

# بررسی اثرات غیرماندگاری افت اصطکاک و شدت جریان گذرا در روش‌های نشت‌یابی با استفاده از روابط انرژی یک بعدی

حمید شاملو\* (استادیار)

سیده مریم موسوی فرد (دکتری)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

علی حقیقی (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید چمران اهواز

تحلیل معکوس جریان گذرا به منزله یکی از روش‌های کارا جهت شناسایی نشت در خطوط لوله شناخته می‌شود که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. در این نوشتار به منظور تعیین شرایط مناسب جهت پیاده‌سازی روش‌های نشت‌یابی بر پایه مدل‌سازی جریان گذرا، به تحقیق در خصوص اثر مدت زمان بستن شیر در شرایط جریان آرام و آشفته با عدد رینولدز پایین و اثرات غیرماندگاری افت اصطکاک پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از اعداد رینولدز پایین‌تر و مدت زمان‌های طولانی‌تر بستن شیر می‌توان به نتایج مناسبی در روند نشت‌یابی رسید. بدین ترتیب علاوه بر آنکه می‌توان اعتمادپذیری نتایج را تا حد قابل قبولی ارتقاء داد، از خسارت‌های ناشی از نوسانات شدید که در نتیجهی جریانات گذرای سریع ایجاد می‌شود دوری جست.

واژگان کلیدی: نشت، جریان گذرا، سرعت بستن شیر، اثرات غیرماندگاری افت اصطکاک.

## ۱. مقدمه

نشت‌یابی در شبکه‌های لوله، موضوع مورد توجه پژوهشگران آب در طول سال‌ها بوده است. مقدار نشت در یک شبکه‌ی لوله می‌تواند نشانگر کارایی کلی آن در سیستم آبرسانی باشد. مثلاً شبکه‌ی که به خوبی حفاظت نشده باشد، اغلب دارای نشت زیاد است. نشت آب از خطوط لوله بنا به دلایل مختلفی از جمله تغییرات ناگهانی فشار، خوردگی لوله‌ها، نشست‌ها و رانش‌های زمین، ضربه، استهلاک سیستم انتقال و تأسیسات مکانیکی و غیره به وقوع می‌پیوندد و یکی از مشکلات مهمی به‌شمار می‌رود که ممکن است صنعت آبرسانی با آن مواجه شود.

خصوصیات جریان گذرا همچون سرعت و فشار لحظه‌ی، تابعی از موج انتشار یافته در طول لوله است و چنانچه موج در طی مسیر حرکت خود با هرگونه واقعه‌ی همچون نشت و انشعابات غیرمجاز برخورد کند، اثرات آن در نوسانات سرعت و فشار در نقاط مختلف لوله دیده می‌شود. از تغییرات ایجاد شده می‌توان به نرخ استهلاک و وقوع اغتشاشاتی به صورت شکستگی در منحنی سیگنال فشار اشاره کرد. از این شواهد می‌توان برای تعیین و شناسایی نشت در خطوط لوله بهره جست.<sup>[۱]</sup> به‌طورکلی از میان روش‌هایی که به جریان گذرا وابسته هستند، می‌توان روش‌های بر پایه تحلیل معکوس جریان گذرا<sup>[۲-۶]</sup> روش استهلاک جریان گذرا<sup>[۷]</sup> روش‌های

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۰/۳/۱۶، پذیرش ۱۳۹۰/۱۰/۱۰.

انعکاس موج در حوزه‌ی زمان<sup>[۸]</sup> روش‌های بالانس حجمی<sup>[۹]</sup> روش‌های بر پایه تحلیل عقب‌گرد جریان گذرا<sup>[۱۷]</sup> را نام برد.

در این میان روش تحلیل معکوس جریان گذرا به‌منزله یکی از موفق‌ترین روش‌ها شناخته می‌شود که می‌توان چارچوب اصلی آن را در این گام‌ها خلاصه کرد:<sup>[۱۸]</sup>

۱. ایجاد جریان گذرا در سیستم با باز یا بسته‌کردن یک شیر کنترل؛
۲. اندازه‌گیری نوسانات فشار در انتهای خط لوله (محل شیر)؛
۳. توسعه مدل ریاضی تحلیل هیدرولیکی جریان گذرا به‌صورت تابعی از مشخصه‌های مجهول نشت؛
۴. توسعه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی (NLP) که در آن تابع هدف عبارت است از مجموع اختلاف مربعات بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی نوسانات فشار در سایت اندازه‌گیری؛
۵. به‌کارگیری یک روش بهینه‌سازی برای حل برنامه‌ریزی مذکور.

در یک فرایند نشت‌یابی بر پایه مدل‌سازی جریان گذرا عدم قطعیت‌های بسیاری دخیل هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به مدل‌سازی افت اصطکاک

که در آن ها،  $Q_A$ ،  $Q_B$ ،  $Q_P$  دبی های لحظه‌یی و  $H_A$ ،  $H_B$ ،  $H_P$  هدای فشار لحظه‌یی به ترتیب در نقاط  $A$ ،  $B$ ،  $P$  (شکل ۱) و  $R = f/2DA$  است. معادله‌ی ۳ در طول خطوط مشخصه‌ی مثبت و معادله‌ی ۴ در طول خطوط مشخصه‌ی منفی معتبر است.

### ۱.۲. مدل سازی نشست در لوله

اثرات نشست در یک لوله، تابعی از مؤلفه‌های نشست شامل موقعیت در لوله، اندازه، و شکل روزنه‌ی نشست، مشخصه‌های جریان شامل فشار و دبی لحظه‌یی و مشخصه‌های اجرایی شامل تراز کارگذاری لوله است.<sup>[۲۰]</sup> با توجه به موارد یادشده، دبی خروجی از یک نشست در لوله را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۵ مدل کرد.

$$Q_L = A_e \sqrt{2g(H_L - Z_L)} \quad (5)$$

که در این رابطه،  $Q_L$  دبی لحظه‌یی خروجی از طریق نشست،  $A_e$  اندازه‌ی مساحت نشست،  $H_L$  هد پیزومتریک لحظه‌یی بر روی نشست، و  $Z_L$  رقم کارگذاری لوله در محل نشست است. حل هم‌زمان این معادله در کنار معادلات مشخصه‌ی مثبت و منفی، منجر به تعیین مقادیر لحظه‌یی فشار و دبی در گره‌های حاوی نشست می‌شود.

### ۳. افت اصطکاک غیرماندگار

با بستن ناگهانی شیر جهت تولید جریان گذرا بلافاصله بعد از عبور موج، سرعت متوسط نزدیک به صفر می‌شود، حتی اگر گرادیان سرعت در دیواره بسیار بزرگ باشد. بنابراین، تنش برشی دیواره در حالت متناظر ماندگار و محاسبه‌شده با سرعت متوسط نیز نزدیک به صفر است، در حالی که تنش برشی واقعی بسیار قابل توجه است. در واقع سرعت و تنش برشی در دیواره، علامتی مخالف سرعت در هسته‌ی جریان دارند. بنابراین می‌توان با توجه به علل ذکرشده چنین نتیجه گرفت که افت‌های اصطکاک محاسبه‌شده با استفاده از روابط حاکم بر جریان ماندگار در جریان‌های گذرا صحیح نیستند.<sup>[۲۱]</sup> از این رو تنش برشی دیواره  $\tau_w$  در هر لحظه برابر است با مقدار  $\tau_s$  (تنش برشی شبه‌ماندگار) که در یک جریان ماندگار با همان سرعت متوسط حاکم است، به علاوه مقدار  $\tau_{us}$  که تنش برشی غیرماندگار نامیده می‌شود (رابطه‌ی ۶) علامت  $\tau_{us}$  می‌تواند مثبت یا منفی باشد، که به عوامل مختلفی بستگی دارد.

$$\tau_w = \tau_s + \tau_{us} \quad (6)$$

همان‌طور که اشاره شد، مدل‌های اصطکاک ماندگار برای توصیف استهلاک ایجادشده در حین جریان گذرا مناسب نیستند و از این رو مدل‌های بسیاری برای توصیف ضریب اصطکاک غیرماندگار توسعه پیدا کرده‌اند که انطباق خوبی با نتایج حاصل از مدل‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند.

این مدل‌ها در ۳ دسته‌ی مدل‌های انتگرالی پیچیده، مدل‌های بر پایه‌ی شتاب محلی جریان و مدل‌های دوبعدی و شبه دوبعدی قرار می‌گیرند. بنیان‌گذار دسته‌ی اول این مدل‌ها یعنی مدل‌های انتگرالی پیچیده Zielke (۱۹۶۸) است. وی یک روش عددی را برای محاسبه‌ی افت‌های اصطکاک در جریان گذرای آرام گسترش داد که با عنوان اصطکاک وابسته به سامد شناخته می‌شود. براساس تحقیقات وی به دلیل پیچیدگی در شرایط سرعت به‌عنوان تابعی از مکان و زمان، تاریخچه‌ی سرعت و شتاب هنگام مدل‌سازی اصطکاک سیال در مسائل تکبیر

اشاره کرد که در عمده‌ی روش‌های نام‌برده به‌صورت ماندگار و براساس رابطه‌ی دارسی و ایسباخ<sup>۶</sup> در نظر گرفته می‌شود. همچنین شدت جریان گذرای تولیدشده نیز خود مسئله‌یی چالش برانگیز در این روش‌ها محسوب می‌شود. چرا که جریان‌های با شدت بالا اگرچه حاوی اطلاعات مفیدتری از مشخصه‌های جریان و نشست در خود هستند، اما تبعاتی همچون وقوع امواج نامطلوب ضربه‌ی قوی و احتمال جدایی ستون مایع و خلاءسازی را نیز در پی دارند.<sup>[۲]</sup> تحقیق درخصوص این موارد، چارچوب اصلی اهداف نوشتار حاضر را تشکیل می‌دهد.

### ۲. معادلات حاکم

تحلیل جریان گذرا در بیشتر مدل‌های هیدرولیکی بر پایه‌ی معادلات یک بعدی مومتم<sup>۷</sup> و پیوستگی انجام می‌شود. روش‌های عددی مختلفی برای شبیه‌سازی جریان گذرا در خطوط لوله معرفی شده است که رایج‌ترین آن‌ها روش خطوط مشخصه است. رفتار یک سیال در یک خط لوله را می‌توان با استفاده از روابط بقای مومتم و پیوستگی، Chaudhry (۱۹۸۷) توصیف کرد که معادلات ساده‌شده‌ی آن به‌صورت رابطه‌های ۱ و ۲ است:

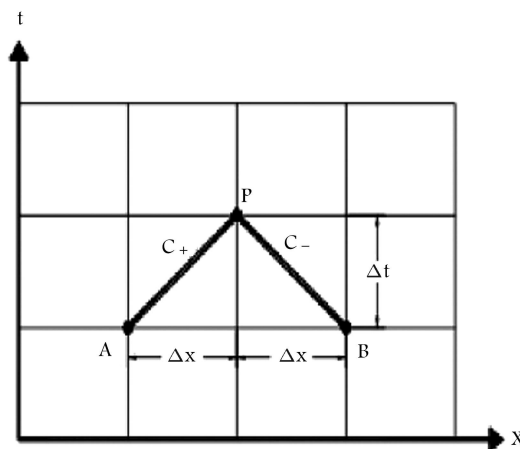
$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (2)$$

در این روابط،  $H = H(x, t)$  هد لحظه‌یی پیزومتریک،  $Q = Q(x, t)$  دبی لحظه‌یی جریان،  $a$  سرعت انتشار موج در لوله،  $A$  سطح مقطع لوله،  $D$  قطر لوله،  $g$  شتاب ثقل،  $f$  ضریب افت،  $x$  فاصله‌ی مکانی و  $t$  زمان است. مطابق با روش خطوط مشخصه (شکل ۱) چنانچه معادلات مومتم و پیوستگی جریان غیرماندگار در لوله‌ها به‌طور خطی ترکیب شوند و از معادله‌ی حاصل انتگرال‌گیری شود، معادله‌های ۳ و ۴ به‌دست می‌آیند:<sup>[۱۹]</sup>

$$Q_P - Q_A + \frac{gA}{a}(H_P - H_A) + R \int_A^P Q|Q|dt = 0 \quad (3)$$

$$Q_P - Q_B + \frac{gA}{a}(H_P - H_B) + R \int_B^P Q|Q|dt = 0 \quad (4)$$



شکل ۱. خطوط مشخصه در صفحه‌ی  $xt$ .

را پیش بینی کند.<sup>[۲۲]</sup> از این رو Vitkovsky رابطه ی ۷ را به صورت رابطه ی ۸ تصحیح کرد:

$$f = f_q + \frac{kD}{V|V|} \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + \text{sign}(V) \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right] \quad (۸)$$

در این رابطه،  $(+۱)$  برای  $V \geq 0$  یا  $-۱$  برای  $V < 0$  و  $\text{sign}(V)$  ضریب اصطکاک Brunone است. این معادله علامت ترم جابه جایی را برای تمام حالت های ممکن جریان و مسیرهای حرکت موج ضربه ی قوچ هم در فازهای تندشونده و هم کندشونده به درستی پیش بینی می کند. ضریب اصطکاک غیرماندگار Brunone را می توان به صورت تجربی با سعی و خطا و یا با استفاده از ضریب کاهش برش Vardy،  $C^*$  را محاسبه کرد:<sup>[۲۲]</sup>

$$k = \frac{\sqrt{C^*}}{2} \quad (۹)$$

ضریب کاهش برش Vardy برای جریان آرام و آشفته به صورت رابطه های ۱۰ و ۱۱ محاسبه می شود:

$$C^* = 0.00476 \quad \text{جریان آرام} \quad (۱۰)$$

$$C^* = \frac{0.41}{\text{Re}^{\log(1.2/Re^{0.5})}} \quad \text{جریان آشفته} \quad (۱۱)$$

در این رابطه  $\text{Re} = \frac{VD}{\nu}$  عدد رینولدز است.

#### ۴. روش انرژی

از مفاهیم انرژی برای جریان های گذرا در مجاری بسته می توان به منزله ی جایگزینی برای توصیف رفتار جریان غیرماندگار استفاده کرد.<sup>[۲۳]</sup> در این شرایط می توان جریان گذرا در یک سیستم را به صورت یک توالی تبدیل انرژی که سیستم در آن از شرایط اولیه ی هیدرولیکی به شرایط نهایی تغییر وضعیت می دهد، در نظر گرفت. روش انرژی، شرایط جریان گذرا را از یک دید انتگرالی در لوله بیان می کند و از این رو راهی ساده، مؤثر و منطقی برای مقایسه ی پاسخ گذرایی سیستم های مختلف و روش های حل ارائه می کند. Karney (۱۹۹۰)، با استفاده از معادلات پیوستگی و مومنت (معادله های ۱ و ۲) روابط انرژی یک بعدی را در شرایط بدون نشت به دست آورد، (معادله ی ۱۲):<sup>[۲۳]</sup>

$$\frac{\rho A}{2} \left( \frac{g}{a} \right) \frac{d}{dt} \int_0^L H^2 dx + \frac{\rho A}{2} \frac{d}{dt} \int_0^L V^2 dx + \frac{f \rho A}{2D} \int_0^L |V|^2 dx + \rho g AV(L, t)H(L, t) - \rho g AV(0, t)H(0, t) = 0 \quad (۱۲)$$

در این نوشتار ترم نشت نیز به معادلات پیوستگی و مومنت اضافه شده (رابطه های ۱۳ و ۱۴) و بدین ترتیب رابطه ی توصیف کننده ی انرژی مستهلک شده ناشی از نشت نیز به دست آمده است.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{a^2}{gA} Q_L \delta(x - x_L) = 0 \quad (۱۳)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{fQ^2}{2DgA^2} - \frac{QQ_L \delta(x - x_L)}{gA^2} = 0 \quad (۱۴)$$

موج باید در نظر گرفته شود. در سال ۱۹۹۶، مدلی از اصطکاک ناماندگار بر پایه ی تابع وزنی برای جریانات در لوله های صاف ارائه شد. در این مدل فرض شد که ویسکوزیته ی آشفته به طور خطی در لایه ی برشی ضخیم اطراف هسته، تغییر سرعت می دهد، از این رو این مدل برای جریانات در رینولدزهای بالا قابل استفاده است. در حالت جریانات آشفته با رینولدز پایین و زمان های انتقال کم، اصطکاک پیش بینی شده برابر با نتایج مدل توسعه یافته ی دیگری از سایر محققان است.<sup>[۲۱]</sup> که این نتایج نیز با نتایج مدل Zielke (۱۹۶۶، ۱۹۶۸) انطباق خوبی دارد.

در ساده ترین روش فرض می شود که قسمت ناماندگار تنش برشی متناسب است با شتاب لحظه یی جریان همراه با ضریب تناسب که پارامتری تجربی است. نوع دوم مدل های اصطکاک ناماندگار در این دسته قرار می گیرند. یک گروه محقق به سرپرستی Daily (۱۹۵۶) به معرفی اولیه ی این روش ها پرداخت. اصلاح مدل ارائه شده ی آن ها موضوع بسیاری از مطالعات بعدی از جمله Brunone (۱۹۹۱) و همکارانش بوده است. کاربرد آسان این مدل در محاسبات عددی از فواید مهم، و نیاز به تعیین ضریب تجربی، از نقاط ضعف این روش به شمار می رود. در واقع Brunone مدل پیشنهادی Daily (۱۹۵۶) را با افزودن ترم شتاب جابه جایی تصحیح کرد. دسته ی سوم مدل های پیشنهادی برای اصطکاک ناماندگار شامل مدل های دوبعدی می شوند. این دسته از مدل ها به منظور در نظر گرفتن وریسیتی در جداری لوله، دیفیوژن حاصل از آن و اثر این وریسیتی بر استهلاك انرژی که در مدل های یک بعدی استهلاك گنجانده نمی شوند، ارائه شده اند. در واقع، دلیل پژوهشگران برای ارائه ی این دسته از مدل ها این بوده است که ناکارآمدی مدل های یک بعدی ماندگار را در ناتوانی این مدل ها در گنجاندن اثرات رفتار دوبعدی پروفیل سرعت که از دیفیوژن وریسیتی موج در دیواره ی لوله نتیجه می شود، می دانستند.

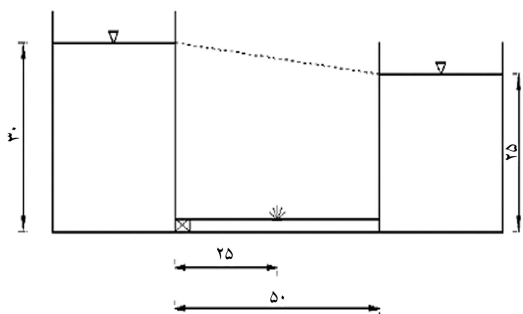
به طور کلی با توجه به این که مدل های انتگرالی پیچیده که بر پایه ی جمع آوری تاریخچه ی سرعت و فشار در حین مدل سازی عمل می کنند، به حافظه ی زیادی جهت ذخیره سازی اطلاعات نیاز دارند و مدل های دوبعدی و شبه دوبعدی براساس دلایل ذکر شده فقط برای استفاده در آزمایشگاه مناسب هستند، در این نوشتار از مدل های بر پایه ی شتاب لحظه یی جریان استفاده شده است. از میان این روش ها، مدل تصحیح شده ی Brunone نسبتاً ساده است و پیش بینی صحیحی از فازهای تند و کندشونده ی جریان دارد و به طور کلی انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داده است.<sup>[۲۳]</sup>

#### ۱.۳. Brunone مدل

مدل Brunone قسمت اصطکاک غیرماندگار  $f_u$  را به شتاب محلی لحظه یی  $\partial V / \partial t$  و شتاب جابه جایی لحظه یی  $\partial V / \partial x$  مربوط می سازد (رابطه ی ۷):

$$f = f_q + \frac{kD}{V|V|} \left( \frac{\partial V}{\partial t} - a \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (۷)$$

در این رابطه،  $k$  ضریب اصطکاک Brunone، و  $x$  فاصله است. Vitkovsky (۱۹۹۸) مدل کلی Brunone را برای موقعیت های مختلف جریان مورد بررسی قرار داد، براساس تحقیقات وی معادله ی ۷ در پیش بینی علامت صحیح ترم جابه جایی  $-a \frac{\partial V}{\partial x}$  در جریانات خاص و مسیرهای موج در فازهای تند و کندشونده ی جریان ناتوان است. مثلاً این معادله نمی تواند علامت صحیح را در حالت بستن شیر در بالادست یک سیستم ساده که جریان اولیه ی آن در جهت مثبت محور  $x$  هاست،



شکل ۲. شماتیک مثال موردی شامل خط لوله، شیر و مخزن.

سیستم مورد بررسی برابر با  $15 \times 10^3$  mm در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که برای اندازه‌گیری اصطکاک شبه ماندگار از معادله‌ی کلبروک استفاده شده است.

برای بررسی اثرات مدت زمان بسته‌شدن شیر در روند نشست‌یابی، یک مدل عددی تحلیل جریان گذرا بر پایه‌ی روش خطوط مشخصه با استفاده از روابط انرژی ذکر شده توسعه داده شده و برای ۳ حالت مختلف جریان اولیه با سرعت‌های  $0.22$ ،  $0.14$  و  $0.05$  متر بر ثانیه به ترتیب معادل با اعداد رینولدز  $560$ ،  $357$  و  $127$  جریان گذرا با سرعت‌های مختلف بستن شیر تولید شده است. یک نشست در نقطه‌ی میانی خط لوله در نظر گرفته شده که بزرگی دبی آن از  $0.25 Q_{mean}$  تا  $0.7 Q_{mean}$  تغییر کرده است. در حالت اول طول خط لوله‌ی مورد بررسی  $50$  m و گره‌ی نشستی در فاصله‌ی  $25$  m از مخزن بالادست در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است انرژی تلفات نوسانات فشار ناشی از اصطکاک غیرماندگار و نشست (رابطه‌های ۱۵ و ۱۶) در این مثال فقط در محل شیر انتها (مبنای روش‌های نشست‌یابی) و برای مدت زمان ۲ ثانیه محاسبه شده است. در مرحله‌ی اول تعیین شرایط مناسب فرایند نشست‌یابی، تغییرات انرژی مستهلک‌شده ناشی از نشست را به ازای افزایش مدت زمان بسته‌شدن شیر در اعداد رینولدز انتخابی، مورد بررسی قرار داده‌ایم. به منظور انجام یک مقایسه‌ی مناسب لازم است انرژی مستهلک‌شده را به صورت بی‌بعد نشان دهیم. بنابراین انرژی مستهلک‌شده ناشی از نشست با دبی‌های در نظر گرفته شده در مدت زمان‌های مختلف بستن شیر را بر انرژی مستهلک‌شده ناشی از آن نشست‌ها در مدت زمان  $32L/a$  بستن شیر تقسیم کرده و این مقدار بی‌بعد را به صورت  $\bar{E}_L$  نمایش داده‌ایم. مقدار پارامتر بی‌بعد  $\bar{E}_L$  در شکل‌های ۳ تا ۵ به ازای سرعت‌های اولیه‌ی مختلف جریان مورد بررسی، در مدت زمان‌های در نظر گرفته شده برای بستن شیر نشان داده شده است.

همان‌طور که از نمودارهای ارائه شده مشخص است، مقادیر به دست آمده برای پارامتر  $\bar{E}_L$  در بازه‌ی بسیار کوچکی در محدوده‌ی تقریبی  $0.2 - 0.995$  قرار گرفته‌اند که بسیار نزدیک به ۱ است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که میزان انرژی که نشست با دبی‌های مختلف در جریان‌های آرام تا آشفته با عدد رینولدز پایین مستهلک می‌کند، در مدت زمان‌های مختلف بستن شیر تقریباً ثابت می‌ماند. از نتیجه‌ی به دست آمده در این قسمت می‌توان به منزله‌ی مزیتی در فرایند نشست‌یابی یاد کرد و با استفاده از آن از هدهای بزرگی که در نتیجه‌ی بستن سریع شیر در خط لوله تولید می‌شود، دوری جست. در واقع با استفاده از مدت زمان‌های طولانی‌تر بستن شیر همان نتیجه‌ی ناشی از مدت زمان‌های کوتاه بستن شیر حاصل می‌شود. تغییرات اندکی در زمان  $2L/a$  ثانیه بستن شیر در جریان‌های آشفته مورد بررسی به ازای دبی‌های کوچک‌تر نشست مشاهده می‌شود که ممکن است در شرایط جریان‌های آشفته با عدد رینولدز بالاتر، بیشتر شوند. اما در واقع همان‌طور که از نمودارهای ارائه شده

روابط به دست آمده برای انرژی مستهلک‌شده ناشی از اصطکاک غیرماندگار و نشست به ترتیب به صورت رابطه‌های ۱۵ و ۱۶ است.

$$E_f = \frac{\rho A}{2D} \int_0^L f |V|^2 dx \quad (15)$$

$$E_L = \rho g Q_L \left[ H(x_L) - \frac{1}{g} V(x_L)^2 \right] \quad (16)$$

با استفاده از رابطه‌های ۱۵ و ۱۶، انرژی مستهلک‌شده ناشی از نشست و اصطکاک ناماندگار در هر گام زمانی محاسبه شده است و براساس حساسیت این مقادیر به مدت زمان بسته‌شدن شیر و عدد رینولدز جریان، محدوده‌ی مناسبی برای فرایند نشست‌یابی معرفی می‌شود.

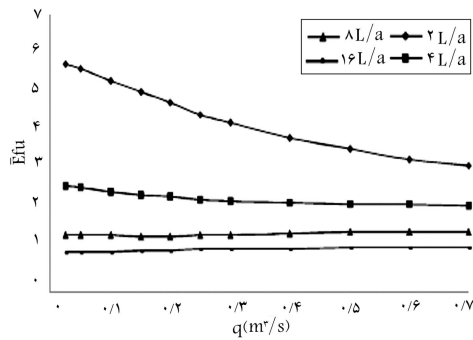
## ۵. متدولوژی تحقیق

در مقدمه به مراحل مختلف روش تحلیل معکوس جریان گذرا اشاره شد. مطابق با این روش ابتدا لازم است با بستن شیر انتهای خط لوله شرایط جریان گذرا در سیستم تولید و سپس نوسانات فشار ناشی از آن در محل شیر اندازه‌گیری شود. سرعت بستن شیر رابطه‌ی مستقیم با شدت نوسانات جریان گذرای تولید شده دارد. هر اندازه جریان گذرای تولید شده شدیدتر باشد، اثرات نشست و ضریب اصطکاک بر روی سیگنال‌های آن بارزتر است و لذا در نگاه اول نتایج نشست‌یابی دارای دقت بالاتری خواهند بود.<sup>[۲۵]</sup>

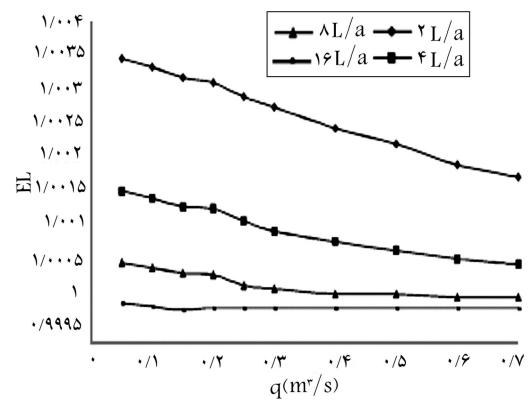
از سوی دیگر کلیه محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌هایی که در روش‌های معمول مدل‌سازی جریان گذرا وجود دارد، در نوسانات شدید تشدید شده است و به عبارتی اعتمادپذیری مدل‌های عددی در این شرایط کاهش می‌یابد. از مهم‌ترین عدم قطعیت‌های مؤثر می‌توان به اثرات غیرماندگاری افت اصطکاک اشاره کرد. همچنین از نقطه نظر عملی، جریان‌های گذرای بسیار سریع ممکن است منجر به وقوع پدیده‌ی ضربه‌ی قویج، جدایی ستون مایع، و اندرکنش آب و سازه شود که هیچ‌یک مطلوب یک آزمایش نشست‌یابی سالم نیستند. کلیه موارد گفته شده را می‌توان با در نظر گرفتن سرعتی مناسب برای بسته‌شدن شیر کنترل کرد که به واسطه‌ی آن شدت جریان تولید شده به اندازه‌ی کافی سریع باشد، پاسخ‌های روش نشست‌یابی دارای دقتی مناسب باشند، و صدمه‌ی نیز به سیستم وارد نشود. در این نوشتار، مهم‌ترین بخش غیرقطعی در مدل‌سازی یعنی اثرات غیرماندگاری افت اصطکاک بر مبنای مدل Brunone مدنظر است، که با تعریف یک مثال موردی و شرایط مختلف ایجاد جریان گذرا مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. برای تعیین شرایط مناسب برای انجام یک فرایند نشست‌یابی لازم است روابط به دست آمده از روش انرژی (رابطه‌های ۱۵ و ۱۶) در حالت‌های مختلفی بررسی شود، از این رو اثرات تغییر طول لوله، اثر جریان ثقلی با رینولدز بسیار بالا و همچنین اثر تغییر مکان نشست در طول خط لوله بر نتایج بررسی شده است.

### ۱.۵. بررسی اثر تغییر طول خط لوله

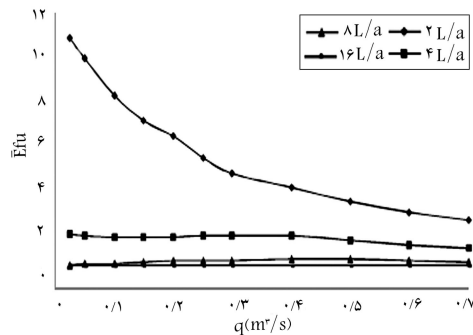
مثال موردی در نظر گرفته شده شامل خط لوله‌ی به قطر  $3$  cm است که از طرف پایین دست به مخزن و از طرف بالادست به شیری متصل است که در بالادست آن نیز مخزن قرار دارد. شرایط این مدل به نحوی انتخاب شده است که از ایجاد هدهای منفی جلوگیری شود (شکل ۲). هد مخزن بالادست  $30$  m و هد مخزن پایین دست  $25$  m و سرعت موج  $1000$  m/s است. همچنین زبری معادل



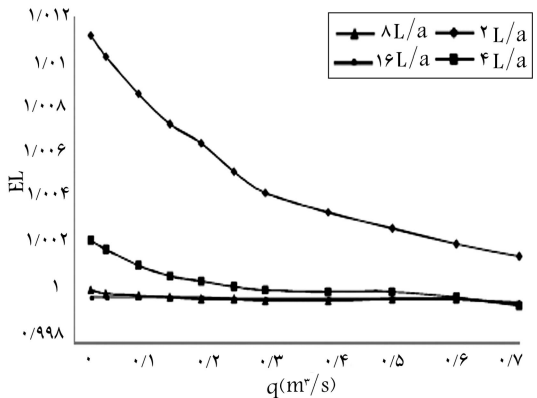
شکل ۶. نسبت استهلاک انرژی ناشی از اصطکاک غیرماندگار در حالت  $Re = 1270$ .



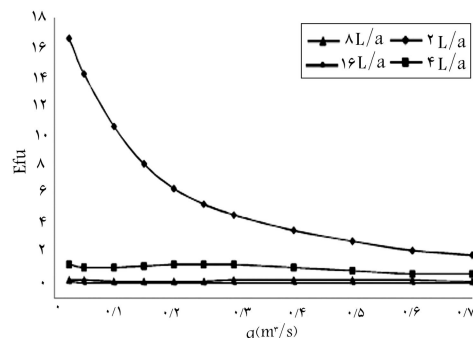
شکل ۳. نسبت استهلاک انرژی ناشی از نشت در حالت  $Re = 1270$ .



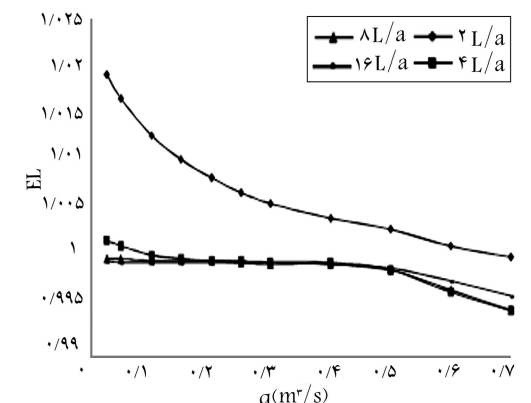
شکل ۷. نسبت استهلاک انرژی ناشی از اصطکاک غیرماندگار در حالت  $Re = 3570$ .



شکل ۴. نسبت استهلاک انرژی ناشی از نشت در حالت  $Re = 3570$ .



شکل ۸. نسبت استهلاک انرژی ناشی از اصطکاک غیرماندگار در حالت  $Re = 5600$ .

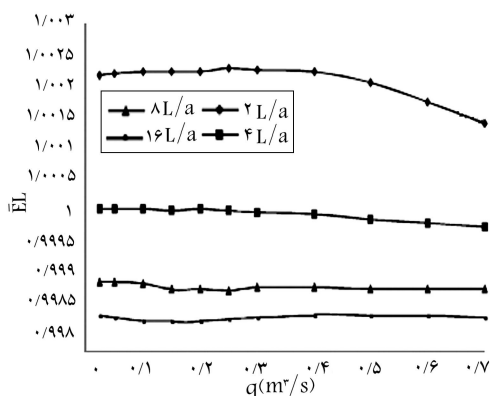


شکل ۵. نسبت استهلاک انرژی ناشی از نشت در حالت  $Re = 5600$ .

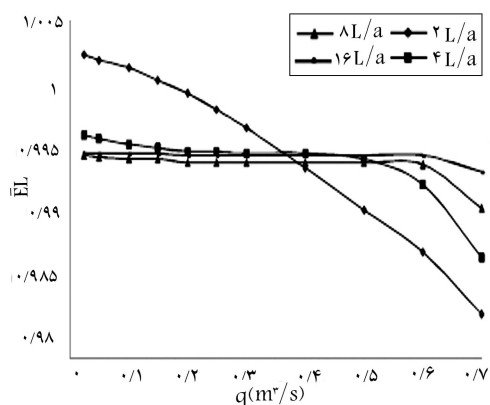
در شکل‌های ۳ تا ۵ مشاهده می‌شود، انرژی مستهلک‌شده‌ی ناشی از نشت نسبت به مدت زمان بستن شیر حساس نیست و از این رو لازم است برای تعیین شرایط مناسب نشت‌یابی از عامل مؤثر دیگری در نتایج نشت‌یابی استفاده شود. به این منظور پارامتر استهلاک انرژی ناشی از غیرماندگاری اصطکاک را به صورت نسبت انرژی مستهلک‌شده‌ی ناشی از اصطکاک غیرماندگار در مدت زمان‌های مختلف بستن شیر به انرژی مستهلک‌شده‌ی ناشی از اصطکاک غیرماندگار در مدت زمان  $32L/a$  بستن شیر در نظر گرفته و مقدار آن را برای جریان‌هایی با رینولدز مختلف به دست آورده و این نسبت را به صورت پارامتر بی‌بعد  $\overline{E}_{fu}$  نشان داده‌ایم. به منظور بررسی تغییرات این پارامتر، مقادیر به دست آمده در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که از نمودارهای ارائه‌شده در شکل‌های ۶ تا ۸ مشخص است،

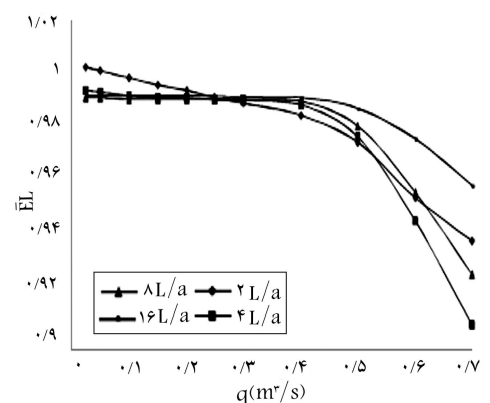
استهلاک انرژی ناشی از اصطکاک غیرماندگار در مدت زمان  $2L/a$  بستن شیر نسبت به سایر زمان‌های بستن شیر زیادتر است که این مقدار با افزایش عدد رینولدز بیشتر می‌شود و همچنین در مدت زمان‌های طولانی‌تر بستن شیر، انرژی مستهلک‌شده‌ی ناشی از اصطکاک غیرماندگار بسیار کمتر است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که اگر فرایند نشت‌یابی در مدت زمان‌های طولانی‌تر بستن شیر انجام شود، عدم قطعیت‌های ناشی از مدل‌سازی اصطکاک غیرماندگار نیز کمتر می‌شود. با توجه به این که تغییرات انرژی مستهلک‌شده‌ی ناشی از اصطکاک غیرماندگار در زمان  $8L/a$  تا  $16L/a$  بسیار اندک است، در این نوشتار مدت زمان  $8L/a$  تا  $16L/a$  برای بستن شیر پیشنهاد شده است. در جهت اطمینان از نتیجه‌ی به دست آمده در این قسمت، لازم است اثر طول لوله نیز مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور مدل ارائه‌شده در شکل ۲ در شرایطی که طول آن  $m = 50^\circ$  و گره‌ی



شکل ۹. نسبت استهلاک انرژی ناشی از نشت در حالت  $Re = 1270$  در خط لوله‌ی ۵۰۰ متری.



شکل ۱۰. نسبت استهلاک انرژی ناشی از نشت در حالت  $Re = 3570$  در خط لوله‌ی ۵۰۰ متری.



شکل ۱۱. استهلاک انرژی ناشی از نشت در حالت  $Re = 5600$  در خط لوله‌ی ۵۰۰ متری.

با مقایسه‌ی نمودار ارائه شده در شکل ۱۶ که برای رینولدز  $120600$  به دست آمده و نمودار ارائه شده در شکل ۲، می‌توان اثر رینولدزهای بسیار بالا را بر انرژی مستهلاک شده‌ی ناشی از نشت به روشنی مشاهده کرد. بزرگی نشت در هر دو نمودار یکسان است، ولی انرژی مستهلاک شده‌ی ناشی از آن در رینولدز  $120600$  چندین برابر انرژی مستهلاک شده‌ی ناشی از نشت در جریان با رینولدز  $1270$  است. برای نتیجه‌گیری بهتر است انرژی مستهلاک شده‌ی ناشی از اصطکاک ناماندگار نیز در

نشستی در فاصله‌ی  $250$  m از مخزن بالادست قرار دارد را در نظر می‌گیریم. بنابراین با توجه به افزایش طول خط لوله‌ی سیستم مورد بررسی لازم است مدت زمان برداشت اطلاعات نیز افزایش یابد، از این رو به مدت  $10$  s از سیستم اطلاعات جمع‌آوری می‌شود. مطابق با قسمت قبل انرژی مستهلاک شده‌ی ناشی از نشت را به صورت نسبت انرژی مستهلاک شده‌ی ناشی از نشت در مدت زمان‌های مختلف بستن شیر نسبت به انرژی مستهلاک شده‌ی ناشی از نشت در مدت زمان  $32L/a$  ثانیه در نظر گرفته و به صورت بی بعد  $\bar{E}_x$  نشان داده‌ایم. مقادیر به دست آمده برای این نسبت در شکل‌های ۹ تا ۱۱ به ازای رینولدزهای مختلف نشان داده شده است.

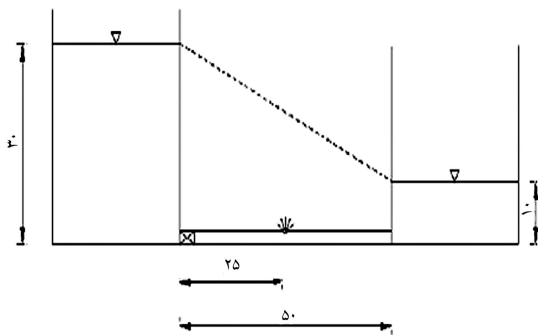
همان‌طور که از شکل‌های ۹ تا ۱۱ قابل مشاهده است، انرژی مستهلاک شده‌ی ناشی از نشت مانند شرایطی که در آن طول خط لوله  $50$  m در نظر گرفته شده بود، نسبت به مدت زمان بستن شیر حساس نیست؛ لذا لازم است برای تأیید مدت زمان پیشنهادی  $8L/a$  ثانیه برای بستن شیر، به بررسی اثر انرژی مستهلاک شده‌ی ناشی از اصطکاک ناماندگار در شرایط مورد بررسی پرداخته شود. نمودارهای به دست آمده برای این قسمت در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ ارائه شده‌اند.

با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ می‌توان مشاهده کرد که فقط در حالت مدت زمان  $2L/a$  ثانیه برای بستن شیر، انرژی مستهلاک شده‌ی ناشی از اصطکاک ناماندگار تغییرات زیادی را نشان می‌دهد که مطابق قسمت خط لوله‌ی  $50$  متری این تغییرات با افزایش عدد رینولدز بیشتر می‌شوند، بنابراین از این نتایج می‌توان در جهت تأیید استفاده از سرعت پیشنهادی  $8L/a$  ثانیه برای بستن شیر و همچنین استفاده از جریان‌های با رینولدز پایین استفاده کرد. این نمودارها همچنین می‌توان نتیجه گرفت که اولاً مدت زمان  $2L/a$  ثانیه، انرژی مستهلاک شده‌ی ناشی از اصطکاک ناماندگار در شرایط وجود نشت‌های کوچک چند برابر نشت‌های بزرگ است، ثانیاً نشت و اصطکاک ناماندگار بر هم اثر متقابل دارند به این معنا که در نشت‌های بزرگ‌تر، نشت سهم بیشتری از استهلاک انرژی را نسبت به اصطکاک ناماندگار به خود اختصاص می‌دهد. با توجه بیشتر به نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ می‌توان مشاهده کرد که در حالت  $m = 500$  نسبت به نمودارهای حالت  $L = 50$  انرژی مستهلاک شده‌ی ناشی از اصطکاک ناماندگار کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. این مطلب نشان دهنده‌ی این است که با افزایش طول خط لوله، انرژی جریان بیشتر مستهلاک می‌شود و سرعت جریان به دلیل زبری جداره کاهش بیشتری پیدا می‌کند و بنابراین استهلاک ناشی از اصطکاک ناماندگار که در اثر گرادیان سرعت ایجاد می‌شود، کاهش می‌یابد.

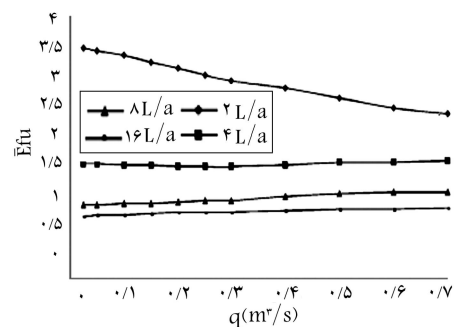
## ۲.۵. بررسی اثر جریان ثقلی با عدد رینولدز بسیار بالا

به منظور مشاهده‌ی بهتر تغییرات انرژی مستهلاک شده‌ی ناشی از نشت و اصطکاک ناماندگار و همچنین بررسی نتایج به دست آمده در جریان‌های با رینولدز بسیار بالا، جریان در سیستم ارائه شده در شکل ۲ به صورت ثقلی و هد مخزن پایین دست برابر  $10$  m در نظر گرفته شده است (شکل ۱۵)، عدد رینولدز جریان در این سیستم برابر با  $120600$  است.

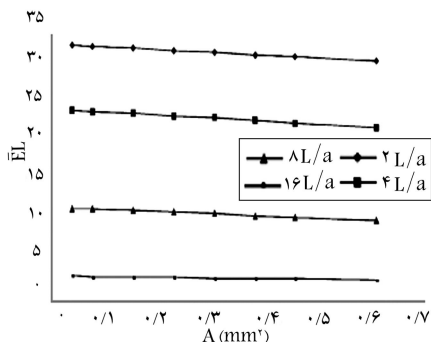
لازم به ذکر است که برای بررسی انرژی مستهلاک شده‌ی ناشی از نشت با قطر یکسان در رینولدزهای بالاتر، از نشت با اندازه‌های ارائه شده در قسمت رینولدز  $1270$  استفاده شده است.



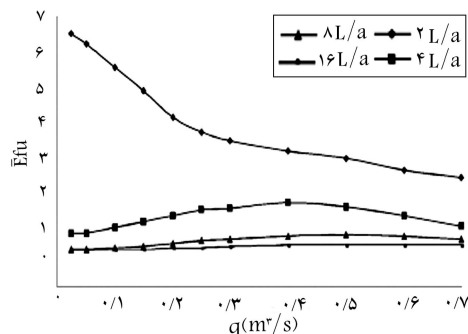
شکل ۱۵. شماتیک مثال موردی شامل خط لوله، شیر و مخزن.



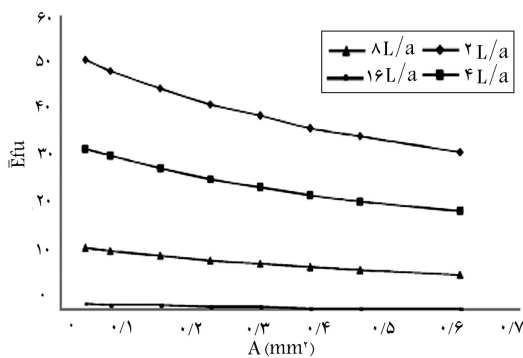
شکل ۱۲. نسبت  $\overline{E}_{fu}$  در حالت  $Re=1270$  در خط لوله‌ی ۵۰۰ متری.



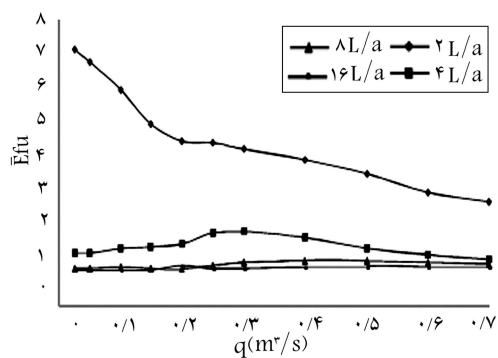
شکل ۱۶. نسبت استهلاک انرژی ناشی از نشت در حالت جریان ثقیلی.



شکل ۱۳. نسبت  $\overline{E}_{fu}$  در حالت  $Re=3570$  در خط لوله‌ی ۵۰۰ متری.



شکل ۱۷. نسبت  $\overline{E}_{fu}$  در حالت جریان ثقیلی.



شکل ۱۴. نسبت  $\overline{E}_{fu}$  در حالت  $Re=5600$  در خط لوله ۵۰۰ متری.

زمان‌های کوتاه بستن شیر اجتناب کرد؛ زیرا با توجه به نتایج به دست آمده در قسمت ۱.۵ می‌توان همان نتایج را با دقت مناسب در شرایط اعداد رینولدز پایین‌تر و با مدت زمان‌های طولانی‌تر بستن شیر به دست آورد. با توجه به مطالب عنوان شده می‌توان از مدت زمان  $8L/a$  ثانیه برای بستن شیر به منزله‌ی مدت زمان مناسب یاد کرد.

### ۳.۵. بررسی اثر مکان نشت در طول خط لوله

برای بررسی اثر مکان نشت بر انرژی مستهلک‌شده‌ی ناشی از اصطکاک غیرماندگار نشت کوچکی به بزرگی دبی  $25^\circ$  دبی میانگین جریان انتخاب کرده و مکان آن را در طول لوله‌ی نشان داده‌شده در شکل ۲ تغییر می‌دهیم. در اینجا مدت زمانی که برای بستن شیر در نظر گرفته‌شده، برابر با  $2L/a$  است. برای مشاهده‌ی بهتر نتیجه‌ی حاصل‌شده، مقادیر انرژی مستهلک‌شده‌ی ناشی از اصطکاک غیرماندگار در هر گره نسبت به انرژی مستهلک‌شده‌ی ناشی از اصطکاک غیرماندگار در فاصله‌ی  $2/5$

شرایط رینولدز  $120600$  به دست آید (شکل ۱۷) و با نتایج رینولدز  $1270$  مقایسه شود. انرژی مستهلک‌شده‌ی ناشی از اصطکاک ناماندگار در نمودار ارائه‌شده در شکل ۱۷، نسبت به نمودار ارائه‌شده در شکل ۶ به شدت افزایش می‌یابد. این نسبت در مدت زمان  $2L/a$  ثانیه در رینولدز  $120600$  تا  $10$  برابر مقدار  $\overline{E}_{fu}$  در رینولدز  $1270$  می‌رسد. با توجه به شکل ۱۷، با استفاده از اعداد رینولدز بالا و همچنین مدت زمان‌های کوتاه برای بستن شیر می‌توان به نتایج مناسبی در فرآیند نشت‌یابی دست یافت، اما از طرف دیگر رینولدزهای بالا و مدت زمان‌های کوتاه بستن شیر، معادل با امواج بزرگ در حین جریان گذرا هستند که ممکن است منجر به آسیب‌های جدی در خطوط آبرسانی شوند. از نقطه‌نظر اصطکاک ناماندگار نیز انرژی مستهلک‌شده‌ی ناشی از آن در رینولدزهای بالا بسیار زیاد است که حساسیت مدل نشت‌یابی را با دقت محاسبه‌ی اصطکاک ناماندگار به شدت افزایش می‌دهد. از طرف دیگر جریان‌های با رینولدز بالا ممکن است منجر به جدایی ستون مایع و کواتسیون شوند، از این رو لازم است از رینولدزهای بالا و همچنین مدت

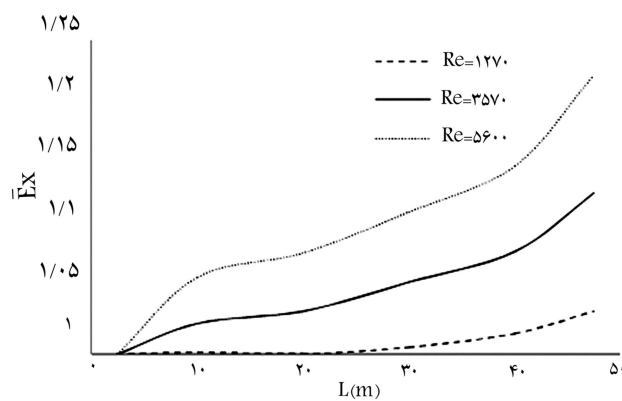
بسته شدن شیر و همچنین مکان نشت بر انرژی مستهلک شده‌ی ناشی از نشت و اصطکاک غیرماندگار پرداخته شد.

۱. در هر کدام از اعداد رینولدز انتخابی در خطوط لوله به طول های ۵۰ و ۵۰ متر، با افزایش مدت زمان بسته شدن شیر، انرژی مستهلک شده‌ی ناشی از نشت تقریباً یکسان است. با استفاده از این خاصیت می توان از مدت زمان های طولانی تر بستن شیر برای نشت یابی استفاده کرد و به این ترتیب از ایجاد هدهای بزرگ که معمولاً منجر به خسارت هایی در خطوط لوله می شوند، دوری جست؛ اما با توجه به کاهش اثرات نشت در مدت زمان های بسیار طولانی بستن شیر مدت زمان  $8L/a$  ثانیه را به منزله‌ی بازه‌ی مناسب برای فرآیند نشت یابی پیشنهاد می کنیم.

۲. انرژی مستهلک شده‌ی ناشی از اصطکاک غیرماندگار در خطوط لوله به طول های ۵۰ و ۵۰ متر، در مدت زمان های کوتاه تر بستن شیر نسبت به مدت زمان های طولانی تر بستن شیر بسیار زیاد است که این نسبت همان طور که در نوشتار حاضر نشان داده شد با افزایش عدد رینولدز افزایش می یابد. بدین ترتیب از آنجا که تخمین اصطکاک غیرماندگار همراه با تقریب است، استفاده از اعداد رینولدز پایین تر و همچنین مدت زمان های طولانی تر (مدت زمان  $8L/a$  ثانیه) برای بستن شیر می تواند به کم شدن خطا در فرآیند نشت یابی کمک کند.

۳. با توجه به نتایج به دست آمده از جریان ثقلی ارائه شده، در جریان های با عدد رینولدز بسیار بالا انرژی مستهلک شده‌ی ناشی از نشت در مدت زمان های کوتاه بستن شیر بسیار بیشتر از مدت زمان های طولانی بستن شیر است. این امر ممکن است به منزله‌ی مزیتی در فرآیند نشت یابی یاد شود، اما از طرفی دیگر مطابق با نتایج ارائه شده در مدل جریان ثقلی، در جریان های با رینولدز بسیار بالا استهلاک انرژی ناشی از اصطکاک ناماندگار نیز به شدت افزایش می یابد و به این ترتیب عدم قطعیت های ناشی از مدل سازی اصطکاک ناماندگار نیز بیشتر می شود. همچنین در جریان های با عدد رینولدز بسیار بالا با هدهای منفی که منجر به جدایی ستون مایع می شوند و با پدیده‌ی کاویتاسیون مواجه هستیم. از این رو پیشنهاد می شود در فرآیند نشت یابی از جریان های با عدد رینولدز بسیار بالا خودداری شود.

۴. در صورت انجام فرآیند نشت یابی بر سیستمی که شرایط جریان آرام بر آن حاکم است، انرژی مستهلک شده‌ی ناشی از نشت در طول خط لوله ثابت می ماند، در صورتی که این انرژی در جریان های آشفته در نزدیکی شیر بیشتر مستهلک می شود و به این ترتیب عدم قطعیت های ناشی از مدل سازی اصطکاک ناماندگار نیز افزایش پیدا خواهد کرد.



شکل ۱۸. نسبت  $\bar{E}_{\text{ع}}$  در خط لوله به طول ۵۰ متر.

متری از مخزن بالادست را به صورت پارامتری بعد  $\bar{E}_{\text{ع}}$  در نظر گرفته و مقادیر آن به صورت شکل ۱۸ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۸ در جریان آرام انرژی مستهلک شده‌ی ناشی از اصطکاک غیرماندگار در طول لوله ثابت است، ولی در جریان آشفته با افزایش عدد رینولدز، در پایین دست سیستم مورد بررسی با افزایش انرژی مستهلک شده‌ی ناشی از اصطکاک غیرماندگار مواجه خواهیم شد. این پدیده ناشی از بزرگ بودن گردان های سرعت در نزدیکی شیر در جریانات با رینولدز بالاتر است. بنابراین استفاده از رینولدزهای پایین تر نیز می تواند در کاهش عدم قطعیت های ناشی از اصطکاک غیرماندگار در فرآیند نشت یابی مفید باشد.

## ۶. نتیجه گیری

همان طور که در طول این نوشتار عنوان شد، در فرآیند نشت یابی هرچه جریان گذرای ایجاد شده شدیدتر باشد، اطلاعات بیشتری از مشخصات نشت به همراه دارد. از طرفی دیگر جریان های گذرای شدید ممکن است آسیب های جدی به سیستم وارد کنند، از این رو به منظور تعیین شرایط مناسب برای فرآیند نشت یابی برای جریانات گذرا (شرایطی که علاوه بر همراه داشتن اطلاعات کافی از نشت به سیستم نیز آسیبی وارد نکند)، مدلی انتخاب (شکل ۲) و در شرایط خطوط لوله با طول مختلف و جریان ثقلی با عدد رینولدز بسیار بالا، به بررسی اثر عدد رینولدز و مدت زمان

## پانویس ها

1. inverse transient method
2. transient damping method
3. time domain reflectometry techniques
4. volume balance methods
5. impulse response method
6. Damcy & Weisbach
7. Momentum

## منابع (References)

1. Wang, X.J., Lambert, M.F., Simpson, A.R., Liggett, J.A. and Vitkovsky, J.P. "Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients", *J. of Hydr. Eng., ASCE*, **128**(7), pp.697-711 (2002).
2. Liggett, J. A. and Chen, L. C. "Inverse transient analy-



- sis in pipe networks”, *J. of Hydr. Eng., ASCE* **120**(8): pp.934-954 (1994).
3. Pudar, R.S. and Liggett, J.A. “Leaks in pipe networks”. *J. Hydr. Eng., ASCE*, **118**(7), pp.1031-1046(1992).
  4. Vitkovsky, J.P. and Simpson, A.R. and Lambert, M. F. “Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms”, *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE **126**(4): pp. 262-265 (2000).
  5. Vitkovsky, J.P. and Liggett, J.A. and Simpson, A.R. and Lambert, M.F. “Optimal measurement site locations for inverse transient analysis in pipe networks”, *J. Water Resour Plann Manage.*, **129**(6), pp.480-492 (2003).
  6. Nash, G.A., and Karney, B.W. “Efficient inverse transient analysis in series pipesystems”, *J. Hydr. Engng., ASCE*, **125**(7), pp. 761-764 (1999).
  7. Nixon, W. and Ghidaoui, M.S. “Numerical Sensitivity Study of Unsteady friction in simple systems with external flows”, *J. of Hydr. Eng., ASCE* **133**(7): pp. 736-749 (2007).
  8. Brunone, B. “Transient test-based technique for leak detection in outfall pipes”, *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE **125**(5): pp. 302-306 (1999).
  9. Johnson, L. “Computer , laboratory studies of leak detection using hydraulic transients”, Water resources management in drought or water shortage conditions, Proc., EWRA Symp., pp.119-126 (1995).
  10. Liou, C.P. and Tian, J. “Leak detection, transient flow simulation approach”, *Pipeline Eng.*, **60**, pp.51- 58 (1994).
  11. Lee, P.J and Lambert, M.F and Simpson, A.R. and Vitkovsky , J.P. and Liggett, J. “Experimental verification of the frequency response method for pipeline leak detection”, *J. of Hydr. Research IAHR*, **44**(5): pp.693-707 (2006).
  12. Kim, S.H “Extensive development of leak detection algorithm by impulse response method”, *J. Hydr. Eng* **131**, pp.201-208 (2005).
  13. Mpesha, W. and Gassman, S.L. and Chaudhry, M.H. “Leak detection in pipes by frequency response method.” *J. Of Hydr. Eng.* **127**(2), pp.134-147(2001).
  14. Mpesha, W. and Chaudhry, M.H. and Gassman, S.L. “Leak detection in pipes by frequency response method using a step excitation”. *J. of Hydr. Eng., ASCE*. **40**(1): pp.55-62 (2002).
  15. Covas, D. and Ramos, H. and Almeida, A.B “Standing wave difference method for leak detection in pipeline systems”, *J. of Hydr. Eng., ASCE* . **131**(12): pp.1106-1116. (2005).
  16. Shamloo, H. and Haghghi, A. “Leak detection in pipelines by inverse backward transient analysis.” *J. Hydr. Res.* **47**(3), pp.311-318 (2009).
  17. Shamloo, H. and Haghghi, A. “Leak detection in pipelines based on inverse transient analysis and mixed integer nonlinear programming.” *J. of Iranian Hydr. Association*, **3**(2), PP.42-27(2008).
  18. Chaudhry, M.H. Applied Hydraulic Transients. New York, Van Nostrand Reinhold Company (1987).
  19. Kucienska, B. “Friction relaxation model for fast transient flows” PHD Thesis, Dept. of Mechanical Eng., Univ of Catholica, Louva (2004).
  20. Ghidaoui, M.S. and Mansour, S. “Efficient treatment of varyd-brown unsteady shear in pipe transients”, *J. of Hydr. Eng.* **128**(1): pp.102-112 (2002).
  21. Bergant, A. and Simpson, A.R and Vitkovsky , J. “Developments in unsteady pipe flow friction modelling”, *J. Hydr. Research*, IAHR **39**(3): pp.249-257(2001).
  22. Silva-Araya, W.F. and Chaudhry, M.H. “Computation of energy dissipation in transient flow”, *J. of Hydr. Eng.* **123**(2) pp. 108-115 (1997).
  23. Karney, B.W. “Energy relations in a closed-conduit flow”, *J.Hydr. Eng.*, **116** (10), pp.1180-1196 (1990).
  24. Shamloo, H. and Haghghi, A. “Leak detection and waternetworks calibration by using inverse transient flow analysis”, 8th Iranian Hydr. Conference, Tehran university (2009).

# INVESTIGATION OF UNSTEADY EFFECTS OF FRICTION LOSS AND TRANSIENT FLOW USING 1D ENERGY RELATIONS

**H. Shamloo**(corresponding author)

hshamloo@yahoo.com

**S. M. Mousavi Fard**

mousavifrd@gmail.com

**Dept. of Civil Engineering**

**K.N.Toosi University of Technology**

**A. Haghighi**

ali77h@gmail.com

**Dept. of Civil Engineering**

**Shahid Chamran University**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 1, Page 149-157, Research Note

© Sharif University of Technology

- Received 17 January 2011; received in revised form 6 June 2011; accepted 31 December 2011.

## Abstract

Leaks in pipes and water distribution systems might occur for various reasons, such as poor quality of pipe material, errors in operation and maintenance, corrosion, and internal or external high pressure. As a result, loss of water, environmental problems, extra energy consumption and unnecessary pump capacity could be observed. To avoid all these consequences, it is essential to provide advanced monitoring methods to observe resulting problems and their extent, and then to find and implement solutions for water transportation and distribution systems to reduce loss and increase energy efficiency. Several leak detection methods have been introduced up to now, such as inverse transient analysis, to overcome these problems.

Application of the energy concept to fluid transients in closed conduits leads to an alternative description of unsteady flow behavior. In this interpretation, a transient in a pipe system can be viewed as a sequence of energy transformations, which moves the system from some initial hydraulic conditions to some other final states. During this conversion, mechanical energy is dissipated and

work is done on the fluid. When the rate of flow in a closed conduit is changed, large-scale conversions of mechanical energy often occur, particularly if the pipeline is carrying water or any other slightly compressible liquid. It is obvious that the side-flow volume flux has a marked effect on the unsteady frictional dissipation component of the fluid. Mathematical expressions describing these transient energy transformations are first derived from main principles and then the governing continuity and momentum equations are mathematically manipulated to provide the final set. Those various terms, which must be accounted for in the analysis, include the energy dissipated by fluid friction, the work done at the upstream and downstream ends of the pipe and the kinetic energy carried into and out of the conduit. In this paper, the leakage term is added into continuity and momentum equations and, therefore, the energy relation for the dissipated energy due to leakage could be derived. Then, in order to determine the appropriate condition for modeling the detection methods, based on transient flow simulation, the effects of the time of valve closing in laminar and turbulent flow, with low Reynolds numbers, have been investigated.

The results show that by using lower Reynolds numbers and longer durations of valve closing, appropriate results could be obtained for leak detection. In this manner, not only is the reliability of the results increased, but those sharp fluctuation indemnities caused by the fast transient flow are also avoided.

**Key Words:** Leak, transient flow, valve closing speed, unsteady effects of friction factor.