

## ارزیابی فرمول اریفیس در نشت یابی سیستم‌های آبرسانی با در نظر گرفتن ترم غیر دائمی اصطکاک

زهرا جمشیدزاده<sup>1</sup> و مسعود تابش<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد آب دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

<sup>2</sup> دانشیار و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت ها دانشکده مهندسی عمران

پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت 87/3/27، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده 89/6/6، تاریخ تصویب 90/1/27)

### چکیده

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. بدلیل محدودیت منابع 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 شبکه توزیع می تواند یک راه حل باشد. در این تحقیق 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. نتایج تحقیق نشان می دهد که حضور نشت، در لوله شکل پاسخ فرکانس فشار را تغییر داده، مقدار نوسانات فشار در هارمونی های زوج افزایش و در هارمونی های فرد کاهش می یابد. از این خاصیت برای تعیین موقعیت نشت در لوله استفاده می شود. قابلیت اطمینان سایر روش های نشت یابی موجود، بستگی به حجم زیاد داده های اندازه گیری شده در نقاط مختلف سیستم دارد که خیلی آسان نیست. روش ارائه شده در این تحقیق فقط نیاز به اندازه گیری داده های فشار و دبی در محل شیر دارد. با استفاده از این روش علاوه بر شناسایی و تعیین موقعیت نشت، مقدار دبی نشت نیز قابل اندازه گیری است که از مزایای این روش نسبت به سایر روش های موجود می باشد. در ادامه با ارائه چند مثال نمونه روش ارائه شده ارزیابی و نقاط قوت آن مشخص شده است.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم‌های آبرسانی، نشت یابی، اریفیس، ترم غیر دائمی اصطکاک

### مقدمه

تلفات آب در شبکه ها می گردد. همچنین برای تعیین برخی از مولفه های نشت از مقادیر تخمینی به دست آمده از تحقیقات و تجربیات مشابه در سایر کشور ها استفاده می شود. روش بالانس سالیانه آب و آنالیز جریان حداقل شبانه و آنالیز مولفه‌ای نشت از جمله این روشهاست [1]. دیدگاه دوم به بررسی موقعیت و چگونگی توزیع نشت در شبکه ها می پردازد [2]. با پیشرفت های صورت گرفته در زمینه اطلاعات مکانی GIS و کاربرد آنها در سامانه های آبرسانی، اخیرا از این فن آوری نیز در زمینه برآورد تلفات آب و نشت استفاده شده است [3-4].

هدررفت آب از منابع تا مصرف کننده ها (خطوط انتقال) بین 15 تا 40 درصد کل آب تولید شده است. هر چند در پاره ای از موارد تا 80 درصد نیز گزارش شده است [5]. هدررفت آب مشتمل بر چندین نوع هزینه است:

نشت یابی و کنترل نشت در شبکه های آبرسانی و خطوط انتقال آب نه فقط از دیدگاه اقتصادی (هزینه تصفیه آب، انتقال آن به شبکه توزیع و ...) بلکه بدلیل محدودیت منابع آب مقوله بسیار مهمی می باشد. از طرفی در خطوط لوله ای که مایعات پرمخاطره ای نظیر گاز، روغن و فاضلاب را منتقل می کنند، نشت می تواند محیط زیست را آلوده نماید. وجود نشت در شبکه، ظرفیت هیدرولیکی شبکه را پایین آورده و قابلیت اطمینان سیستم را تحت الشعاع قرار می دهد. همچنین نشت خسارات زیادی به ابنیه و جاده ها وارد می سازد.

به طور کلی در زمینه تلفات آب و نشت دو دیدگاه وجود دارد. دیدگاه اول اختصاص به محاسبه اجزای آب بحساب نیامده و نشت در شبکه های توزیع دارد که با استفاده از داده های میدانی، اقدام به محاسبه نشت و

نقاط مختلف سیستم دارند، در این روش فقط نیاز به اندازه گیری داده های فشار و دبی در محل شیر می باشد. اهداف این تحقیق عبارتند از:

- بررسی اثرات نشت بر پاسخ فرکانس جریان نوسانی دائمی در لوله ها
- توسعه روشی برای شناسایی نشت در لوله ها بر مبنای پاسخ فرکانس فشار که نسبت به سایر روش های نشت یابی آسان تر و کم هزینه تر می باشد.
- بررسی تاثیر اصطکاک غیردائمی بر پاسخ فرکانس سیستم و نشت
- ارزیابی فرمولاسیون اریفیس نشت با توجه به مکانیزم های مختلف شکست لوله

### 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 امپدانس [14] و روش ماتریس انتقال [15]. روش امپدانس 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. سه نوع ماتریس انتقال وجود دارد:

- ماتریس میدان (F): بیانگر بردار وضعیت در دو مقطع مجاور یک لوله می باشد.
- ماتریس نقطه ای (P): بیانگر بردار وضعیت چپ و راست یک ناپیوستگی در لوله می باشد.
- 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 عبارتند از [7 و 14]:

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

- هزینه مستقیم آب هدررفته، نشت یابی و تعمیر لوله ها
  - هزینه های اجتماعی مرتبط با عدم رضایت مصرف کنندگان و ضررهای ایجاد شده برای آنها (هزینه هایی که به آسانی کمی نمی شود).
- توسعه تکنیک های مختلف نشت یابی به واسطه قرن بیستم و در خصوص خطوط انتقال نفت بر می گردد. 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 روش های مشاهده مستقیم و روش های 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. مهم ترین تکنیک های غیر صوتی، مشاهده چشمی، تزریق مواد ردیاب، بازرسی تصویری و ترموگرافی مادون قرمز می باشد. میکروفون زمینی و کرولیتور صوتی از پرکاربردترین تکنیک های صوتی نشت یابی می باشند [1].

روش های استنباطی با استفاده از مانیتورینگ پارامترهای لوله یعنی فشار، دبی و درجه حرارت و کاربرد مدل های ریاضی بر مبنای داده های جمع آوری شده به شناسایی نشت می پردازند. روش انعکاس نشت [6]، تفاضلات موج ایستا [1]، تحلیل معکوس ناماندگار [7,5,11,8,12] و روش تحلیل پاسخ فرکانس [9-10] از جمله روش های استنباطی برای شناسایی نشت در لوله ها می باشند.

علی رغم وجود تکنیک های مختلف نشت یابی، هیچ کدام از آنها قابلیت اطمینان بالایی برای نشت یابی در سیستم های بزرگ و پیچیده را ندارند [1]. در این تحقیق 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 روش های ارائه شده، در این است که بر خلاف روش های موجود که نیاز به اندازه گیری داده های زیاد در

زمان  $t$  و مسافت  $x$  می‌باشند. با جایگذاری مقادیر فوق در معادله قبلی مقادیر  $q$  و  $h$  مطابق زیر به دست می‌آید:

$$q = c_1 \sinh \mu x + c_2 \cosh \mu x \quad (10)$$

$$h = -\frac{a^2 \mu}{jAg\omega} (c_1 \cosh \mu x + c_2 \sinh \mu x) \quad (11)$$

فرض می‌شود که در مقطع  $i$ ام (در  $x=0$ ) مقادیر  $q = q_i^R$  و  $h = h_i^R$  باشند. همچنین در مقطع  $(i+1)$ ام (در  $x=l_i$ ) مقادیر  $q = q_{i+1}^L$  و  $h = h_{i+1}^L$  باشند. با جایگزینی این مقادیر در معادله (10) و (11) ماتریس میدان برای لوله  $i$  به طول  $l_i$  عبارت است از [14]:

$$F_i = \begin{bmatrix} \cosh(\mu_i l_i) & -\frac{1}{Z_c} \sinh(\mu_i l_i) \\ -Z_c \sinh(\mu_i l_i) & \cosh(\mu_i l_i) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mu = \sqrt{-\frac{\omega^2}{a^2} + \frac{jgA\omega R}{a^2}} \quad (13)$$

$$Z_c = \frac{\mu_i a_i^2}{j\omega g A_i} \quad (14)$$

$\omega$  فرکانس زاویه ای،  $\vartheta$  ویسکوزیته سینماتیکی سیال و  $Z_c$  امیدانس مشخصه و  $j$  عدد مختلط می‌باشد.

### ماتریس نقطه ای شیر نوسانی

دبی لحظه ای و دبی متوسط عبوری از شیر به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$Q_{n+1}^L = C_d A_v (2gH_{n+1}^L)^{0.5} \quad (15)$$

$$Q_0 = (C_d A_v)_0 (2gH_0)^{0.5} \quad (16)$$

$C_d$ : ضریب تخلیه جریان و  $A_v$ : سطح باز شده شیر می‌باشند. از تقسیم دو رابطه فوق داریم:

$$\frac{Q_{n+1}^L}{Q_0} = \frac{\tau}{\tau_0} \left(\frac{H_{n+1}^L}{H_0}\right)^{0.5} \quad (17)$$

$\tau$  و  $\tau_0$  به ترتیب بازشدگی نسبی لحظه ای و متوسط بازشدگی نسبی شیر می‌باشند. یعنی:

$$\tau = (C_d A_v) / (C_d A_v)_s \quad (18)$$

$$\tau_0 = (C_d A_v)_0 / (C_d A_v)_s \quad (19)$$

اندیس  $s$  بیان کننده شرایط دائمی جریان می‌باشد. مقدار بازشدگی نسبی شیر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\tau = \tau_0 + \tau^* \quad (20)$$

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

$Q$  دبی جریان (m<sup>3</sup>/s)،  $H$  هد پیزومتریک (m)،  $a$  سرعت موج (m/s)،  $g$  شتاب ثقل (m/s<sup>2</sup>)،  $A$  سطح مقطع لوله (m<sup>2</sup>)،  $x$  فاصله در طول محور لوله (m)،  $t$  زمان (sec)،  $f$  ضریب اصطکاک دارسی-وایسباخ و  $D$  قطر لوله می‌باشد.

در تحلیل فرکانس، مقادیر لحظه ای  $Q$  و  $H$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Q = Q_0 + q^* \quad (3)$$

$$H = H_0 + h^* \quad (4)$$

$Q_0$  و  $H_0$  به ترتیب مقادیر متوسط دبی و هد فشار و  $q^*$  و  $h^*$  مقدار نوسانات دبی و فشار نسبت به مقدار متوسط می‌باشند.

با جایگزینی معادلات فوق در معادلات پیوستگی و مومنتم و ساده سازی معادلات به دست آمده داریم:

$$\frac{\partial h^*}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial q^*}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial h^*}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial q^*}{\partial t} + Rq^* = 0 \quad (6)$$

$$R = \frac{32\vartheta}{gD^2 A} \quad (7)$$

### جریان لایه ای

$$R = \frac{fQ_0}{2gDA^2} \quad (8)$$

### جریان آشفته

با حذف  $h^*$  از معادلات فوق داریم:

$$\frac{\partial^2 q^*}{\partial x^2} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 q^*}{\partial t^2} + \frac{gAR}{a^2} \frac{\partial q^*}{\partial t} \quad (9)$$

فرض می‌شود که نوسانات دبی و فشار نسبت به زمان سینوسی است که در عمل، اغلب با تقریب قابل قبولی این فرض صحیح است. یعنی:

$$h^* = \text{Re} [h(x)e^{j\omega t}] \quad \text{و} \quad q^* = \text{Re} [q(x)e^{j\omega t}]$$

فرکانس زاویه ای بر حسب رادیان بر ثانیه،  $j = \sqrt{-1}$  و  $\text{Re}$  بیانگر بخش حقیقی نوسانات است.  $q^*$  و  $h^*$  تابعی از

می شود. در این بخش ماتریس نقطه ای نشت در لوله ها با توجه به انواع مختلف مکانیزم های شکست در مورد بررسی قرار گرفته می گیرد و نتایج به دست آمده با فرمولاسیون ارائه شده در بخش های قبلی مقایسه می شود.

تحقیقات انجام شده توسط محققین مختلف نشان داده که نشت در لوله با فشار به توان  $N$  بستگی دارد که مقدار  $N = 0.5 - 1.5$  متغیر است [1]. با فرض اینکه نشت از نوع اریفیس باشد، مشابه با شیر نوسانی دبی لحظه ای و دبی متوسط نشت عبارتند از:

$$Q_{lk} = C_d A_{orf} (2gH_{n+1}^L)^N \quad (27)$$

$$Q_{0lk} = (C_d A_{orf})_0 (2gh_{lk})^N \quad (28)$$

$C_d$ : ضریب تخلیه جریان،  $A_{orf}$ : سطح مقطع نشت و  $h_{lk}$ : هد فشار در محل نشت در شرایط دائمی جریان متناظر با دبی  $Q_0$  می باشند. در صورتیکه از اصطکاک لوله صرف نظر شود  $h_{lk} = H_0$  است.

مشابه قبل با تقسیم دو رابطه فوق و ساده سازی معادله زیر حاصل می شود:

$$h_{n+1}^L = \frac{h_{lk}}{NQ_{0lk}} Q_{lk} - \frac{h_{lk}k}{N\tau_{0lk}} \quad (29)$$

معادله فوق به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$Q_{lk} = \frac{Nh_{n+1}^L Q_{0lk}}{h_{lk}} + \frac{kQ_{0lk}}{\tau_{0lk}} \quad (30)$$

اگر از تلفات در محل نشت صرف نظر شود  $h_{n+1}^R = h_{n+1}^L$  است. همچنین از معادله پیوستگی داریم:

$$Q_{lk} = q_{n+1}^L - q_{n+1}^R \quad (31)$$

دو معادله فوق زیر به فرم ماتریسی تبدیل می شود:

$$\begin{Bmatrix} q \\ h \end{Bmatrix}_{n+1}^R = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{NQ_{0lk}}{h_{lk}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ h \end{Bmatrix}_{n+1}^L + \begin{Bmatrix} -\frac{Q_{0lk}k}{\tau_{0lk}} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (32)$$

لذا ماتریس نقطه ای توسعه یافته برای نشت عبارت است از:

$$P_{lk}' = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{NQ_{0lk}}{h_{lk}} & -\frac{Q_{0lk}k}{\tau_{0lk}} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$\tau^*$ : مقدار نوسانات بازشدگی نسبت به مقدار متوسط آن می باشد.

معادله (17) را می توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$(1 + \frac{q_{n+1}^{*L}}{Q_0}) = (1 + \frac{\tau^*}{\tau_0})(1 + \frac{h_{n+1}^{*L}}{H_0})^{0.5} \quad (21)$$

اگر حرکت شیر سینوسی فرض شود، در این صورت  $\tau^* = \text{Re}(ke^{j\omega t})$  تعریف می شود که  $k$  مقدار حرکت شیر می باشد. ساده سازی معادله (21) به معادله زیر می انجامد:

$$h_{n+1}^L = \frac{2H_0}{Q_0} q_{n+1}^L - \frac{2H_0k}{\tau_0} \quad (22)$$

با توجه به اینکه  $h_{n+1}^R = 0$  است معادله فوق به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$h_{n+1}^R = h_{n+1}^L - \frac{2H_0}{Q_0} q_{n+1}^L + \frac{2H_0k}{\tau_0} \quad (23)$$

همچنین از معادله پیوستگی داریم:

$$q_{n+1}^R = q_{n+1}^L \quad (24)$$

دو معادله فوق به صورت زیر به فرم ماتریسی تبدیل می شود:

$$\begin{Bmatrix} q \\ h \end{Bmatrix}_{n+1}^R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2H_0}{Q_0} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ h \end{Bmatrix}_{n+1}^L + \begin{Bmatrix} 0 \\ \frac{2H_0k}{\tau_0} \end{Bmatrix} \quad (25)$$

بنابراین ماتریس نقطه ای توسعه یافته برای شیر نوسانی عبارت است از [11]:

$$P_{ov}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\frac{2H_0}{Q_0} & 1 & \frac{2H_0k}{\tau_0} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$H_0$ : هد فشار متوسط،  $k$ : مقدار حرکت شیر و  $\tau_0$ : متوسط بازشدگی نسبی شیر می باشد.

## ماتریس نقطه ای نشت

محاسبات مربوط به نشت در لوله ها با فرض نشت از نوع اریفیس که تابع فشار با توان 0/5 می باشد، انجام می شود. استفاده از این فرض در صورت وجود فقط یک نشت در لوله صحیح است ولیکن در عمل شکستگی های با مقاطع و اشکال مختلف در طول لوله به وجود می آید که منجر به ایجاد خطا در محاسبه نشت با فرمول فوق الذکر

Re عدد رینولدز جریان است که با رابطه  $Re = \frac{VD}{\nu}$  محاسبه می شود.  $\nu$  لزجت سینماتیکی سیال است. مشابه قبل با حل همزمان معادله فوق و معادله پیوستگی و فرض تغییرات سینوسی برای نوسانات فشار و دبی، ماتریس میدان برای لوله  $i$  به طول  $l_i$  عبارت است از:

$$F_i = \begin{bmatrix} Ae^{(z+\mu)l_i} + Be^{(z-\mu)l_i} & \frac{r}{2\mu} e^{(z+\mu)l_i} - \frac{r}{2\mu} e^{(z-\mu)l_i} \\ \frac{\mu^2 - z^2}{2\mu r} (e^{(z+\mu)l_i} - e^{(z-\mu)l_i}) & Be^{(z+\mu)l_i} + Ae^{(z-\mu)l_i} \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$z = -\frac{K\omega j}{2a} \quad (42)$$

$$\mu = \sqrt{\left(\frac{K\omega j}{2a}\right)^2 - \frac{(1+K)\omega^2 - gAR\omega j}{a^2}} \quad (43)$$

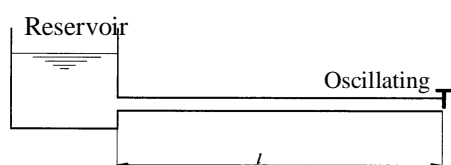
$$r = \frac{-gA\omega j}{a^2} \quad (44)$$

$$A = \frac{\mu - z}{2\mu} \quad (45)$$

$$B = \frac{\mu + z}{2\mu} \quad (46)$$

### کاربرد تحلیل فرکانس برای نشت یابی لوله سالم (بدون 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.



شکل 1: شماتیک سیستم مورد مطالعه.

مشخصات سیستم مورد بررسی عبارتند از: قطر لوله  $d = 0.2m$ ، تراز آب در مخزن  $H_0 = 50m$ ، جریان در لوله  $Q_0 = 0.1m^3/s$ ، سرعت موج  $a = 1000m/s$ ، طول لوله  $L = 1600m$  و مقدار نوسان شیر  $k = 0.05$

### واکنش فرکانس

ماتریس کل  $U$  از حاصلضرب ماتریس های میدان و نقطه ای به دست می آید:

$$U = F_n P_n \dots F_3 P_3 F_2 P_2 F_1 \quad (34)$$

$n$ : تعداد اجزای متشکله سیستم می باشد.

در صورتی که 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 [11]:

$$q_{n+1}^L = u_{11} q_1^R + u_{13} \quad (35)$$

$$h_{n+1}^L = u_{21} q_1^R + u_{23} \quad (36)$$

$$q_1^R = -\frac{u_{23} - \frac{2H_0}{Q_0} u_{13} + \frac{2H_0 k}{\tau_0} u_{33}}{u_{21} - \frac{2H_0}{Q_0} u_{11} + \frac{2H_0 k}{\tau_0} u_{13}} \quad (37)$$

$u_{11}, u_{12}, \dots, u_{33}$ : 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 باشند.

### اصطکاک غیر دائمی

آزمایش ها نشان داده است که تلفات در مدت زمان وضعیت ناماندگار جریان بزرگتر از مقدار پیش بینی شده توسط فرمولاسیون اصطکاک دائمی داری و ایسباخ است که دلیل آن تغییرات سریع در پروفیل سرعت می باشد. با توجه به اینکه ترم اصطکاک در معادله مومنتم ظاهر می شود، با منظور نمودن ترم غیر خطی اصطکاک، معادله مومنتم را می توان به صورت زیر بازنویسی نمود [7]:

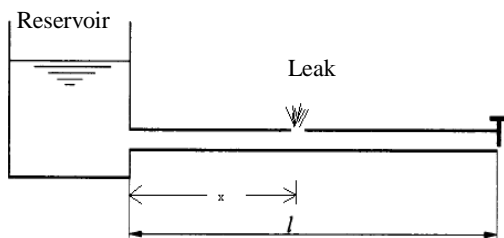
$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ^2}{2gDA^2} + \frac{K}{gA} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} - a \frac{\partial Q}{\partial x} \right) = 0 \quad (38)$$

$K$  ضریب اصطکاک *Brunone* نامیده می شود. این ضریب را می توان بصورت آزمایشگاهی و یا تحلیلی تعیین نمود. نتایج تحلیلی ارائه شده به شرح زیر می باشد [16]:

$$K = \frac{\sqrt{C^*}}{2} \quad (39)$$

$$C^* = \begin{cases} 0.0476 & \text{جریان دائمی} \\ 7.41 & \text{جریان ناماندگار} \\ \text{Re}^{\log(14.3 / \text{Re}^{0.05})} & \end{cases} \quad (40)$$

می باشد. نشت به فاصله  $x$  از منبع قرار گرفته است. مقدار نوسانات فشار در بالادست شیر نوسانی در صورت وجود نشت در لوله برابر است با [15]:



شکل 3: لوله دارای یک نشت.

$$h_2^L = \frac{2H_0 k / \tau_0}{\left( \frac{2H_0}{Q_0} \frac{u_{11L}}{u_{21L}} - 1 \right)} \quad (49)$$

با صرف نظر کردن از اثر اصطکاک در معادلات ماتریس انتقال، ماتریس انتقال کل برای لوله با یک نشت به صورت زیر نوشته می شود:

$$U_L = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{l_2 \omega}{a}\right) & -\frac{jgA}{a} \sin\left(\frac{l_2 \omega}{a}\right) \\ -\frac{ja}{gA} \sin\left(\frac{l_2 \omega}{a}\right) & \cos\left(\frac{l_2 \omega}{a}\right) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & -\frac{Q_{0k}}{2H_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{l_1 \omega}{a}\right) & -\frac{jgA}{a} \sin\left(\frac{l_1 \omega}{a}\right) \\ -\frac{ja}{gA} \sin\left(\frac{l_1 \omega}{a}\right) & \cos\left(\frac{l_1 \omega}{a}\right) \end{bmatrix} \quad (50)$$

$l_1$  فاصله محل نشت از مخزن بالادست،  $l_2$  فاصله محل نشت از شیر نوسانی و  $Q_{0k}$  دبی نشت می باشد.

با استفاده از نسبت بدون بعد  $\omega_r = \frac{\omega}{\omega_{th}}$  و روابط مثلثاتی مولفه های ماتریس  $U$  به صورت زیر ساده می شوند:

$$u_{11L} = \cos\left(\frac{\pi}{2} \omega_r\right) + j \frac{Q_{L0} a}{2gAH_0} \times \left\{ \sin\left(\frac{\pi}{2} \omega_r\right) \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{l_L}{L} \omega_r\right) - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} \omega_r\right) \sin\left(\pi \frac{l_L}{L} \omega_r\right) \right\} \quad (51)$$

$$u_{21L} = -j \frac{a}{gA} \sin\left(\frac{\pi}{2} \omega_r\right) + \frac{Q_{L0} a^2}{2g^2 A^2 H_0} \times \left\{ \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} \omega_r\right) \sin\left(\pi \frac{l_L}{L} \omega_r\right) - \cos\left(\frac{\pi}{2} \omega_r\right) \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{l_L}{L} \omega_r\right) \right\} \quad (52)$$

با منظور نمودن ماتریس انتقال کلی لوله و ماتریس نقطه ای شیر نوسانی، ارتباط بین بردارهای وضعیت در محل مخزن و بالادست شیر بصورت زیر نوشته می باشد:

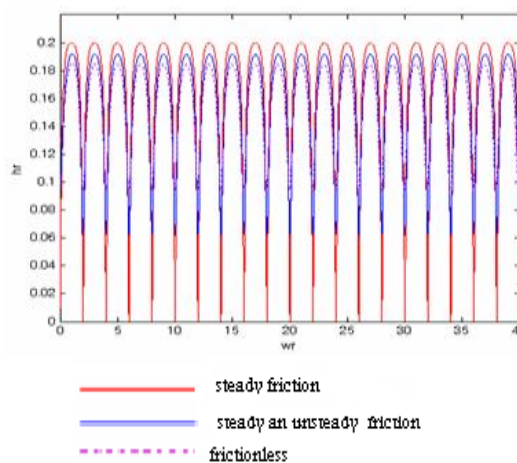
$$\begin{Bmatrix} q \\ h \\ 1 \end{Bmatrix}_2^L = P_{ov}' U' \begin{Bmatrix} q \\ h \\ 1 \end{Bmatrix}_1^R \quad (47)$$

$U'$  ماتریس کل توسعه یافته است بطوریکه:

$$u_{13} = u_{23} = u_{31} = 0, \quad u_{33} = 1$$

با توجه به اینکه در بالادست، مخزن با هد ثابت وجود دارد. لذا:  $h_1^R = 0$  و بنابراین مقدار نوسانات فشار در بالادست شیر برابر است با:

$$h_2^L = \frac{2H_0 k / \tau_0}{\left( \frac{2H_0}{Q_0} \frac{u_{11}}{u_{21}} - 1 \right)} \quad (48)$$



شکل 2: مقایسه نوسانات فشار در لوله در حالات مختلف.

در سیستم های واقعی اثرات اصطکاک در محاسبه ماتریس انتقال باید منظور شود. در صورت منظور نمودن اثرات غیردائمی اصطکاک در معادلات ماتریس انتقال، نوسانات فشار در فرکانس های فرد افزایش یافته و در فرکانس های زوج کاهش ناچیزی دارد.

همان طور که در شکل (2) نیز مشاهده می شود، وجود اصطکاک در لوله ها باعث کاهش نوسانات فشار در فرکانسهای فرد و افزایش آن در فرکانس های زوج می شود. این نوسانات اضافی بدلیل انعکاس امواج فشاری در محل نشت ایجاد می شود.

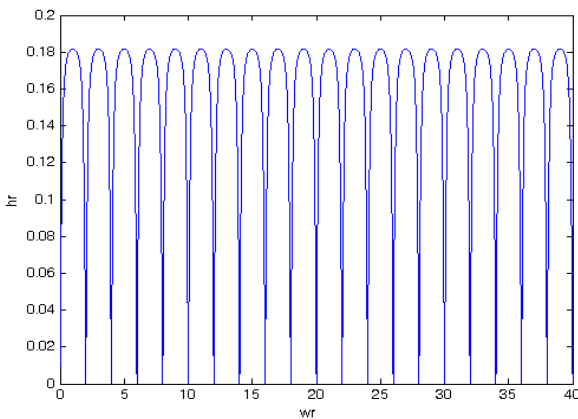
### لوله های تک نشتی

سیستم مورد بررسی در این بخش مطابق شکل (3)

مشخص نمود. در اینجا نیز نوسانات اضافی در لوله نشت دار نسبت به لوله سالم هم در فرکانس‌های زوج و هم در فرکانس‌های فرد وجود دارد و مشاهده می‌شود که به دلیل انعکاس امواج فشاری در محل نشت، نوسانات فشار در فرکانس‌های فرد کاهش و فرکانس‌های زوج افزایش می‌یابد.

### تعیین موقعیت نشت

همان‌گونه که در اشکال قبل مشاهده شد، حضور نشت در لوله، شکل دیاگرام پاسخ فرکانس سیستم را با افزایش نوسانات فشار در هارمونی‌های زوج تغییر می‌دهد. موقعی که سیگنال‌های جریان ناماندگار توسط شیر در پایین دست لوله تولید می‌شود، امواج تولید شده به سمت بالادست لوله حرکت می‌کند تا به محل نشت می‌رسد. در محل نشت بخشی از این امواج بازگشت می‌نماید. امواج بازگشتی که به مقدار کمی نشت بستگی دارند، در محل شیر اطلاعات لازم در خصوص نشت را می‌دهند و با تفسیر پاسخ فرکانس کل سیستم می‌توان موقعیت نشت را تعیین نمود.



شکل 5: نوسانات فشار در لوله نشت دار در حالات  $\frac{l_L}{L} = 0$  و

$$\frac{l_L}{L} = 1$$

موج تولید شده در محل شیر، به سمت محل نشت حرکت می‌کند و بخشی از آن در محل نشت منعکس می‌شود. زمان انعکاس موج را می‌توان به صورت  $T_L = \frac{2l_L}{a}$  تعریف نمود که  $l_L$  فاصله نشت از شیر نوسانی می‌باشد. این رابطه نشان دهنده وابستگی زمان انعکاس به فاصله نشت از شیر دارد. در صورتی که نشت

به ازای مقادیر زوج  $\omega_r$ ، مقدار  $\sin(\frac{\pi}{2}\omega_r^{even}) = 0$  می‌شود و لذا معادله (50) به صورت زیر ساده می‌شود:

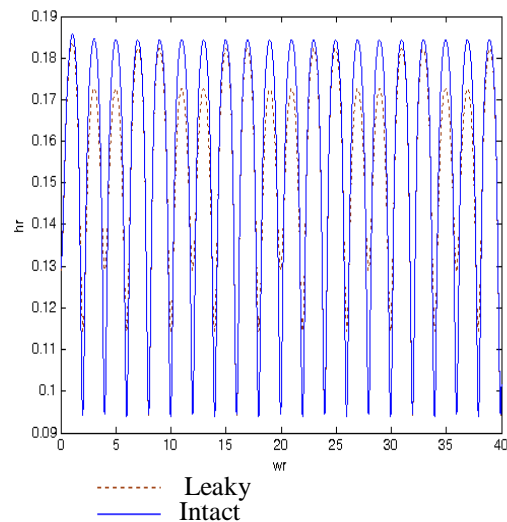
$$h_2^L = \frac{2H_0 k / \tau_0}{M / N} \quad (53)$$

$$M = \frac{2H_0}{Q_0} - j \frac{Q_{L0}}{2Q_0} \sin(\frac{l_L}{L} \pi \omega_r^{even}) + \quad (54)$$

$$\frac{Q_{L0} a^2}{2g^2 A^2 H_0} \sin^2(\frac{\pi}{2} \frac{l_L}{L} \omega_r^{even})$$

$$N = - \frac{Q_{L0} a^2}{2g^2 A^2 H_0} \sin^2(\frac{\pi}{2} \frac{l_L}{L} \omega_r^{even}) \quad (55)$$

در سیستم‌های واقعی، ترم اصطکاک دائمی و غیر دائمی باید منظور شود. وجود اصطکاک در سیستم، منجر به کاهش نوسانات فشار در هارمونی‌های فرد و افزایش نوسانات در هارمونی‌های زوج می‌شود. این موضوع در شکل (4) نشان داده شده است.



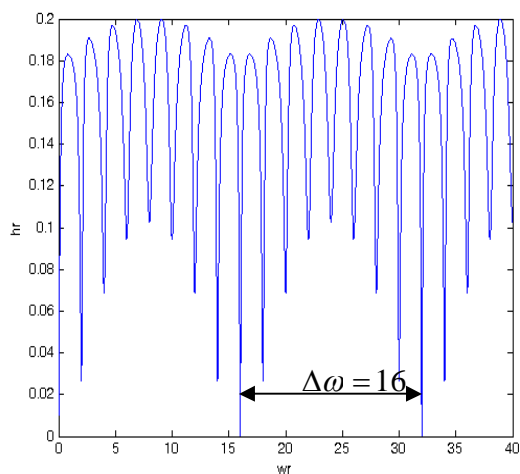
شکل 4: مقایسه نوسانات فشار در لوله نشت دار و لوله سالم (اصطکاک دائمی و غیر دائمی).

مقایسه نوسانات فشار در لوله نشت دار با لوله سالم نشان دهنده نوسانات اضافی در لوله نشت دار نسبت به لوله سالم هم در فرکانس‌های زوج و هم در فرکانس‌های فرد می‌باشد. مشاهده می‌شود که وجود نشت در لوله باعث کاهش نوسانات فشار در فرکانس‌های فرد و افزایش نوسانات فشار در فرکانس‌های زوج می‌شود. این نوسانات اضافی بدلیل انعکاس امواج فشاری در محل نشت ایجاد می‌شود. این موضوع در مرجع [10] نیز بیان شده است. از طریق این تغییرات می‌توان محل نشت را در لوله

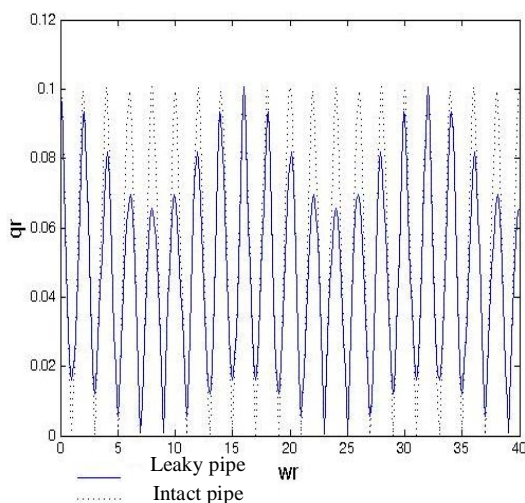
می توان به صورت  $T_L = \frac{2l_L}{a}$  تعریف نمود که  $l_L$  فاصله نشت از شیر نوسانی می باشد.

$$\Delta\omega_r^{even} = \frac{\omega_L}{\omega_{th}} = \frac{2\pi/T_L}{2\pi/T_{th}} = \frac{T_{th}}{T_L} = \frac{4L/a}{2l_L/a} = \frac{2L}{l_L} \quad (56)$$

از رابطه فوق می توان برای محاسبه محل نشت در لوله استفاده نمود. به عنوان مثال در صورتی که نشت به فاصله 200 متر از شیر قرار داشته باشد، پاسخ فرکانس سیستم مطابق شکل (7) خواهد بود. همانطور که از شکل نیز مشخص است،  $\Delta\omega_r^{even} = 16$  می باشد که با استفاده از رابطه (56) نیز فاصله نشت از شیر 200 متر به دست می آید.



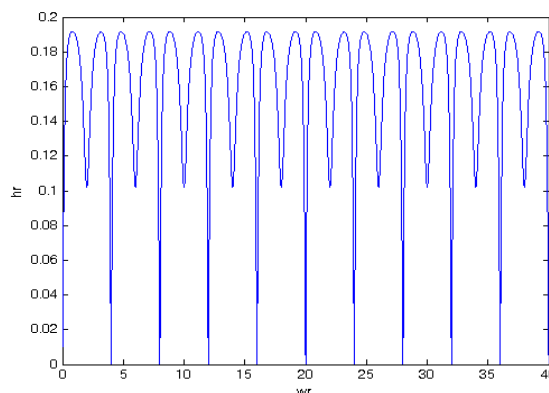
شکل 7: پاسخ فرکانس لوله برای نشت به فاصله 200 متر از شیر.



شکل 8: نوسانات دبی در لوله نشت دار در مقایسه با لوله سالم (لوله بدون اصطکاک).

در محل شیر قرار گرفته باشد:  $\frac{l_L}{L} = 0$  و بنابراین  $\sin(\frac{l_L}{L}\pi\omega_r^{even}) = 0$  با جایگزینی در معادله (49) آنگاه:  $h_2^L = 0$ . بنابراین وقتی نشت در محل شیر قرار دارد، مقدار نوسانات فشار در کلیه 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. این موضوع در شکل (5) نیز مشاهده می شود.

در صورتی که نشت در وسط لوله قرار داشته باشد، یعنی  $\frac{l_L}{L} = 0.5$ ، تنها در فرکانس های زوجی که بصورت  $\omega_r^{even} = 2n$   $n = 2, 4, \dots$  تعریف می شود  $\sin(\frac{\pi}{2}\frac{l_L}{L}\omega_r^{even}) = 0$  است. به ازای سایر مقادیر  $\omega_r^{even} = 2n$   $n = 1, 3, \dots$  مقدار نوسانات فشار عدد ثابتی مطابق شکل (6) می شود.



شکل 6: نوسانات فشار در لوله نشت دار در حالات

$$\frac{l_L}{L} = 0.5$$

نتیجه ای که از مباحث قبلی می توان گرفت این است که الگوی منظم افزایش نوسانات فشار در هارمونی های زوج، ترم های سینوسی معادلات (53) و (54) را شکل می دهد. با توجه به اینکه این ترم های سینوسی تابعی از موقعیت نشت نسبت به شیر می باشند، 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 شوند. لذا در صورت وجود نشت در سایر نقاط، یک الگوی نوسانی در پاسخ فرکانس سیستم ایجاد می شود که با دوره تناوب  $\Delta\omega_r^{even}$  که به دوره تناوب بازتاب موج از محل نشت بستگی دارد، تکرار می شود. همان گونه که قبلا اشاره شد، زمان انعکاس موج را

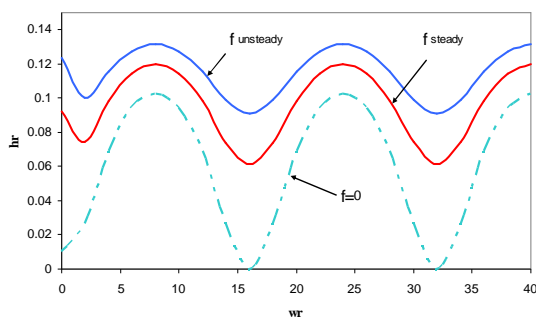


$$SSE = 1.388 \times 10^{-9}, \quad R = 0.999$$

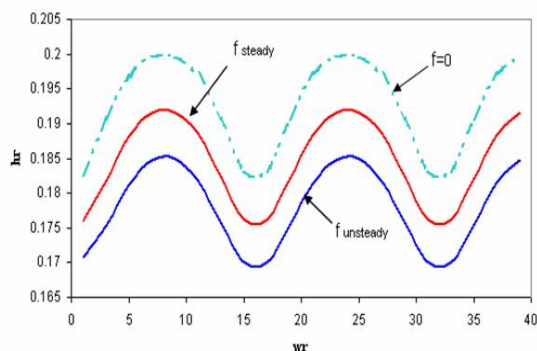
$q_{\min}$  حداقل نوسان دبی در دیاگرام نوسانات دبی است.  $SSE$  خطای حداقل مربعات و  $R$  ضریب برازش منحنی می باشد. برای تعیین معادله فوق، به ازای مقادیر مختلف دبی نشت، حداقل نوسان دبی تعیین شده و با استفاده از Matlab 7 معادله درجه سه حاکم بر نوسانات تعیین شده است.

### تأثیر ضریب اصطکاک بر دیاگرام پاسخ فرکانس سیستم

همان گونه که در مباحث قبلی نیز نشان داده شد، 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 (9) و (10) نشان داده شده است (نشت در فاصله 200 متری از شیر قرار دارد).



شکل 9: افزایش نوسانات در هارمونی های زوج (لوله تک نشتی).



شکل 10: کاهش نوسانات در هارمونی های فرد (لوله تک نشتی).

همان طور که در اشکال فوق مشاهده می شود، اصطکاک تأثیری در میزان  $\Delta\omega_r$  ندارد و فقط نوسانات فشار را در هارمونی های زوج و فرد تحت الشعاع قرار می دهد.

### تعیین دبی نشت

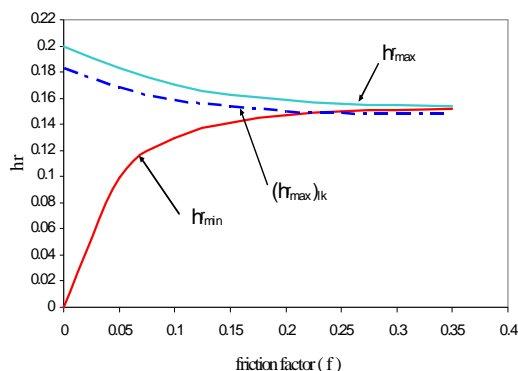
پس از تعیین موقعیت نشت در سیستم هیدرولیکی، تعیین دبی نشت از اهمیت ویژه ای برخوردار است. برای بررسی این مسئله سیستم شکل (3) را در نظر بگیرید. دیاگرام نوسانات دبی در سیستم مورد مطالعه با فرض نشت در فاصله 200 متری از شیر نوسانی مطابق شکل (8) می باشد. با استفاده از نمودار نوسانات دبی نیز می توان برای تعیین موقعیت نشت استفاده نمود. همانطور که در شکل نیز مشخص شده است  $\Delta\omega = 16$  بوده که با جایگزینی در معادله (56) محل نشت در 200 متری شیر به دست می آید.

مقایسه این نمودار با نمودار نوسانات فشار نشان می دهد که بر خلاف نوسانات فشار که در هارمونی های زوج گره ایجاد می شود، در دیاگرام نوسانات دبی، در هارمونی های فرد گره ایجاد می شود. به عبارت دیگر در هارمونی هایی که نوسانات فشار در محل شیر بیشینه است، نوسانات دبی کمینه است و برعکس. (تذکر: منظور از گره نقطه ای است که در آن میزان نوسانات پارامتر مورد نظر حداقل باشد).

یک روش تعیین دبی نشت در سیستم، استفاده از دیاگرام نوسانات دبی و تعیین معادله حاکم بر این نوسانات می باشد. در این تحقیق، به ازای مقادیر ثابت هد مخزن و ضریب اصطکاک لوله، نوسانات دبی به ازای مقادیر مختلف دبی نشت ترسیم شد. هارمونی مربوط به پیک نوسانات دیاگرام تعیین گردید. مشاهده شد که پیک نوسانات دبی با تغییرات دبی نشت حساسیت چندانی ندارد در حالیکه حداقل نوسانات مربوط به این هارمونی (یعنی  $q_{\min}$ ) با تغییر دبی نشت، تغییرات محسوسی دارد. بر این اساس معادله حاکم بر دبی نشت تابعی از  $q_{\min}$  تقریب زده می شود. به ازای مقادیر مختلف دبی نشت، مقدار  $q_{\min}$  تعیین شده و منحنی های مختلفی با استفاده از Matlab 7 بر داده های حاصل برازش شد. از بین معادلات مختلف، معادله درجه سه با تقریب قابل قبولی به عنوان معادله حاکم بر دبی نشت در لوله تعیین گردید. به عنوان مثال برای شکل (8)، معادله درجه سه حاکم بر نوسانات دبی با صرف نظر نمودن از اصطکاک لوله عبارت است از:

$$q_{\text{leak}} = 198 q_{\min}^3 + 8.26 q_{\min}^2 + 1.054 q_{\min} - 5.167 \times 10^{-5} \quad (57)$$

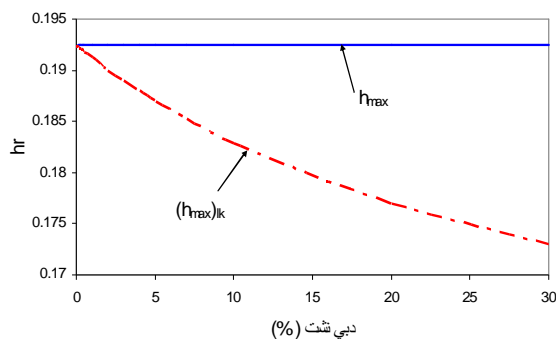
دارد، لذا روش تحلیل فرکانس برای مقادیر کاربردی ضریب اصطکاک مناسب می باشد.



شکل 13: تاثیر اصطکاک بر الگوی نوسان (10 درصد نشت).

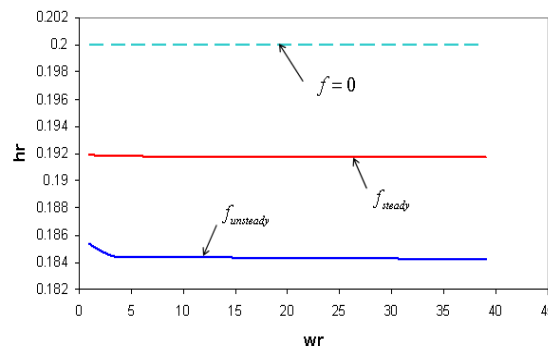
### تاثیر مقدار دبی نشت بر دیاگرام پاسخ فرکانس سیستم

همانطور که در بخش قبل عنوان شد تا زمانی که بین  $h_{rmax}$  و  $(h_{rmax})_{lk}$  اختلاف وجود داشته باشد نشت در سیستم قابل شناسایی است. به منظور تعیین کوچکترین دبی نشت قابل شناسایی به روش تحلیل فرکانس، مطابق شکل (14) تغییرات  $h_{rmax}$  و  $(h_{rmax})_{lk}$  به ازای مقادیر مختلف دبی نشت از 0/1 درصد دبی متوسط تا 30 درصد دبی متوسط رسم شده است. مطابق شکل با کاهش دبی نشت،  $(h_{rmax})_{lk}$  افزایش می یابد در دبی نشت حدود 0/5% دبی متوسط  $h_{rmax}$  و  $(h_{rmax})_{lk}$  به مقدار 0/1924 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.

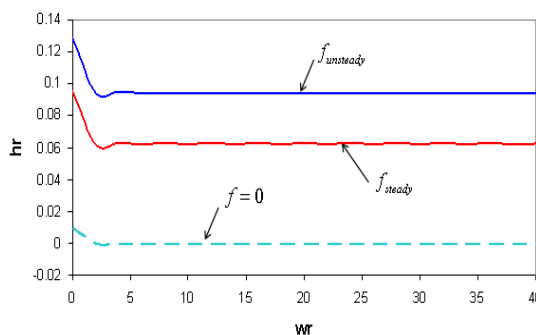


شکل 14: تاثیر دبی نشت بر الگوی نوسان ( $f = 0.02$ ).

کمترین نشتی که با این روش می توان شناسایی نمود حدودا 0.5% دبی متوسط می باشد. لازم به تذکر



شکل 11: تغییر نوسانات فشار در هارمونی های زوج (لوله سالم).



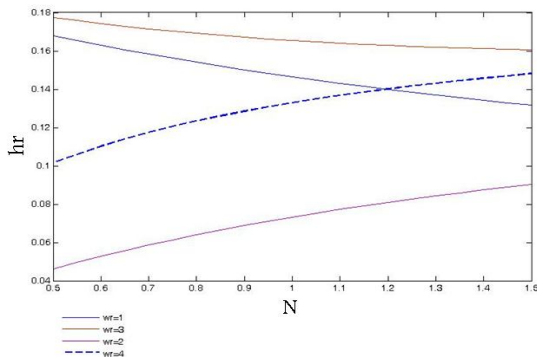
شکل 12: تغییر نوسانات فشار در هارمونی های فرد (لوله سالم).

تاثیر منظور نمودن اصطکاک در لوله سالم مطابق اشکال (11) و (12) می باشد. همانطور که مشاهده می شود، تاثیر اصطکاک در هارمونی های فرد نوسانات کمی را شامل می شود. 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 0/01 تا مقدار 0/025 تغییر داده شده و تغییرات مقادیر کمینه و بیشینه نوسانات فشار نسبت به مقادیر  $f$  ترسیم شده است.

با افزایش ضریب اصطکاک همانطور که در شکل (13) مشهود است، مقادیر  $h_{rmax}$  و  $(h_{rmax})_{lk}$  کاهش یافته در حالیکه مقدار  $h_{rmin}$  و افزایش می یابد. تا زمانی که اختلاف بین  $h_{rmax}$  و  $(h_{rmax})_{lk}$  وجود داشته باشد، نشت در سیستم قابل شناسایی می باشد.

با توجه به اینکه ضریب اصطکاک لوله ها در محدوده 0/01 تا 0/025 می باشد و مطابق شکل فوق در این محدوده همواره اختلاف بین  $h_{rmax}$  و  $(h_{rmax})_{lk}$  وجود

فشار افزایش می یابد در حالیکه در هارمونی های فرد، این نوسانات کاهش می یابد.



شکل 16: تغییرات نوسانات فشار در لوله تک نشتی در هارمونی های اول تا چهارم به ازای مقادیر مختلف  $N$ .

### کاربرد روش تحلیل فرکانس در سیستم های واقعی

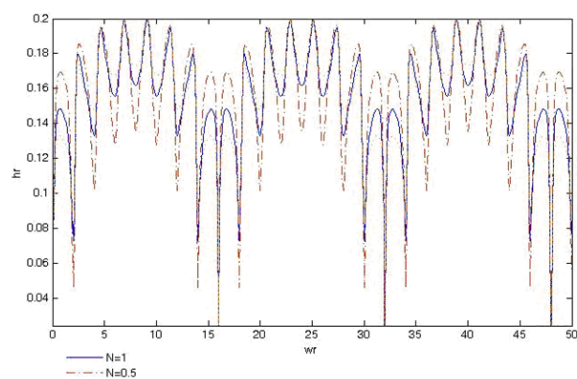
روش تحلیل فرکانس معرفی شده در این تحقیق قابل استفاده برای مکان یابی نشت در سیستم های واقعی نیز می باشد. برای این منظور، شیری در پایین دست سیستم مورد بررسی به صورت تناوبی باز و بسته می شود تا جریان نوسانی دائمی در سیستم تولید شود. مدت زمان عملیات باز و بسته کردن شیر بستگی به سرعت موج و طول لوله دارد. پس از اینکه سیگنال موج تولید شده از محل شیر تا انتهای سیستم حرکت کرده و سپس برگشت، باید مقادیر دبی و فشار در محل شیر اندازه گیری شود. بدین ترتیب پاسخ کل سیستم به دست می آید. به عبارت دیگر، زمان عملکرد شیر نباید کمتر از  $\sum 4 \frac{L_i}{a_i}$  به ازای هر فرکانس باشد.

در محل شیر، مقدار نوسانات دبی و فشار ثبت می شود. این دستورالعمل در یک بازه فرکانس با تغییر دوره زمانی نوسانات شیر تکرار می شود. با استفاده از داده های تجربی اندازه گیری شده، نمودار پاسخ فرکانس سیستم ترسیم می شود. نمودار حاصل را نمودار پاسخ فرکانس تجربی سیستم می نامند. نمودار پاسخ فرکانس سیستم بدون نشت با دانستن پارامترها و هندسه سیستم و با استفاده از روش ارائه شده در این تحقیق مدل می شود. این نمودار را نمودار پاسخ فرکانس محاسباتی می نامند. با مقایسه این دو نمودار، حضور نشت در سیستم بررسی می شود. باید توجه داشت که روش ارائه شده در این تحقیق، بر مبنای

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 هر محل 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 به دلیل کم بودن دبی نشت قابل شناسایی با این روش نباشد ولیکن در مجموع مقدار نشت بزرگی را ایجاد نمایند.

### بررسی توان $N$ بر نوسانات فشار

به منظور بررسی تاثیر توان  $N$  در نوسانات فشار، سیستم شکل (15) را در نظر بگیرید. مشخصات سیستم مشابه قبل بوده و نشت در فاصله 200 متری از شیر نوسانی قرار دارد. با افزایش توان  $N$  نوسانات فشار در هارمونی های زوج افزایش می یابد. علت این است که موقعی که سیگنالهای جریان ناماندگار توسط شیر در پایین دست لوله تولید می شود، امواج تولید شده به سمت بالادست لوله حرکت می کند تا به محل نشت می رسد. در محل نشت بخشی از این امواج بازگشت می نماید مقدار امواج بازگشتی به دبی نشت بستگی دارد و با توجه به اینکه دبی نشت نیز تابع توان  $N$  است، لذا با افزایش توان  $N$  نرخ نوسانات فشار در هارمونی های زوج افزایش می یابد. در هارمونی های فرد نوسانات فشار با افزایش توان  $N$  کاهش می یابد. این موضوع در شکل (15) مشهود است.



شکل 15: مقایسه نوسانات فشار در لوله تک نشتی به ازای مقادیر مختلف  $N$ .

در شکل (16) تغییرات نوسانات فشار در چهار هارمونی اول سیستم تک نشتی، به ازای تغییر در مقادیر  $N$  نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، در هارمونی های زوج، با افزایش  $N$  نوسانات

الگوی نوسان فشار در محل شیر مشخص می باشد. این الگوی نوسان با مقادیر حداکثر نوسان فشار در هارمونی‌های فرد و مقادیر حداقل نوسان فشار در هارمونی‌های زوج همراه است. مقدار نوسانات بستگی به اثرات اصطکاک لوله دارد. تاثیر اصطکاک در مقدار نوسانات فشار در هارمونی‌های زوج و فرد متفاوت است. مشخص شده است که اصطکاک باعث افزایش نوسانات در هارمونی‌های زوج و کاهش نوسانات در هارمونی‌های فرد می‌شود. در تکنیک ارائه شده در این تحقیق، ترم غیر خطی اصطکاک نیز مورد بررسی قرار گرفته و اثرات آن بر الگوی نوسانات فشار مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده شده است که در این حالت، نوسانات فشار در هارمونی‌های زوج نسبت به حالت بدون اصطکاک افزایش می‌یابد در حالیکه در هارمونی‌های فرد، نوسانات فشار کاهش می‌یابد. این روش برای مقادیر کاربردی ضریب اصطکاک محدوده 0.01 تا 0.025 که در سیستم‌های واقعی نیز وجود دارد، قابل کاربرد است.

این روش قابلیت تعیین محل نشت در سیستم‌های واقعی را دارد. برای این منظور کافی است دیاگرام پاسخ فرکانس سیستم بدون نشت مدل سازی شده به روش ارائه شده در این تحقیق را با دیاگرام پاسخ فرکانس حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده در محل شیر را با یکدیگر مقایسه نمود. در صورت وجود اختلاف بین این دو نمودار، وجود نشت در سیستم اثبات می‌شود.

تولید جریان ناماندگار مصنوعی با استفاده از باز و بسته کردن شیر در سیستم قرار دارد. لذا در صورت استفاده از این روش، به منظور جلوگیری از تاثیر نوسانات مصرف بر الگوی نوسانات دبی و فشار، نیاز به ایزوله نمودن منطقه مورد بررسی قبل از ایجاد جریان نوسانی در سیستم می‌باشد.

در صورتی که نوسانات ایجاد شده توسط شیر هارمونیک نباشد، می‌توان با استفاده از سری فوریه، تابع نوسان را به مجموعه‌ای از نوسانات هارمونیک تجزیه نموده و به ازای هر تابع هارمونیک مقادیر ماتریس نقطه‌ای و ماتریس میدان را محاسبه کرد.

تذکر این نکته لازم است که در سیستم‌های واقعی، جریان نوسانی را می‌توان با باز و بسته نمودن شیر آتش‌نشانی که دبی قابل توجهی را انتقال می‌دهند ایجاد نمود. باز و بسته نمودن شیرهای مصرف با توجه به اینکه تاثیر چندانی در نوسانات دبی و فشار ندارند، قابل استفاده در این روش نمی‌باشد. به عبارتی تغییر مصرف نمی‌تواند نوسانات مورد نیاز در این روش را ایجاد نماید.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق به توسعه روش جدیدی برای شناسایی و تعیین موقعیت نشت در سیستم‌های آبرسانی با استفاده از داده‌های جریان ناماندگار پرداخته شده است. در جریان نوسانی دائمی که توسط باز و بسته کردن شیر نوسانی در پایین دست سیستم ایجاد می‌شود، پاسخ فرکانس سیستم در محل شیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## مراجع

- 1- Tabesh, M., Honari, H. R. and Mirsepasi, A. (2008), *Guideline for determine and detect the effective parameters of Unaccounted for Water (UFW)*. Publication No. 308-A, The deputy of the President for Effective Supervisory.
- 2 - Covas, D., Ramos, H. and Almeida, B. (2005). "Standing Wave Difference Method for Leak Detection in Pipeline Systems." *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 12, PP. 1106-1116.
- 3 - Tabesh, M., Delavar, M. R. and Delkhah, A. (2010). "Use of geospatial information system for renovation and replacement of water distribution systems." *International Journal of Environmental Engineering and Technology (IJEST)*, Vol. 7, No. 1, PP. 47-58.
- 4 - Tabesh, M., Bostanian, M. B. and Delavar, M. R. (2004). "Application of integrated GIS and hydraulic models for unaccounted for water studies in water distribution systems." *I.J. of Engineering Science and Technology*, Vol. 15, No. 2, PP. 133-145, (in Farsi).
- 5 - Covas, D., Graham, N., Maksimovic, C., Kapelan, Z., Savic, D. and Walters, G. (2003), "An Assessment of the Application of Inverse Transient Analysis for Leak Detection: Part II - Collection and Application of

- 
- Experimental Data*", Proc. Computer Control for Water Industry (CCWI), London (UK), C. Maksimovic, D. Butler and F. A. Memon, eds., PP. 71-78.
- 6 - Brunone, B. (1999). "Transient Test-Based Technique for Leak Detection in Outfall Pipes." *ASCE, Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 125, No. 5, PP. 302-306.
- 7 - 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, PP. 696-708.
- 8 - Pudar, R. and Liggett, J. (1992). "Leaks in Pipe Networks." *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 7, PP. 1031-1046.
- 9 - Mpesha, W., Gassman, S. and Chaudhry, M. (2002), "Leak detection in pipes by frequency response method using a step excitation." *ASCE, Journal of Hydraulic Research*, Vol. 40, No. 1, PP. 55-62.
- 10 - Mpesha, W., Gassman, S. and Chaudhry, M. (2001). "Leak detection in pipes by frequency response method." *ASCE, Journal of Hydraulic Eng.*, Vol. 127, No. 2, PP. 134-147.
- 11 - Shamloo, H. and Haghghi, A. (2009), "Leak detection in pipelines by inverse backward transient analysis." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 47, No. 3, PP. 311 – 318.
- 12 - Shamloo, H. and Haghghi, A. (2010). "Optimum leak detection and calibration of pipe networks by inverse transient analysis." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48, No. 3, PP. 371 – 376.
- 13 - Lee, P., Vitkovsky, P., Lambert, F., Simpson, A. and Liggett, J. (2005). "Frequency Domain Analysis for Detecting Pipeline Leaks." *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 7, PP. 596-604.
- 14 - Wylie, E.B., and Streeter, V.L., (1993), *Fluid Transients in Systems*, Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA.
- 15 - Chaudhry, M. H. (1987), *Applied hydraulic transients*, 2nd Ed., Litton Educational/ Van Norstrand Reinhold Co., New York.
- 16 - Vardy, A. E. and Brown, J. M. B. (1995). "Transient, Turbulent, Smooth pipe friction." *ASCE, Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 4, PP. 578-592.
-