



بررسی پدیده نشت در سیستم های آبرسانی به روش تحلیل فرکانس جریان ناماندگار

زهرا جمشیدزاده^۱، مسعود تابش^۲

دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران

Email: z_jamshidzadeh@yahoo.com

خلاصه

این مقاله به مکان یابی نشت در سیستم های آبرسانی به روش تحلیل در حوزه فرکانس می پردازد. این روش بر مبنای تولید جریان نوسانی در لوله توسط باز و بسته کردن یک شیر نوسانی در پایین دست لوله و تحلیل پاسخ فرکانس سیستم در یک محدوده فرکانس مشخص قرار دارد. با بررسی تغییراتی که در پاسخ فرکانس سیستم بدون نشت و سیستم نشت دار وجود دارد، می توان موقعیت نشت را شناسایی نمود. در این مقاله روش تحلیل در حوزه فرکانس با منظور نمودن اصطکاک غیر دائمی در لوله ها (که نتایج واقعی تری ارائه می دهد) برای محاسبه نشت در خطوط انتقال بررسی می شود. در ادامه با ارائه یک مثال نمونه روش ارائه شده ارزیابی و نقاط قوت و ضعف آن مشخص می شود. بر اساس نتایج بدست آمده مشخص گردید کمترین مقدار نشتی که با این روش می توان شناسایی نمود حدوداً ۰.۵٪ دبی متوسط می باشد. همچنین این روش برای مقادیر کاربردی ضریب اصطکاک در محدوده ۰.۰۱ تا ۰.۲۵ مناسب می باشد.

کلمات کلیدی: نشت، جریان ناماندگار، اصطکاک غیردائمی، تحلیل فرکانس، سیستم های آبرسانی

مقدمه

امروزه متولیان امور آب در بسیاری از نقاط جهان با چالش روبه رشدی در خصوص تامین آب آشامیدنی مورد نیاز مصرف کنندگان مواجه هستند. عوامل مختلفی در ایجاد این وضعیت نقش دارد مثل: تغییرات آب و هوایی، خشکسالی و رشد جمعیت در اثر مهاجرت به مراکز شهری بزرگ و ... بدلیل محدودیت تصفیه خانه های آب، تامین آب آشامیدنی سالم حتی در نواحی پر آب نیز با مشکلات عدیده ای روبروست. در برخورد با این چالش ها، کاهش هدررفت آب از خطوط انتقال و توزیع می تواند یک راه حل موقت باشد. با توجه به اینکه در بسیاری از شهرهای کشور سیستم آبرسانی فرسوده بوده و از طرفی میزان تلفات ناشی از نشت تا ۵۰ درصد آب تولید شده نیز می رسد (Mahmoodi, 2005)، لزوم توجه بیشتر به مسئله کنترل نشت در صورت ایجاد جریان ناماندگار در شبکه احساس می شود.

در این مقاله روش جدیدی بر پایه تحلیل در حوزه فرکانس با فرض جریان ناماندگار که در مدت عملکرد عادی لوله ها اتفاق می افتد، برای شناسایی نشت در سیستم های آبرسانی ارائه می شود. در تکنیک جدید توسعه یافته در این تحقیق برای شناسایی و تعیین موقعیت نشت در لوله ها، جریان نوسانی دائمی توسط باز و بسته شدن متناوب یک شیر در پایین دست لوله ایجاد شده و در حوزه فرکانسی با استفاده از روش ماتریس انتقال تحلیل می شود.

تعیین محل نشت

توسعه تکنیک های مختلف نشت یابی به اواسط قرن بیستم و در خصوص خطوط انتقال نفت بر می گردد (Covas et al., 2005). نشت یابی با مقایسه داده های دبی و فشار اندازه گیری شده با نتایج حاصل از شبیه سازی انجام می شود. هرگونه پراکندگی در داده های فشار یا دبی، حاکی از شکستگی لوله و یا باز بودن شیر می باشد. در مورد سیستم های آبرسانی، تکنیک های مختلفی برای شناسایی و تعیین موقعیت نشت وجود دارد که به روشهای مشاهده مستقیم و روشهای استنباطی تقسیم بندی می شوند.

روش مشاهده مستقیم بر مبنای بازرسی مشخصه های لوله با مشاهده مستقیم و یا استفاده از ابزارهای مناسب قرار دارد. مهمترین تکنیک های غیر صوتی، مشاهده چشمی، تزریق مواد ردیاب، بازرسی تصویری و ترموگرافی مادون قرمز می باشد. میکروفون زمینی و کرلیتور صوتی از پرکاربردترین تکنیک های صوتی نشت یابی می باشد.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساختها دانشگاه تهران



روش های استنباطی با استفاده از مانیتورینگ پارامترهای لوله یعنی فشار، دبی و درجه حرارت و کاربرد مدل‌های ریاضی بر مبنای داده های جمع آوری شده به شناسایی نشت می پردازد. روش انعکاس نشت (Brunone, ۱۹۹۹)، تفاضلات موج ایستا (Covas et al., 2005)، تحلیل معکوس ناماندگار (Covas, ۲۰۰۳؛ Vitkovsky, ۲۰۰۰؛ Pudar & Liggett, ۱۹۹۲؛ Covas, ۲۰۰۳؛ Lambert, 2002؛ Mpesha, 2001) از جمله روشهای استنباطی برای شناسایی نشت در لوله ها می باشد.

علی رغم وجود تکنیک های مختلف نشت یابی، هیچ کدام از آنها از قابلیت اطمینان بالایی برای نشت یابی در سیستم های بزرگ و پیچیده را ندارند (Covas et al., 2005). در این مقاله روش تحلیل پاسخ فرکانس با منظور نمودن ترم غیر دائمی اصطکاک برای شناسایی و تعیین موقعیت نشت مورد بررسی قرار می گیرد. نقطه قوت این روش نسبت به سایر روشهای ارائه شده، در این است که بر خلاف روشهای موجود که نیاز به اندازه گیری داده های زیاد در نقاط مختلف سیستم دارند، در این روش فقط نیاز به اندازه گیری داده های فشار و دبی در محل شیر می باشد.

روش تحلیل فرکانس

در تحلیل فرکانس هر دو معادله مومنتم و پیوستگی حاکم بر جریان ناماندگار، با فرض تغییرات سینوسی برای دبی و فشار، از بازه زمانی تبدیل به معادلاتی در حوزه فرکانس شده و توابع غیر خطی نظیر ترم اصطکاک و شرایط مرزی غیرخطی، خطی سازی می شود. دو روش موجود برای تحلیل درحوزه فرکانس عبارتند از روش امیدانس (Wylie & Streeter, 1993) و روش ماتریس انتقال (Chaudhry, 1987). روش امیدانس منجر به تولید معادلات جبری طویل شده در حالیکه روش ماتریس انتقال ساده و سیستماتیک می باشد. در این تحقیق روش ماتریس انتقال مورد بررسی قرار می گیرد. ۳ نوع ماتریس انتقال وجود دارد:

۱- ماتریس میدان (F): بیانگر بردار وضعیت در دو مقطع مجاور یک لوله می باشد.

۲- ماتریس نقطه ای (P): بیانگر بردار وضعیت چپ و راست یک ناپیوستگی در لوله می باشد.

۳- ماتریس کل (U): بیانگر بردارهای وضعیت یک انتهای سیستم نسبت به انتهای دیگر آن می باشد.

معادلات دینامیکی جریان ناماندگار در لوله ها، معادلات بقای جرم و مومنتم می باشند که از نظریه انتقال رینولدز مشتق شده است. این معادلات دسته ای از معادلات دیفرانسیل جزئی هیپربولیک بوده که فرم ساده شده آنها با منظور نمودن ترم غیر خطی اصطکاک، عبارتند از (Vitkovsky et al., 2006)؛ (Wylie & Streeter, 1993):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ^2}{2gDA^2} + \frac{K}{gA} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} - a \frac{\partial Q}{\partial x} \right) = 0 \quad (2)$$

Q دبی جریان، H هد پیزومتریک، a سرعت موج، g شتاب ثقل، A سطح مقطع لوله، x فاصله در طول محور لوله، f ضریب اصطکاک دارسی-

وایسباخ و t زمان می باشد. K ضریب اصطکاک Brunone نامیده می شود. این ضریب را می توان بصورت آزمایشگاهی و یا تحلیلی تعیین نمود.

نتایج تحلیلی ارائه شده توسط (Vardy و Brown (۱۹۹۵) به شرح زیر می باشد:

$$K = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{7.41}{\text{Re}^{\log(14.3/\text{Re}^{0.05})}}} \quad (3)$$

Re عدد رینولدز جریان است که با رابطه $\text{Re} = \frac{VD}{\nu}$ محاسبه می شود. ν لزجت سینماتیکی سیال، V سرعت جریان در لوله و D قطر لوله است.

فرض می شود نوسانات دبی و فشار نسبت به زمان سینوسی است. یعنی: $q^* = \text{Re}[q(x)e^{j\omega t}]$ و $h^* = \text{Re}[h(x)e^{j\omega t}]$ که ω فرکانس زاویه ای

بر حسب رادیان بر ثانیه، $j = \sqrt{-1}$ و Re بیانگر بخش حقیقی نوسانات است. q^* و h^* تابعی از زمان t و مسافت x می باشند.

حل همزمان معادله فوق و معادله پیوستگی و فرض تغییرات سینوسی برای نوسانات فشار و دبی معادله زیر برای q^* بدست می آید:

$$\frac{a^2}{gA} \frac{\partial^2 q^*}{\partial x^2} - \frac{(1+K)}{gA} \frac{\partial^2 q^*}{\partial t^2} + \frac{Ka}{gA} \frac{\partial^2 q^*}{\partial x \partial t} - R \frac{\partial q^*}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

با حل معادله فوق ماتریس میدان برای لوله i به طول l_i عبارت است از:

$$F_i = \begin{bmatrix} \frac{\mu - z}{2\mu} e^{(z+\mu)l_i} + \frac{\mu + z}{2\mu} e^{(z-\mu)l_i} & \frac{r}{2\mu} e^{(z+\mu)l_i} - \frac{r}{2\mu} e^{(z-\mu)l_i} \\ \frac{\mu^2 - z^2}{2\mu r} e^{(z+\mu)l_i} - \frac{\mu^2 - z^2}{2\mu r} e^{(z-\mu)l_i} & \frac{\mu + z}{2\mu} e^{(z+\mu)l_i} + \frac{\mu - z}{2\mu} e^{(z-\mu)l_i} \end{bmatrix} \quad (5)$$



در رابطه فوق $\mu = \sqrt{\left(\frac{K\omega j}{2a}\right)^2 - \frac{(1+K)\omega^2 - gAR\omega j}{a^2}}$ و $r = \frac{-gA\omega j}{a^2}$ و $z = -\frac{K\omega j}{2a}$ می باشد.

به ازای مقادیر مختلف ω تغییرات $h_r = \frac{2h_{i+1}^L}{H_0}$ نسبت به $\omega_r = \frac{\omega}{\omega_{th}}$ و به عبارتی دیاگرام واکنش فرکانس سیستم ترسیم می شود. ω_{th} فرکانس تئوریک است که از رابطه زیر تعیین می شود:

$$\omega_{th} = \frac{2\pi}{T_{th}} \quad \left(\frac{rad}{s}\right) \quad \text{و} \quad T_{th} = 4 \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{a_i} \quad (\text{sec}) \quad (6)$$

در رابطه فوق a_i سرعت موج در لوله i ام، l_i طول لوله i ام و T_{th} پریود تئوریک لوله می باشد. ماتریس نقطه ای شیر نوسانی عبارت است از: (Chaudhry, 1987)

$$P'_{ov} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -2H_0 & 1 & 2H_0k \\ Q_0 & 0 & \tau_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

H_0 هد فشار متوسط، k مقدار حرکت شیر، τ_0 متوسط بازشدگی نسبی شیر می باشد. ماتریس نقطه ای نشت عبارت است از: (Mpesha et al., 2001, 2002)

$$P_{lk} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{Q_{lk}}{2h_L} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Q_{lk} دبی نشت و h_L هد پیژومتریک در محل نشت می باشد.

ماتریس کل U از حاصلضرب ماتریس های میدان و نقطه ای بدست می آید:

$$U = F_n P_n \dots F_3 P_3 F_2 P_2 F_1 \quad (9)$$

n : تعداد اجزای متشکله سیستم می باشد.

در صورتیکه از شیر نوسانی برای ایجاد جریان ناماندگار در لوله استفاده شود، با استفاده از ماتریس نقطه ای شیر نوسانی و پیوستگی در شیر، معادلات

زیر بدست می آید: (Chaudhry, 1987)

$$q_{n+1}^L = u_{11} q_1^R + u_{13} \quad (10)$$

$$h_{n+1}^L = u_{21} q_1^R + u_{23} \quad (11)$$

$$q_1^R = -\frac{u_{23} - \frac{2H_0}{Q_0} u_{13} + \frac{2H_0k}{\tau_0} u_{33}}{u_{21} - \frac{2H_0}{Q_0} u_{11} + \frac{2H_0k}{\tau_0} u_{13}} \quad (12)$$

$u_{11}, u_{12}, \dots, u_{33}$ مولفه های ماتریس کل توسعه یافته U می باشد. مقادیر مطلق q_{n+1}^L و h_{n+1}^L مقادیر نوسانات دبی و فشار در شیر می دهد.

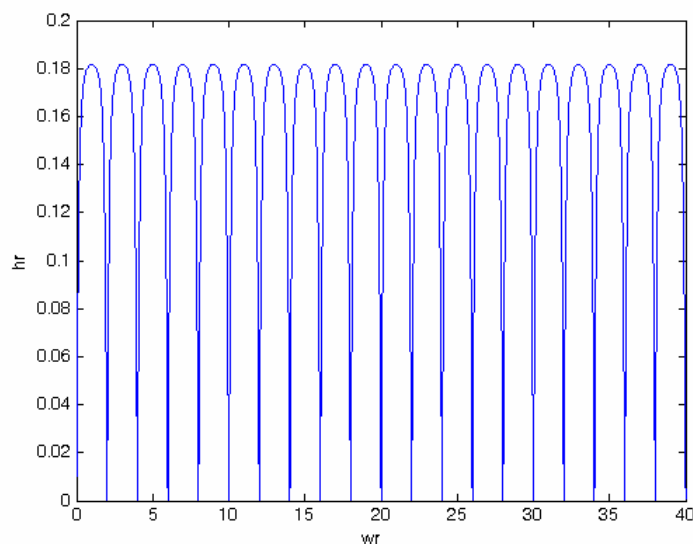
تعیین موقعیت نشت

سیستم مورد بررسی در اینجا متشکل از یک لوله با مشخصات ثابت، یک مخزن با هد ثابت در بالادست و یک شیر نوسانی در پایین دست لوله به منظور ایجاد جریان نوسانی در لوله می باشد. نشت به فاصله x از منبع قرار گرفته است. مشخصات سیستم مورد بررسی عبارتند از: قطر لوله $d = 0.2m$ ، تراز آب در مخزن $H_0 = 50m$ ، جریان در لوله $Q_0 = 0.1m^3/s$ ، مقدار نوسان شیر $k = 0.05$ ، سرعت موج $a = 1000m/s$ و طول لوله $L = 1600m$



شکل ۱- لوله دارای یک نشت

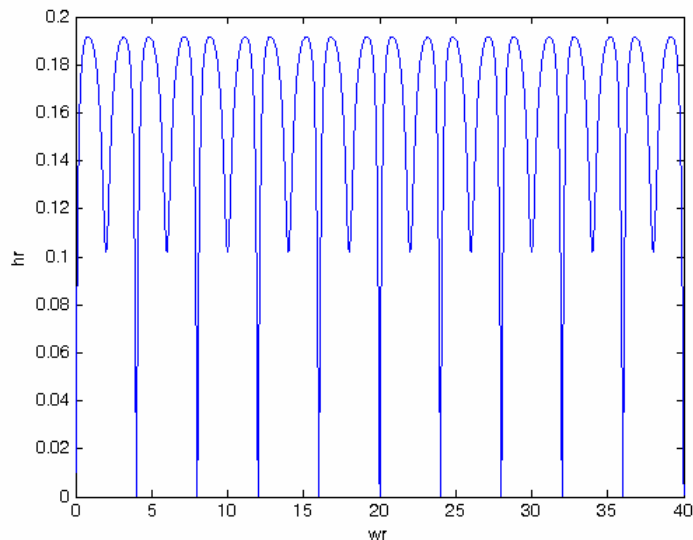
موقعی که سیگنالهای جریان ناماندگار توسط شیر در پایین دست لوله تولید می شود، امواج تولید شده به سمت بالادست لوله حرکت می کنند تا به محل نشت می رسند. در محل نشت بخشی از این امواج بازگشت می نماید. امواج بازگشتی که به مقدار دبی نشت بستگی دارند، در محل شیر اطلاعات لازم در خصوص نشت را می دهند و با تفسیر پاسخ فرکانس کل سیستم می توان موقعیت نشت را تعیین نمود. موج تولید شده در محل شیر، به سمت محل نشت حرکت می کند و بخشی از آن در محل نشت منعکس می شود. زمان انعکاس موج را می توان به صورت $T_L = \frac{2l_L}{a}$ تعریف نمود که l_L فاصله نشت از شیر نوسانی می باشد. این رابطه نشان دهنده وابستگی زمان انعکاس به فاصله نشت از شیر دارد.


 شکل ۲- نوسانات فشار در لوله نشت دار در حالات $\frac{l_L}{L} = 1$ و $\frac{l_L}{L} = 0$

همانطور که در شکل (۲) نیز مشاهده می شود، وقتی نشت در محل شیر قرار دارد، مقدار نوسانات فشار در هارمونی های زوج به صفر میل می کند. همین مسئله در صورت وجود نشت در نزدیک مخزن $\frac{l_L}{L} = 1$ نیز صادق است. در صورتیکه نشت در وسط لوله قرار داشته باشد، یعنی $\frac{l_L}{L} = 0.5$ ، در فرکانس های زوج بصورت $\omega_r^{even} = 2n$ $n = 2, 4, \dots$ مقدار نوسان صفر است. به ازای سایر مقادیر $n = 1, 3, \dots$ مقدار نوسانات فشار عدد ثابتی مطابق شکل (۳) می شود.

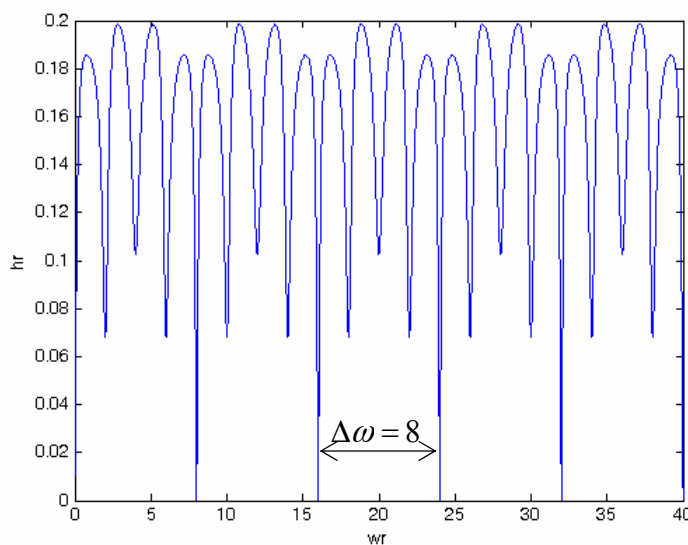
ترم های سینوسی معادلات بدست آمده در بالا به ازای مقادیری غیر از $\frac{l_L}{L} = 0$ و $\frac{l_L}{L} = 1$ و $\frac{l_L}{L} = 0.5$ از معادلات حذف نمی شود. لذا در صورت وجود نشت در سایر نقاط، یک طرح نوسانی در پاسخ فرکانس سیستم ایجاد می شود و با دوره تناوب $\Delta\omega_r^{even}$ که به دوره تناوب بازتاب موج از محل نشت بستگی دارد، تکرار می شود.

$$\Delta\omega_r^{even} = \frac{\omega_L}{\omega_{th}} = \frac{2\pi/T_L}{2\pi/T_{th}} = \frac{T_{th}}{T_L} = \frac{4L/a}{2l_L/a} = \frac{2L}{l_L} \quad (13)$$



شکل ۳ - نوسانات فشار در لوله نشت دار در حالت $\frac{l}{L} = 0.5$

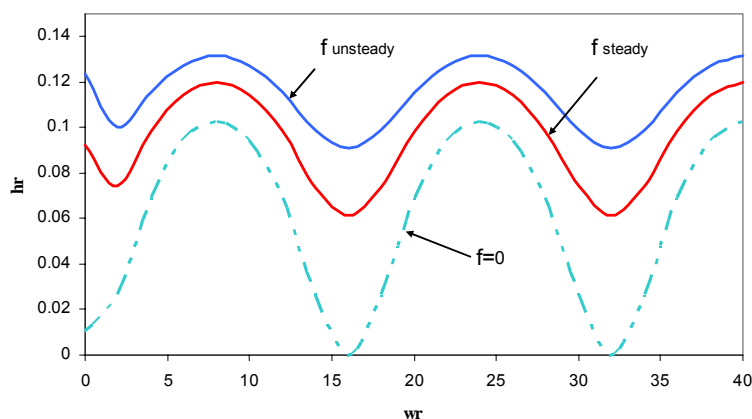
از رابطه فوق می توان برای محاسبه محل نشت در لوله استفاده نمود. همانطور که در شکل روبرو مشاهده می شود، مقدار $\Delta\omega = 8$ می باشد که با جایگزینی در معادله (۱۳) فاصله نشت از شیر ۴۰۰ متر بدست می آید.



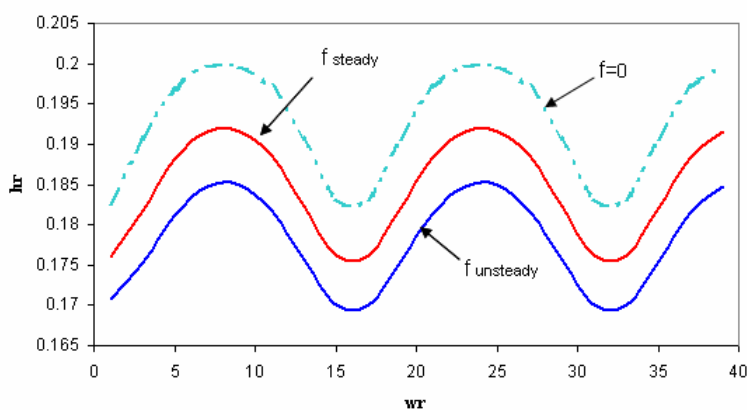
شکل ۴ - پاسخ فرکانس نوسانات فشار لوله برای نشت به فاصله ۴۰۰ متر از شیر

تاثیر ضریب اصطکاک بر دیاگرام پاسخ فرکانس

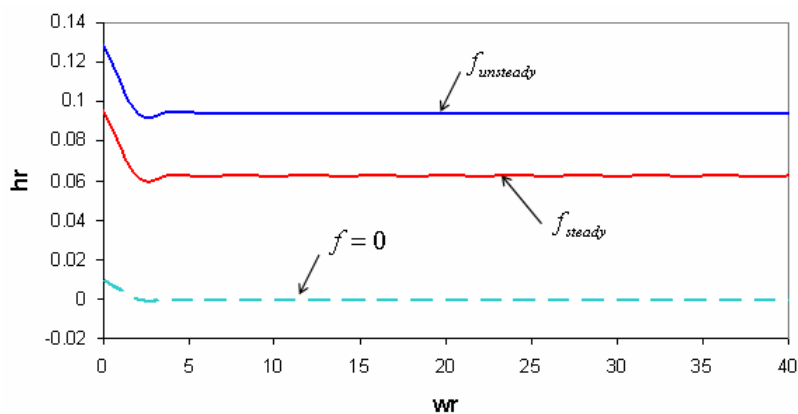
اصطکاک در لوله منجر به افزایش نوسانات در هارمونی های زوج و کاهش نوسانات در هارمونی های فرد می شود. این موضوع برای سیستم تک نشتی معرفی شده در بخش های قبل در اشکال (۵) و (۶) نشان داده شده است. (نشت در فاصله ۲۰۰ متری از شیر قرار دارد). همانطور که مشاهده می شود، اصطکاک تاثیری در میزان $\Delta\omega_r$ ندارد و فقط نوسانات فشار را در هارمونی های زوج و فرد تحت الشعاع قرار می دهد. تاثیر منظور نمودن اصطکاک در لوله سالم مطابق اشکال (۷) و (۸) می باشد. همانطور که مشاهده می شود، تاثیر اصطکاک در هارمونی های فرد نوسانات کمی را شامل می شود.



شکل ۵- افزایش مقدار نوسانات فشار در هارمونی های زوج (لوله تک نشستی)

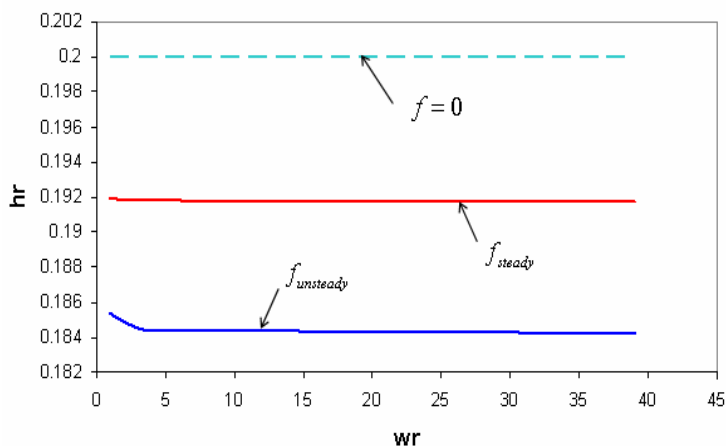


شکل ۶- کاهش مقدار نوسانات فشار در هارمونی های فرد (لوله تک نشستی)



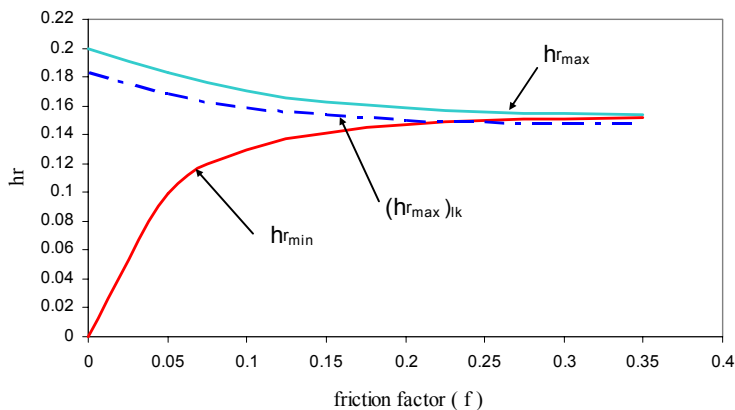
شکل ۷- تغییرات نوسانات فشار در هارمونی های زوج (لوله سالم)

علاوه بر اینکه منظور نمودن ترم اصطکاک دائمی و غیر دائمی در معادله مومنتم، باعث تغییرات در الگوی نوسان می شود، تغییرات ضریب اصطکاک f نیز قابل بررسی است. مقادیر بالای ضریب اصطکاک f منجر به افزایش میزان افت هد در لوله می شود. در این تحقیق ضریب اصطکاک f از ۰,۱ تا مقدار ۰,۳۵ تغییر داده شده و تغییرات مقادیر کمینه و بیشینه نوسانات فشار نسبت به مقادیر f ترسیم شده است.



شکل ۸ - تغییرات نوسانات فشار در هارمونی های فرد (لوله سالم)

با افزایش ضریب اصطکاک همانطور که در شکل (۹) مشهود است، مقادیر $h_{r\max}$ و $(h_{r\max})_{lk}$ کاهش یافته در حالیکه مقدار $h_{r\min}$ و افزایش می یابد. تا زمانی که اختلاف بین $h_{r\max}$ و $(h_{r\max})_{lk}$ وجود داشته باشد، نشت در سیستم قابل شناسایی می باشد.



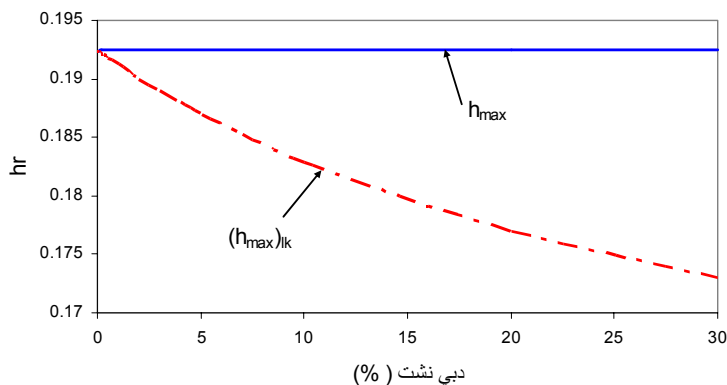
شکل ۹ - تاثیر ضریب اصطکاک بر الگوی نوسان فشار (۱۰ درصد نشت)

با توجه به اینکه ضریب اصطکاک لوله ها در محدوده ۰,۰۱ تا ۰,۰۲۵ می باشد و مطابق شکل فوق در این محدوده همواره اختلاف بین $h_{r\max}$ و $(h_{r\max})_{lk}$ وجود دارد لذا روش تحلیل فرکانس برای مقادیر کاربردی ضریب اصطکاک مناسب می باشد.

تاثیر مقدار دبی نشت بر دیگرام پاسخ فرکانس سیستم

همانطور که در بخش قبل عنوان شد تا زمانی که بین $h_{r\max}$ و $(h_{r\max})_{lk}$ اختلاف وجود داشته باشد نشت در سیستم قابل شناسایی است. به منظور تعیین کوچکترین دبی نشت قابل شناسایی به روش تحلیل فرکانس، مطابق شکل (۱۰) تغییرات $h_{r\max}$ و $(h_{r\max})_{lk}$ به ازای مقادیر مختلف دبی نشت از ۰,۱ درصد دبی متوسط تا ۳۰ درصد دبی متوسط رسم شده است. مطابق شکل با کاهش دبی نشت، $(h_{r\max})_{lk}$ افزایش می یابد در دبی نشت حدود ۰,۵٪ دبی متوسط $h_{r\max}$ و $(h_{r\max})_{lk}$ به مقدار ۰,۱۹۲۴ همگرا می شوند و اختلاف بین آنها صفر می شود. به عبارتی برای نشت های کمتر از این مقدار، روش تحلیل فرکانس قادر به شناسایی نشت نمی باشد. کمترین نشتی که با این روش می توان شناسایی نمود حدودا ۰,۵٪ دبی متوسط می باشد.

لازم به تذکر است که مقدار حداقل نشت قابل شناسایی مشخص شده در این قسمت مربوط به هر نشت منفرد است و نه مقدار کل نشت های تجمعی در لوله. باید توجه داشت که در این روش محل هر نشتی به صورت مجزا بر اساس ماتریس نقطه ای مربوطه بررسی می شود. بنابراین ممکن است چندین نشت مجزا در لوله وجود داشته باشد که بدلیل کم بودن دبی نشت قابل شناسایی با این روش نباشد ولیکن در مجموع مقدار نشت بزرگی را ایجاد نمایند.

شکل ۱۰- تاثیر دبی نشت بر الگوی نوسان فشار ($f = 0.02$)

نتیجه گیری و پیشنهادات

نشت یابی در لوله ها برای جلوگیری از تلفات آب، امنیت و کنترل مسائل زیست محیطی لازم است. روش های موجود برای نشت یابی محدودیت هایی داشته و فقط برای شرایط معینی قابل استفاده است. در این مقاله روش تحلیل پاسخ فرکانس برای نشت یابی و تعیین موقعیت نشت استفاده شده است. این روش برای مقادیر کاربردی ضریب اصطکاک محدوده ۰,۰۱ تا ۰,۰۲۵ که در سیستم های واقعی نیز وجود دارد، قابل کاربرد است. با توجه به اینکه در این روش نیاز به اندازه گیری حجم زیادی از داده ها در نقاط مختلف نمی باشد، خطای حاصل از این روش در مقایسه با روشهایی مبتنی بر تحلیل در بازه زمانی کمتر است. این روش قابل استفاده برای شناسایی نشت تا مقدار ۰,۵ درصد دبی متوسط می باشد. این روش قابلیت تعیین محل نشت در سیستم های واقعی را بر مبنای مقایسه دیاگرام پاسخ فرکانس سیستم بدون نشت محاسبه شده با داده های اندازه گیری شده در سیستم موجود را دارد. روش ارائه شده در این مقاله فقط در مورد سیستم های شاخه ای بررسی شده و نیاز به توسعه این روش برای سیستم های حلقه ای وجود دارد. شیر نوسانی مورد استفاده در این روش در انتهای لوله قرار گرفته است. بررسی امکان نصب لوله در هر نقطه از شبکه می تواند در تحقیقات بعدی مد نظر قرار گیرد. همچنین این روش فقط بصورت عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است و تاکنون مطالعه ای روی سیستم های واقعی انجام نشده است. بنابراین اعتبار این روش در سستم های واقعی باید مورد مطالعه قرار گیرد.

مراجع

- 1- Brunone, B. (1999) , Transient Test-Based Technique for Leak Detection in Outfall Pipes , *ASCE, Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(5), 302-306.
- 2- Chaudhry M. H. (1987), *Applied hydraulic transients*, 2 nd Ed., Litton Educational/Van Norstrand Reinhold Co., New York
- 3- Covas, D., Ramos, H. and Almeida, B. (2005), Standing Wave Difference Method for Leak Detection in Pipeline Systems, *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, 131(12), 1106-1116.
- 4- Covas, D. (2003) , *Inverse Transient Analysis for Leak Detection and Calibration of Water Pipe Systems, Modeling Special Dynamic Effects*, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, UK.
- 5- Lee, P., Vitkovsky, P., Lambert, F., Simpson, A. and Liggett, J. (2005) , Frequency Domain Analysis for Detecting Pipeline Leaks , *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, 131(7), 596-604.
- 6- Mahmoodi, S. (2005), A Summary of Practical and Scientific Water Losses Reduction Activities in Tehran Mega City During the 3rd Iranian Development Program (2000-2004) , *Leakage 2005 - Conference Proceedings*
- 7- Pudar R. and Liggett J. (1992), Leaks in Pipe Networks , *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, 118(7), 1031-1046.
- 8- Vitkovsky, J., Bergant, A., Simpson, A. and Lambert, F. (2006), Systematic Evaluation of one-Dimensional Unsteady Friction, Models in Simple Pipelines, *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.132, No.7, 696-708
- 9 - Mpesha, W. , Gassman, S., Chaudhry, M. (2002) , Leak detection in pipes by frequency response method using a step excitation , *ASCE, Journal of Hydraulic Research*, 40(1), 55-62.
- 10- Mpesha, W. , Gassman, S., Chaudhry, M. (2001) , Leak detection in pipes by frequency response method , *ASCE, Journal of Hydraulic Research*, 127(2), 134-147.
- 11- Wylie E.B. and Streeter V.L. (1993) , *Fluid Transients in Systems* , Prentice-Hall Inc., New Jersey , USA.