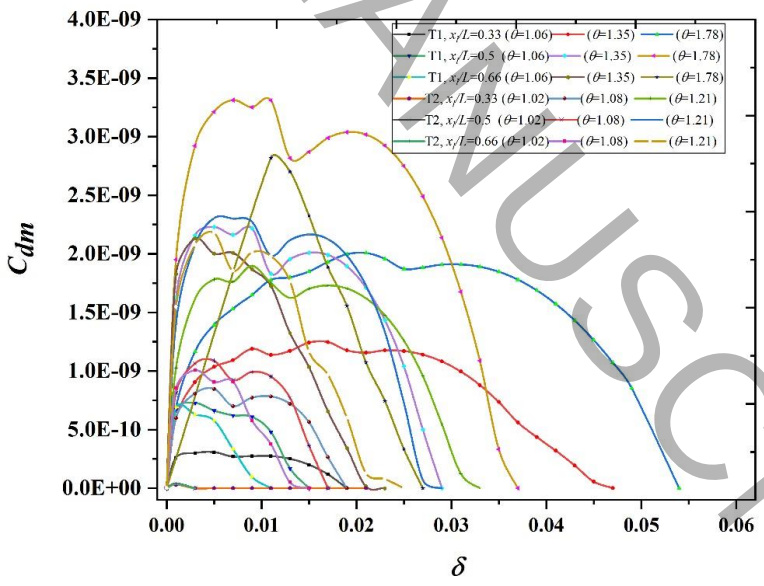
[1] Joukowsky Equation

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱۷: آنالیز حساسیت جرم نسبی آلودگی مکش شده به هد فشار نسبی درون لوله.

شکل ۱۸ تغییرات جرم نسبی مکش آلودگی (C_{dm}) را به‌عنوان تابعی از ابعاد نسبی نشت (δ) نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌ها تحت ۱۸ سناریوی مختلف انجام شد که شامل سه مکان نشت متمایز و سه ارتفاع معادل فشار آب نسبی، برای آزمون ۱ و آزمون ۲ بود. همه نمودارها یک بیشینه نسبی را در تمامی حالات نشان می‌دهد. این پدیده بدین دلیل رخ می‌دهد که با نزدیک شدن ابعاد نشت به صفر، مقدار آلودگی واردشده به لوله کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، هنگامی که اندازه نشت از آستانه مشخصی فراتر رود، به‌عنوان میراکننده امواج فشاری عمل کرده و از ایجاد امواج فشار منفی و مکش آلودگی جلوگیری می‌کند. در ۶۳ درصد از اندازه‌گیری‌ها، بیشترین سطح آلودگی واردشده به لوله در $۰/۰۱ < \delta < ۰/۰۲$ مشاهده شد.



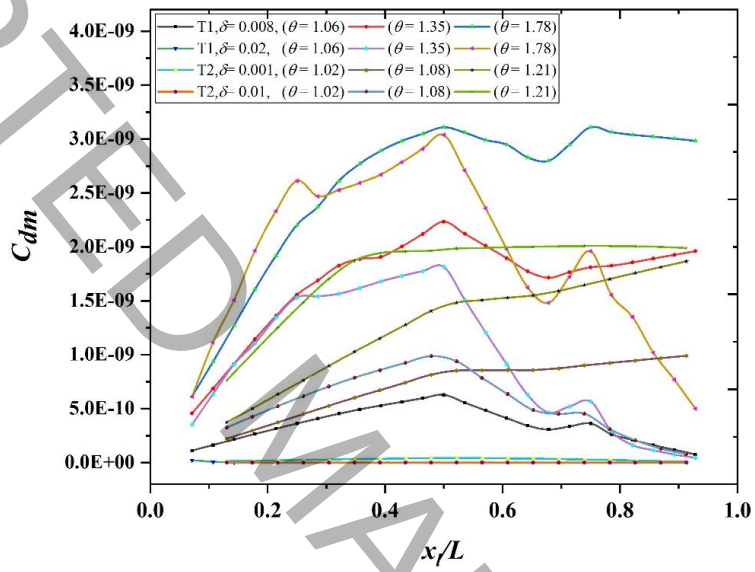
شکل ۱۸: آنالیز حساسیت جرم نسبی آلودگی مکش شده به مساحت نسبی نشت.

شکل ۱۹ تغییرات جرم نسبی آلاینده (C_{dm}) را به‌عنوان تابعی از مکان نسبی نشت (x_l/L) نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌ها در ۱۲ سناریوی مختلف انجام شده است که شامل دو اندازه نسبی نشت و سه فشار نسبی درون لوله برای آزمون ۱ و آزمون ۲ است. نمودارها در تمامی حالات یک بیشینه نسبی را نشان می‌دهد. در بازه مکان نسبی نشت $۰ < x_l / L < ۰/۴$، نمودارها عمدتاً روند افزایشی دارند،

ACCEPTED MANUSCRIPT

در حالی که در بازه ۰/۶ $< x_l / L <$ ۱، عمدتاً روند کاهشی مشاهده می‌شود. بیشینه نسبی عمدتاً بین مکان‌های ۰/۴ $< x_l / L <$ ۰/۶، رخ داد که نشان می‌دهد نشت‌هایی که در میانه لوله قرار دارند، به طور قابل توجهی مکش آلودگی را افزایش داده‌اند.

دینامیک مشاهده شده مکش آلودگی ناشی از ماهیت موجی ضربه‌قوچ است. تغییر حجم مکش آلودگی تحت اثر دو مکانیسم متفاوت است. در مدل ارائه شده در این پژوهش، مدت زمان ماندگاری فشار منفی در محل نشت با نزدیک شدن نشت به شیر افزایش می‌یابد. از طرف دیگر بزرگی موج فشاری ضربه‌قوچ با نزدیک شدن نشت به شیر، به دلیل اتلاف انرژی ناشی از زبری در طول لوله و افت سرعت سیال، کاهش می‌یابد. این سازوکار دوگانه باعث ایجاد بیشینه مکش آلودگی در موقعیت‌های میانی لوله می‌شود، جایی که مدت زمان کافی ماندگاری فشار منفی با بزرگی موج فشاری منفی، شرایط را برای مکش آلودگی تسهیل می‌کند. برخی نمودارها در شکل ۱۹ در بازه مکان نسبی ۰/۷ تا ۰/۸ اکسترمم نسبی نشان می‌دهند. این رخداد به آغاز مکش بسته دوم آلودگی در این موارد خاص مربوط می‌شود.



شکل ۱۹ : آنالیز حساسیت جرم نسبی آلودگی مکش شده به مکان نسبی نشت.

نتایج شکل ۱۷،۱۸و ۱۹ وجود الگوهای ثابتی را در بین آزمایش‌ها نشان می‌دهند که پراکندگی ناچیز ناشی از عدم قطعیت‌ها را نشان داده و صحت مدلسازی عددی و یافته‌ها را تأیید می‌کنند. ارزیابی حساسیت جرم نسبی آلاینده واردشده به سیستم انجام شد. ارزیابی حساسیت با مقایسه شیب‌های نمودار پارامترهای ورودی نرمالسازی شده در مقابل پارامترهای خروجی صورت گرفت. این تحلیل نشان داد که میانگین درصد تغییر در شیب جرم نسبی آلاینده بیشترین تأثیر را از ارتفاع معادل فشار نسبی با مقدار شیب ۱/۴۳ پذیرفته است. قطر نسبی نشتی با شیب ۰/۹۷- تأثیر منفی بر جرم مکش آلودگی داشته، در حالی که موقعیت نسبی نشت کمترین اثر معکوس را با شیب ۰/۲۵- نشان داده است. این یافته‌ها حاکی از آن است که در طول آزمایش‌ها، ارتفاع معادل فشار آب بیشترین اثر را بر دینامیک مکش آلودگی آلاینده‌ها داشته، پس از آن قطر نشت و سپس موقعیت نشت به‌عنوان عوامل تأثیرگذار بر بزرگی مکش آلودگی عمل کرده‌اند.

۵-۴- خروج مجدد آلودگی

همانگونه که قبلا بحث شد محاسبه پارامتر *TMCP* مستقیما و به سرعت توسط معادلات هیدرولیک جریان و نشت امکانپذیر است لذا به دلیل تعداد تست بالا در بخش آنالیز حساسیت ازین پارامتر جهت تحلیل نتایج استفاده گردید، لیکن محاسبه پارامتر *RCM*، نیازمند حل معادلات انتقال با شبکه‌بندی ریز و هزینه محاسباتی بالاست، لذا در بخش بررسی خروج مجدد آلودگی به ۳۶ حالت متمایز و فراگیر اکتفا شد. مقدار آلودگی که پس از یک جریان گذرا در داخل خط لوله به دام می‌افتد، عاملی حیاتی است که تأثیرات قابل

ACCEPTED MANUSCRIPT

توجهی بر سلامت عمومی جامعه دارد. دراغلب تحقیقات قبلی اثر خروج مجدد آلودگی نادیده گرفته شده است. این مسئله سؤال مهمی را مطرح می‌کند: آیا جرم آلودگی خارج‌شده قابل‌توجه است یا همان‌طور که جونز و همکاران (۲۰۱۹) پیشنهاد کرده‌اند، می‌توان آن را ناچیز تلقی کرد؟ برای بررسی جامع مسئله ورود و خروج مجدد آلودگی تحلیلی دقیق در ۳۶ سناریوی متمایز شامل سه سرعت مختلف سیال، سه مکان نسبی نشت و دو ابعاد نسبی نشت برای خطوط انتقال درون و برون شهری انجام شد. خروجی این سناریوها به‌طور کامل در جدول (۳) نمایش داده شده‌اند.

جرم آلودگی باقی‌مانده و نسبت خروج مجدد آلودگی[1]، با استفاده از سناریوهای خاصی که برای ارزیابی خروج مجدد آلودگی طراحی شده بودند، محاسبه شد. برای هر δ و x_l/L خاص، مقادیر متوسط R_{ex} و طول پیشروی بسته آلودگی در بالادست نشت، در سه سرعت سیال تعیین و به‌عنوان پارامترهای خلاصه شده R_{ex} *average* و LCP_U average گردآوری شدند. طول پیشروی بسته آلودگی در بالادست و پایین دست محل نشت به ترتیب با استفاده از روابط (۳۲) و (۳۳) قابل محاسبه است:

$$LCP_U = \frac{\Delta t}{A}\sum_{n=1}^{N} Q_L^+(t_n) \quad (۳۲)$$

$$LCP_D = \frac{\Delta t}{A}\sum_{n=1}^{N} Q_L^-(t_n) \quad (۳۳)$$

که $Q_L^+(t_n)$ و $Q_L^-(t_n)$ به ترتیب دبی بالا دست و پایین دست محل نشت، می‌باشد.

جدول ۳: مقادیر محاسبه شده مکش ناگهانی آلودگی برای تست یک و دو.

تست دو.						تست یک.					
LCP_D (cm)	LCP_U (cm)	R_{ex} %	RCM (g)	$TMCP$ (g)	δ	x_l/L	u_0 (m/s)	δ	$TMCP$ (gr)	RCM (gr)	R_{ex} %	LCP_U (cm)	LCP_D (cm)
۱۳۵/۹	۰	۲/۵	۰/۴۶	۰/۴۷	۰/۰۰۱	۰/۳۳	۰/۵	۰/۰۰۸	۱/۶۳	۱/۶۱	۱/۷	۰	۱۶/۵
۲۷۸/۵	۵/۲۵	۸/۸	۴/۰۵	۴/۴۴	۰/۰۰۱	۰/۳۳	۱	۰/۰۰۸	۶/۴۴	۵/۹۴	۷/۷	۳/۳	۳۵/۳۴
۳۹۷/۷	۴/۸	۱/۴	۶/۵۵	۶/۸۲	۰/۰۰۱	۰/۳۳	۱/۵	۰/۰۰۸	۹/۱۳	۸/۶۱	۵/۶	۴/۶۲	۵۲/۱۸
۱۰۷/۱	۰	۶/۴	۰/۶۳	۰/۶۷	۰/۰۰۱	۰/۵	۰/۵	۰/۰۰۸	۴/۲۶	۴/۱۵	۲/۶	۰	۶/۴۲
۲۱۸/۵	۱۷/۷	۸/۴	۵/۵۴	۶/۴۷	۰/۰۰۱	۰/۵	۱	۰/۰۰۸	۱۲/۸۳	۱۱/۹۸	۶/۶	۰/۸۴	۱۶
۳۱۲/۵	۱۳/۴۴	۷	۸/۷	۹/۳۵	۰/۰۰۱	۰/۵	۱/۵	۰/۰۰۸	۱۸/۰۸	۱۶/۵۸	۸/۳	۱/۴	۲۵/۲۴
۷۱	۴/۰۱	۱۹/۱	۰/۴۷	۰/۵۸	۰/۰۰۱	۰/۶۶	۰/۵	۰/۰۰۸	۲/۸۸	۱/۳۶	۵۲/۸	۰/۹۶	۲/۴۶
۱۴۴/۹	۲۶/۵	۱۰/۸	۵/۷	۶/۴	۰/۰۰۱	۰/۶۶	۱	۰/۰۰۸	۱۱/۰۱	۴/۰۸	۶۲/۹	۴/۶۷	۵/۹
۲۰۷/۶	۲۹/۳	۱۸/۲	۸/۴۵	۱۰/۳۳	۰/۰۰۱	۰/۶۶	۱/۵	۰/۰۰۸	۱۸/۳۷	۵/۸۷	۶۸	۶/۸۵	۸/۸۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰/۳۳	۰/۵	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰	۰
۱۸۳/۲	۰	۱/۹	۴/۴۶	۴/۵۵	۰/۰۱	۰/۳۳	۱	۰/۰۲	۵/۴۴	۴/۹۴	۹/۸	۱/۳۸	۲۶/۸۸

[1] re-extrusion ratio

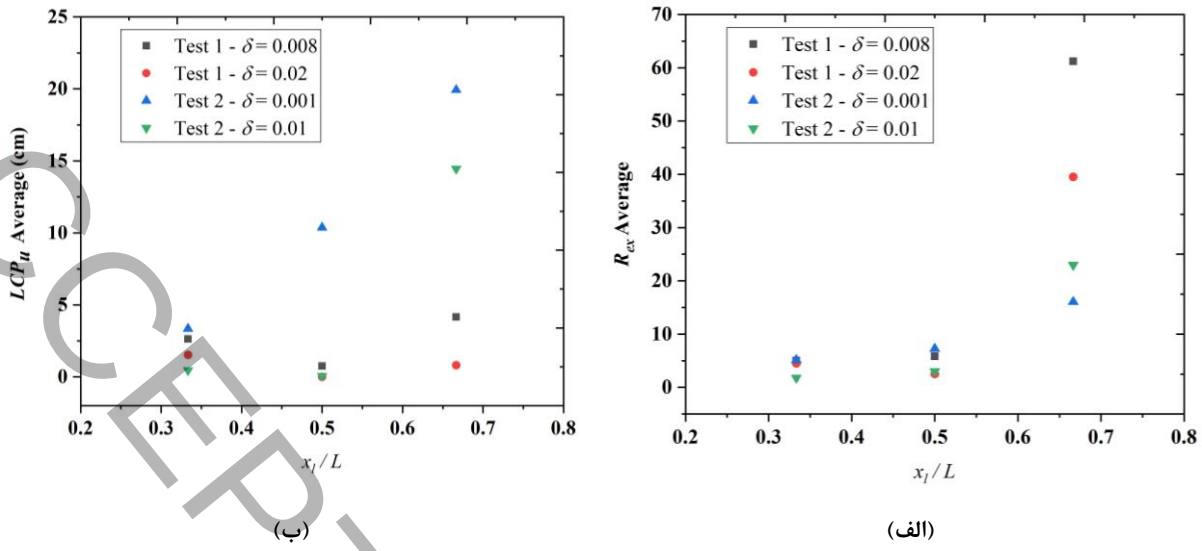
ACCEPTED MANUSCRIPT

۲۹۳/۲	۱/۴	۳/۵	۱۰/۲۷	۱۰/۶۴		۰/۳۳	۱/۵		۱۱/۳	۱۰/۸۹	۳/۷	۳/۲	۴۵/۳۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰/۵	۰/۵	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰	۰
۱۲۳/۶	۰	۳/۹	۵/۷۳	۵/۹۶	۰/۰۱	۰/۵	۱	۰/۰۲	۱۰/۰۲	۹/۹۳	۲/۸	۰	۷/۲۸
۲۰۸	۰/۲	۵/۴	۱۱/۵۹	۱۲/۲۵	۰/۰۱	۰/۵	۱/۵	۰/۰۲	۱۷/۱	۱۶/۳۲	۴/۵	۰	۱۳/۳۶
۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰/۶۶	۰/۵	۰/۰۲	۰	۰	۰	۰	۰
۸۵	۹/۸	۳۶/۷	۲	۳/۱۶		۰/۶۶	۱		۱/۶۸	۰/۷۵	۵۵/۴	۰/۳۱	۳/۳۳
۱۸۳/۶	۳۳/۶	۳۳/۲	۸/۶۸	۱۳		۰/۶۶	۱/۵		۸/۶۳	۳/۲	۶۳	۲/۱۳	۵/۵۹

تحلیل کمی نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که در ۷۵ درصد آزمایش‌ها، مقدار متوسط R_{ex} به‌طور مداوم زیر ۸ درصد باقی می‌ماند، در حالی که ۲۵ درصد باقی‌مانده سطوح R_{ex} به‌مراتب بالاتری با میانگین ۳۵ درصد را نشان دادند. حداکثر مقادیر R_{ex} در آزمایش ۱ به ۶۸ درصد رسید، در حالی که در آزمایش ۲ به ۳۶ درصد محدود شد. این امر نشان‌دهنده پاسخ غیرخطی سیستم به شرایط گذرای هیدرولیکی است. پدیده خروج مجدد معمولاً تنها بخش کوچکی از کل جرم آلودگی ورودی را در بر می‌گیرد که ممکن است توضیح دهد چرا فاکس و همکاران (۲۰۱۶) این اثر را در آزمایش‌های خود مشاهده نکردند. مطالعه آن‌ها به دلیل محدودیت‌های تکنیک‌های اندازه‌گیری، به‌ویژه روش حجمی استفاده‌شده، ممکن است نتوانسته باشد رویدادهای خروج مجدد آلودگی را به‌طور مؤثر ثبت کند. این مطالعه نشان می‌دهد که وقتی نشت در ابتدا یا وسط لوله قرار دارد، جرم کل بسته آلودگی *(TMCP)* و جرم آلودگی باقی‌مانده *(RCM)* عملکرد مشابهی در ارزیابی مکش ناگهانی آلودگی نشان می‌دهند. اما برای نشتی‌های نزدیک به شیر ($x_l / L = 0.66$)، خروج مجدد قابل‌توجه آلودگی رخ می‌دهد، به‌طوری که مقادیر متوسط خروج مجدد از ۳۴ درصد فراتر رفته و تا ۶۸ درصد می‌رسد. این نشان می‌دهد که نشت‌های نزدیک به شیر پایین دست، بیشتر آلودگی را به محیط خارج از لوله منتقل می‌کنند. پدیده خروج مجدد آلودگی تحت تأثیر بزرگی و مدت‌زمان ماندگاری فشار مثبت در محل نشت و همچنین تعداد چرخه‌های مکش قرار دارد. نشتی‌های نزدیک به شیر پایین‌دست به دلیل زمان بیشتر لازم برای رفت و برگشت موج فشاری، مدت‌زمان طولانی‌تری در معرض امواج فشاری قرار می‌گیرند. استقرار امواج فشاری منفی در محل نشت، نیروهای مکشی ایجاد می‌کنند که آلودگی را به سمت بالادست محل نشت می‌کشند، استقرار امواج فشار مثبت، انتقال آلودگی به بیرون را تقویت می‌کنند. علاوه بر این، نشت‌های نزدیک‌تر به مخزن سرعت جریان بالاتری و متعاقبا بزرگی موج فشاری بالاتر را به دلیل کاهش اثر اصطکاک ایجاد می‌کنند. این اثرات ترکیبی باعث نرخ بالاتر خروج مجدد آلودگی برای نشتی‌های نزدیک به شیر پایین دست و نرخ بیشتر مکش آلودگی در بخش‌های میانی لوله می‌شود. این یافته‌ها، نیاز به اتخاذ استراتژی‌های هدفمند برای کاهش خطرات مرتبط با جریان‌های گذرا و بازتاب امواج، به‌ویژه در اطراف شیرها، کمک می‌کند. با درک این فرآیندها، شرکت‌های آب و فاضلاب می‌توانند شیوه‌های مدیریتی قوی‌تری را برای حفاظت از کیفیت آب و سلامت عمومی جامعه بکار گیرند.

شکل ۲۰ (الف) میانگین نسبت بازگشت مجدد آلودگی را به عنوان تابعی از محل نشت نشان می‌دهد که از نتایج آزمایش‌های ۱ و ۲ به دست آمده است. نشت‌های نزدیک به شیر پایین دست، بالاترین نرخ میانگین بازگشت مجدد آلاینده را نشان می‌دهند. شکل ۲۰ (ب) با بررسی Average LCP_U نسبت به محل نشت، نکته مهمی در مورد پدیده بازگشت مجدد آلودگی ارائه می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد که نشت‌های نزدیک به شیر پایین دست، بیشترین پیشروی آلاینده‌ها را به بالادست محل نشت نشان می‌دهند. مقایسه شکل‌های ۲۰ (الف و ب) نشان‌دهنده رابطه معناداری بین پیشرفت آلاینده‌ها به سمت بالادست و مقدار آلودگی بازگشتی است. با پیشروی آلاینده‌ها به سمت بالادست نشت، افزایش قابل توجهی در بازگشت مجدد آلودگی مشاهده می‌شود، که این امر با فیزیک مسئله سازگار است.

ACCEPTED MANUSCRIPT



(ب) (الف)

شکل ۲۰: (الف) تأثیر محل نشت بر میانگین نسبت خروج مجدد آلودگی، (ب) تأثیر محل نشت بر میانگین پیشروی آلودگی در بالادست محل نشت (*LCPU* Average).

هنگامی که امواج فشاری میرا می‌شوند، جریان در پایین‌دست نشت متوقف می‌شود و این امر اجازه می‌دهد تا آلاینده‌های پایین دست درون لوله تجمع یابند و پس از باز شدن شیر به سمت مصرف‌کنندگان پیش‌روند. جریان آلوده بالادست به دلیل اختلاف فشار بین مخزن و محیط پیرامون نشت ادامه می‌یابد و بخشی از آب آلوده بالادست از طریق نشت‌ها به بیرون رانده می‌شود که سبب رشد نسبت بازگشت مجدد آلودگی می‌شود. توزیع آلودگی در سیستم‌های آب به طور قابل توجهی تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی مانند محل نشت و شیر قرار دارد. یافته‌ها نشان می‌دهد که چگونه ساختارهای آزمایشی مختلف می‌توانند منجر به نتایج متفاوتی در مورد بازگشت آلودگی شوند. درک این فرآیندها برای ارزیابی خطرات مرتبط با بهداشت عمومی و ایمنی سیستم‌های توزیع آب ضروری است.

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه با کمّی‌سازی سیستماتیک خروج مجدد آلاینده شناخت جامعی را در مورد پدیده مکش ناگهانی آلودگی بر اثر جریان گذرا، از طریق تحلیل حساسیت ۳۶ سناریوی متمایز ارائه می‌دهد. در این تحقیق، شبیه‌سازی مکش آلاینده‌ها با ترکیب دو روش اولری و لاگرانژی انجام شد. برای شبیه‌سازی هیدرولیک جریان از روش اولری و برای انتقال آلودگی از روش لاگرانژی استفاده گردید. مقایسه نتایج محاسباتی حجم مکش آلودگی با داده‌های آزمایشگاهی نشان‌دهنده شاخص خطای (nRMSE= ۴/۹۵ ٪) است که صحت مدلسازی هیدرولیکی و نشت را تایید می‌کند. انتشار آلودگی در شرایط گذرا با استفاده از روش لاگرانژی مدلسازی شد و نتایج دقت بالای آن را با بیشینه خطای (nRMSE=۵/۵ ٪) نشان می‌دهد.

یافته‌های اصلی این پژوهش به شرح زیر است:

- پیکربندی خطوط انتقال (موقعیت نسبی مکان شیر، پمپ و نشت ها) تاثیر قابل توجهی بر رفتار مکش ناگهانی و خروج مجدد آلودگی دارد.
- خروج مجدد آلودگی در ۷۵٪ از آزمایشها بخش کوچکی (تقریبا هشت درصد) از کل آلودگی ورودی بود، لیکن مقدار آن در شرایط خاص (یک سوم انتهایی لوله) چشمگیر است و باید در طراحی‌ها و مدیریت شبکه لحاظ گردد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

- نتایج تحلیل حساسیت: نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که فشار نسبی در طول لوله مؤثرترین عامل در مکش آلاینده است و به‌طور میانگین موجب تغییر ۱/۴۳٪ در شیب جرم نسبی آلاینده می‌شود. قطر نشت اثر منفی ثانویه‌ای با شیب ۰/۹۷- درصد و مکان نشت کمترین تأثیر منفی برابر با شیب ۰/۲۵- درصد را نشان داد.
- تأثیر مکان نشت: نشت‌های واقع در بخش میانی لوله بیشترین اثربخشی را در مکش و به دام اندازی آلاینده‌ها دارند. در مقابل، نشت‌های نزدیک به شیر پایین‌دست می‌توانند تا حدود ۶۸٪ از آلاینده‌ها را مجدداً خارج کنند که اهمیت مکان نشت در رفتار آلاینده را نشان می‌دهد.
- دینامیک خروج مجدد: یک همبستگی قوی بین خروج مجدد بیشترآلاینده‌ها و افزایش پیشروی آلاینده‌ها در جهت بالادست برا نشت‌های نزدیک به شیر پایین‌دست وجود دارد که متناسب با پیکربندی مدل فیزیکی می‌باشد.

این یافته‌ها نشان می‌دهد گرچه اثر خروج مجدد آلودگی در شرایط خاص قابل توجه است، لیکن می‌توان در جهت اطمینان بیشتر از آن صرفنظر نمود. صرفنظر از اثر خروج مجدد آلودگی، از یک سو هزینه‌های محاسبات را می‌کاهد و از سوی دیگر با بالا بردن ریسک مکش آلودگی درجه اهمیت تدابیر راهبردی برای ایمنی شبکه توزیع را می افزاید. مدل توسعه‌یافته در این پژوهش- با اندکی اصلاح - توانایی شبیه‌سازی مکش آلاینده‌ها در شبکه‌های پیچیده توزیع آب را دارد و مسیر امیدوارکننده‌ای برای تحقیقات آینده فراهم می سازد.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان صمیمانه از حمایت های دانشگاه صنعتی شاهرود قدردانی می کنند.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی							
a	سرعت موج فشاری، m/s	$h_{L,out}$	ارتفاع معادل فشار آب خارج از لوله در محل نشت، m	Q	دبی، m^3/s	$TVCP$	کل حجم آلاینده ورودی، m^3
A	مساحت مقطع جریان سیال، m^2	$h_{L,in}$	ارتفاع معادل فشار آبی داخل لوله در محل نشت، m	Q_D	دبی پایین‌دست لوله، m^3/s	u	سرعت سیال، m^2/s
A_l	مساحت مقطع نشت، m	H_{res}	ارتفاع معادل فشار آب مخزن، m	Q_L	دبی نشت، m^3/s	u_0	سرعت اولیه سیال داخل لوله، m^2/s
C^*	ضریب کاهش برش واردی	h_{valve}	ارتفاع معادل فشار آب شیر، m	Q_L^+	دبی بالادست محل نشت، m^3/s	V_{vc}	حجم حباب کاویتاسیون، m^3
CCP	غلظت بسته آلودگی، mg/L	J	اثر اصطکاک	Q_L^-	دبی پایین‌دست محل نشت، m^3/s	VCP	حجم بسته آلودگی،m^3
C_d	ضریب روزنه	J_s	اصطکاک نیمه‌ماندگار	Q_{in}	دبی ورودی به حباب کاویتاسیون، m^3/s	x	امتداد لوله، m
d	قطر روزنه نشت، m	J_u	اصطکاک غیرماندگار	Q_{out}	دبی خروجی از حباب کاویتاسیون، m^3/s	x_l	مکان نشت، m
D	قطر لوله، m	L	طول لوله، m	Q_U	دبی بالادست لوله، m^3/s	Z_L	ارتفاع نقطه نشت از سطح تراز، m
g	شتاب گرانشی،m/s^2	LCP_D	طول پیشروی بسته آلودگی در پایین دست محل نشت، cm	RCM	جرم آلودگی به دام افتاده، gr	$Zres$	ارتفاع مخزن از سطح تراز، m
H	ارتفاع معادل فشار آب، m	LCP_U	طول پیشروی بسته آلودگی در بالادست محل نشت، cm	R_{ex}	نسبت خروج مجدد آلاینده‌ها	Z_{valve}	ارتفاع شیر از تراز،m
H_a	ارتفاع معادل فشار آب آتمسفر، m	M	تعداد گام زمانی مربوط به جریان گذرا	t	زمان، s	K_a	نرخ واکنش (تجزیه یا جذب)

ACCEPTED MANUSCRIPT

H_L	ارتفاع معادل فشار آب در نقطه نشت، m	N	تعداد گام‌های زمانی مکش آلودگی	$TMCP$	کل جرم آلاینده ورودی، m^3	D_d	ضریب پخش	
علائم یونانی								
α	جهت دبی بالادست	θ	ارتفاع معادل فشار آب نسبی	$\emptyset_0$	غلظت آلاینده خارج از محل نشت، mg/L			
β	جهت دبی پایین دست	η	ضریب تصحیح روزنه	$\emptyset_U$	غلظت آلاینده در بالادست نقطه نشت، mg/L			
γ	جهت دبی نشت	κ	ضریب اصطکاک نیمه‌ماندگار	$\emptyset_D$	غلظت آلاینده در پایین‌دست نقطه نشت، mg/L			
δ	ابعاد نسبی نشت	ϕ	غلظت آلاینده، mg/L					
Δt	گام زمانی مدل هیدرولیکی، s	$\emptyset_{Ex}$	غلظت آلاینده در محل نشت، mg/L					
زیرنویس								
D	پایین‌دست محل نشت							
U	بالادست محل نشت							
0	حالت اولیه							
بالانویس								
$+$	گره بالادست							
$-$	گره پایین دست							

منابع و مراجع

[1] V. Kanakoudis, S. Tsitsifli, Potable water security assessment−A review on monitoring, modelling and optimization techniques, applied to water distribution networks, Desalin. Water Treat, 99 (2017) 18-26.

[2] M.-C. Besner, M. Prévost, S. Regli, Assessing the public health risk of microbial intrusion events in distribution systems: Conceptual model, available data, and challenges, Water research, 45(3) (2011) 961-979.

[3] R.W. Gullick, M.W. LeChevallier, J. Case, D.J. Wood, J.E. Funk, M.J. Friedman, Application of pressure monitoring and modelling to detect and minimize low pressure events in distribution systems, Journal of Water Supply: Research and Technology−AQUA, 54(2) (2005) 65-81.

[4] M.R. Karim, M. Abbaszadegan, M. LeChevallier, Potential for pathogen intrusion during pressure transients, Journal-American Water Works Association, 95(5) (2003) 134-146.

[5] Y.T. Yu TingChao, J.H. Jin HanFeng, Z.T. Zhang TuQiao, S.Y. Shao Yu, W.X. Wu Xiao, Experimental observation on factors affecting intrusion volumes during low or negative pressure events, (2016).

[6] T.R. Lindley, S.G. Buchberger, Assessing intrusion susceptibility in distribution systems, Journal-American Water Works Association, 94(6) (2002) 66-79.

[7] S. Fox, W. Shepherd, R. Collins, J. Boxall, Experimental quantification of contaminant ingress into a buried leaking pipe during transient events, Journal of Hydraulic Engineering, 142(1) (2016) 04015036.

[8] K.A. Chavarria, C.I. Gonzalez, A. Goodridge, K. Saltonstall, K.L.J.E.S.W.R. Nelson, Technology, Bacterial communities in a neotropical full-scale drinking water system including intermittent piped water supply, from sources to taps, 9(11) (2023) 3019-3035.

[9] M.d.S.P. Agostinho, C.V.S.J.R. Fernandes, Understanding the discoloration risk as consequence of hydraulic transients, 29 (2024) e15.

[10] D. Starczewska, R. Collins, J. Boxall, Occurrence of transients in water distribution networks, Procedia Engineering, 119 (2015) 1473-1482.

[11] E.Z. Berglund, J.E. Pesantez, A. Rasekh, M.E. Shafiee, L. Sela, T. Haxton, Review of modeling methodologies for managing water distribution security, Journal of water resources planning and management, 146(8) (2020) 03120001.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[12] G. Ebacher, M.-C. Besner, B. Clément, M. Prévost, Sensitivity analysis of some critical factors affecting simulated intrusion volumes during a low pressure transient event in a full-scale water distribution system, Water Research, 46(13) (2012) 4017-4030.
[13] M. Odhiambo, V. Viñas, E. Sokolova, T.J. Pettersson, Health risks due to intrusion into the drinking water distribution network: hydraulic modelling and quantitative microbial risk assessment, Environmental Science: Water Research & Technology, 9(6) (2023) 1701-1716.
[14] G.R. Boyd, H. Wang, M.D. Britton, D.C. Howie, D.J. Wood, J.E. Funk, M.J. Friedman, Intrusion within a simulated water distribution system due to hydraulic transients. I: Description of test rig and chemical tracer method, Journal of Environmental Engineering, 130(7) (2004) 774-777.
[15] G.R. Boyd, H. Wang, M.D. Britton, D.C. Howie, D.J. Wood, J.E. Funk, M.J. Friedman, Intrusion within a simulated water distribution system due to hydraulic transients. II: Volumetric method and comparison of results, Journal of environmental engineering, 130(7) (2004) 778-783.
[16] S. Meniconi, A. Rubin, L. Tirello, A. Doro, B. Brunone, C.J.W.R.R. Capponi, Mapping pressure surge source in urban water networks: Integrating low-and high-Frequency pressure data with an illustrative real case study, 60(8) (2024) e2023WR036773.
[17] C. Fernandes, B. Karney, Modelling the advection equation under water hammer conditions, Urban Water Journal, 1(2) (2004) 97-112.
[18] J.d.J. Mora Rodríguez, P.A. López Jiménez, H.M. Ramos, Intrusion problematic during water supply systems' operation, International journal of energy and environment, 2(3) (2011) 391-400.
[19] S.M.R. Fumani, Contaminant intrusion in water distribution systems: advanced modelling approaches, University of British Columbia, 2013.
[20] Y. Yang, T. Zhang, D.Z. Zhu, Influence of porous media on intrusion rate into water distribution pipes, Journal of Water Supply: Research and Technology−AQUA, 63(1) (2014) 43-50.
[21] C.M. Fontanazza, V. Notaro, V. Puleo, P. Nicolosi, G. Freni, Contaminant intrusion through leaks in water distribution system: experimental analysis, Procedia engineering, 119 (2015) 426-433.
[22] S. Jones, W. Shepherd, R. Collins, J. Boxall, Experimental quantification of intrusion volumes due to transients in drinking water distribution systems, Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 10(1) (2019) 04018026.
[23] Y. Shao, S. Chu, C. Dang, T. Yu, Effects of leakage points on intrusion volume in a simulated water distribution system, Water Supply, 20(1) (2020) 251-258.
[24] M. Mahmoud, A. Farahat, M.A. Hamouda, M. Al-Zahrani, M.N. Sharif, R. Sadiq, Experimental investigations and CFD modeling of contaminant intrusion in a water network during transient events, Water, 11(7) (2019) 1425.
[25] A. Keramat, M. Payesteh, B. Brunone, S. Meniconi, Interdependence of flow and pipe characteristics in transient induced contamination intrusion: numerical analysis, Journal of Hydroinformatics, 22(3) (2020) 473-490.
[26] M. Luo, A. Khayyer, P. Lin, Particle methods in ocean and coastal engineering, Applied Ocean Research, 114 (2021) 102734.
[27] H.M. Sam Ani, A. Khayatzadeh, Transient flow in pipe networks, Journal of Hydraulic Research, 40(5) (2002) 637-644.
[28] B. Brunone, B.W. Karney, M. Mecarelli, M. Ferrante, Velocity profiles and unsteady pipe friction in transient flow, Journal of water resources planning and management, 126(4) (2000) 236-244.
[29] J.P. Vítkovský, A. Bergant, A.R. Simpson, M.F. Lambert, Systematic evaluation of one-dimensional unsteady friction models in simple pipelines, Journal of Hydraulic Engineering, 132(7) (2006) 696-708.
[30] A. Ghodhbani, M. Akrout, E.H. Taieb, Coupled approach and calculation of the discrete vapour cavity model, Journal of Fluids and Structures, 91 (2019) 102691.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[31] A.R. Mosameem, J.E. Van Zyl, Experimental Investigation of Leakage Flow Behavior in Pipes Subjected to Negative Pressures, Journal of Hydraulic Engineering, 151(1) (2025) 04024054.
[32] Q. Zhang, Z. Tian, S. Lu, H. Kang, Numerical simulation of water hammer in pipeline system using efficient wave tracking method, Water Resources Management, 37(8) (2023) 3053-3068.
[33] A. Bergant, A. Tijsseling, J. Vítkovský, D. Covas, A. Simpson, M. Lambert, Further investigation of parameters affecting water hammer wave attenuation, shape and timing. Part 1: Mathematical tools, (2003).
[34] D. Jaynes, A. Rogowski, Applicability of Fick's law to gas diffusion, Soil Science Society of America Journal, 47(3) (1983) 425-430.
[35] L.A. Rossman, P.F. Boulos, Numerical methods for modeling water quality in distribution systems: A comparison, Journal of Water Resources planning and management, 122(2) (1996) 137-146.
[36] A.S. Al-Omari, M.H. Chaudhry, Unsteady-state inverse chlorine modeling in pipe networks, Journal of Hydraulic Engineering, 127(8) (2001) 669-677.
[37] H. Basha, L. Malaeb, Eulerian‐Lagrangian method for constituent transport in water distribution networks, Journal of Hydraulic Engineering, 133(10) (2007) 1155-1166.

ACCEPTED MANUSCRIPT

ACCEPTED MANUSCRIPT