

طراحی و شبیه‌سازی دو روش پایش خط لوله به جهت تشخیص نشت

مجید معاونیان^۱، آرش خرم^۲

مشهد، بلوار وکیل آباد، پردیس دانشگاه فردوسی

دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

khorram_arash@yahoo.com

چکیده

مساله نشت‌یابی در خطوط لوله از لحاظ حفظ مواد با ارزش، یکپارچگی خط لوله و مسایل جانی و زیست محیطی حایز اهمیت زیادی است. آنچه تاکنون در کشور برای حل این مشکل انجام شده مبتنی بر تعدادی از روشهای پایش سخت افزاری بوده است. در این میان روشهای پایش برخط، مبتنی بر داده‌های هیدرولیکی پایین‌دست و بالادست خط لوله مغفول مانده است. در این مقاله دو روش نشت‌یاب برخط بر مبنای بالانس جرمی طراحی تفصیلی شده و شبیه‌سازی می‌گردد. نتایج حاکیست که استفاده از آنها در خطوط لوله قادر است حساسیت به تشخیص نشت را از مرتبه‌ی روز به مرتبه دقیقه بیاورد.

واژه‌های کلیدی: خط لوله، نشت‌یابی، مدل هیدرولیک گذرا، شبیه‌سازی، بالانس جرمی

مقدمه

یکی از مرقون به صرفه ترین روشهای انتقال مواد استفاده از شبکه خطوط لوله است. در کشور ما چند ده هزار کیلومتر خطوط لوله اصلی انتقال فرآورده‌های نفتی، گاز و آب وجود دارد. بسیاری از خطوط عمر بالایی دارند و شبکه های جدیدتر مثل عمده خطوط انتقال گاز - که جوانتر هستند - به مرور و به رغم انواع نگهداری‌های پیشگیرانه در معرض استهلاک، خوردگی و آسیب هستند. بنابراین با در نظر گرفتن این مسایل، وقوع نشت در خطوط لوله اصلی انتقال فرآورده‌های نفتی، گاز و آب امری محتمل و حتی قابل انتظار است.

^۱ - دانشیار دانشگاه

^۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد

روشهای متنوعی با قابلیت‌های مختلف برای نشت‌یابی وجود دارد. به طور معمول این روشها را به دو دسته‌ی عمده تقسیم می‌کنند. این دو دسته عبارتند از روشهای مبتنی بر اثرات خارجی نشت (یا سخت‌افزاری)، و روشهای پایش محاسباتی خط لوله^۱ (یا نرم‌افزاری) [۱].

روشهای پایش محاسباتی در جهان پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته است. ایده‌های مختلفی برای حل این مساله مطرح شده است. اما استفاده از بالانس جرمی [۲]، روشهای بر پایه‌ی تصمیم‌گیری آماری [۳] [۴] [۵] و استفاده از مدل هیدرولیک گذرا [۶] [۷] [۸] از جمله مهمترین آنها میباشد.

متأسفانه مسأله نشت‌یابی در کشور ما کمتر مورد توجه قرار گرفته است. "آموزش و تجهیز نیروی انسانی شرکت ملی گاز ایران" در سال ۱۳۸۷ کتابچه‌ای [۹] منتشر کرده است که به بررسی روشهای نشت‌یابی گاز می‌پردازد. روشهای ذکر شده هیچکدام در قالب روشهای نرم‌افزاری قرار نمی‌گیرد. از آن جمله می‌توان به دستگاههای نشت‌یاب یونیزاسیون، تشخیص اتان، دستگاههای گاز سنج مختلف و غیره اشاره کرد. وجه مشترک همگی، سخت‌افزاری بودن و پیوسته نبودن فرآیند نشت‌یابی است.

مقاله‌ی [۱۰]، به بررسی چالشهای پیش روی اجرای یک پروژه‌ی نشت‌یابی توسط پیمانکار خارجی پرداخته و پیشنهادهایی برای رفع مشکلات مطرح نموده است. مقاله‌هایی در زمینه‌ی نشت‌یابی بکمک روشهای آکوستیک و یا استفاده از فیبر نوری وجود دارد. برای نمونه به [۱۱] و [۱۲] رجوع کنید.

اما در زمینه‌ی طراحی یا بومی‌سازی یک روش نشت‌یاب مبتنی بر پایش محاسباتی در کشور، موردی یافت نشد. مهمترین ویژگی این روشها امکان استفاده از داده‌های ذخیره شده معمول سیستم‌های کنترل و جمع‌آوری داده (SCADA) برای تحلیل بر خط وجود نشت است.

در صنعت هم شواهد امر نشان از استفاده‌ی روشهای کتابچه‌ی آموزشی [۹] یا سایر دستگاههای نشت‌یاب بر پایه‌ی اثرات خارجی نشت دارد. از جمله سایر موارد می‌توان به عملیات‌های پیگردانی برای تشخیص نقاط دارای خوردگی [۱۳]، [۱۴] و [۱۵] اشاره کرد. که در بهترین حالت این روشها همگی غیر پیوسته و دوره‌ای هستند.

مقالات و گزارشهای تبلیغاتی فنی پا را از اراییه‌ی مجموعه‌ای از ایده‌ها و سرنخها فراتر نمی‌گذارند. از طرفی بسته‌های نرم‌افزاری صنعتی در این حوزه در اختیار نیست. لزوم بومی‌سازی دانش این روشها با کمک سرنخهای موجود بخوبی حس می‌شود. بنابراین در این مقاله دو روش نشت‌یاب برخط بر مبنای بالانس جرمی طراحی تفصیلی شده و شبیه‌سازی می‌گردد. هدف از این کار شروع تلاشی برای بومی‌سازی دانش روشهای نشت‌یابی بر پایه‌ی پایش محاسباتی و استفاده صنعتی در خطوط لوله فشار قوی کشور است.

در ابتدا مدل هیدرولیک گذرایی تهیه می‌گردد. بوسیله‌ی پاره‌ای ملاحظات، داده‌های هیدرولیکی حاصل از مدل مذکور به عنوان ورودی روشهای نشت‌یاب در نظر گرفته می‌شود. سپس راجع به جزییات نشت‌یابی بوسیله بالانس جرمی و طراحی و شبیه‌سازی آنها بحث می‌شود. در نهایت نتایج شبیه‌سازی اراییه می‌گردد. نتایج حاکیست که استفاده از آنها در خطوط لوله قادر است حساسیت به تشخیص نشت را از مرتبه‌ی روز به مرتبه دقیقه بیاورد.

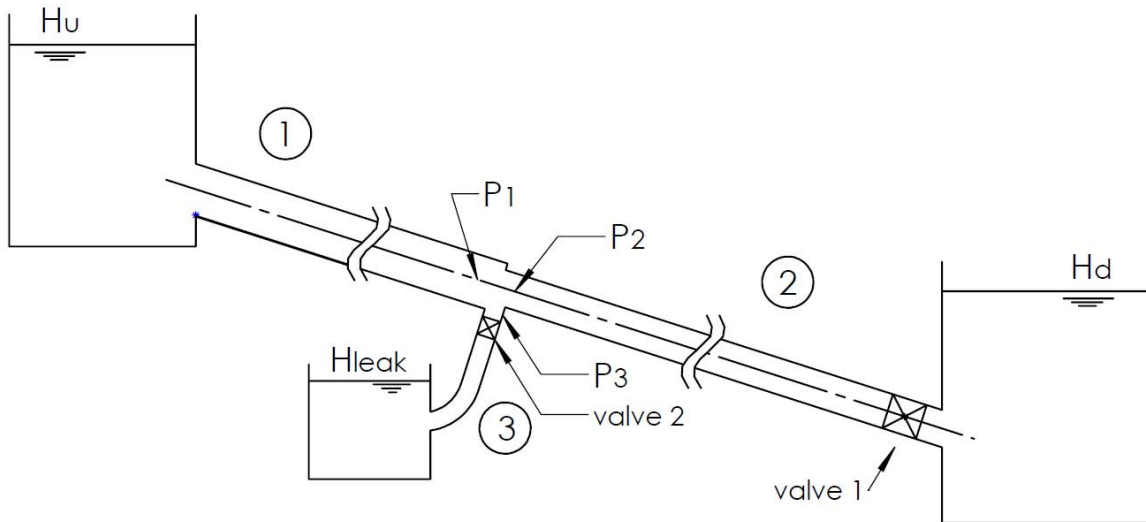
مدل هیدرولیک گذرا:

در این بخش به ساز و کار و نحوه عملکرد مدل هیدرولیکی گذرا طراحی شده می‌پردازیم. شکل ۱ شماتیک خط لوله را نمایش میدهد. در این خط لوله نشت توسط یک انشعاب فرعی مدل شده است. نشت‌یابی بر پایه‌ی بالانس جرمی تفاوتی بین خروج سیال از یک روزنه حاصل از نشت و یا انشعاب فرعی قابل نیست. بعبارت دیگر در صورتیکه جریان خروجی از خط لوله وجود

^۱ - Computational Pipeline Monitoring Systems

داشته باشد و توسط فلومتر (Flowmeter) سنجیده نشود، از نظر روشیایی که در بخش بعد ارایه خواهد شد به عنوان نشت شناخته خواهد شد.

قبل از هر چیز لازم است گفته شود که در روش های نشت‌یابی که در بخش بعد مورد بررسی قرار می‌گیرند، مدل‌های هیدرولیکی این بخش نقش ایجاد کننده‌ی دیتای ورودی را دارند. بعبارت دیگر، مدل‌های این بخش در نبود داده‌های واقعی از خط، به عنوان خط لوله شناخته می‌شوند. این مسئله به طور حتم ممکن است باعث شود که آن‌ها به عنوان واقعیت پذیرفته شوند حال آنکه رفتار آنها تنها بخشی از آن چیزی است که در خطوط لوله واقعی مشاهده می‌شود. بنابراین همیشه بایستی ساده سازی و احیانا حذف برخی رفتارهای خط لوله واقعی در ساختن مدل‌های هیدرولیکی را در نظر داشت [۱۶].



Datum Line

شکل ۱: شماتیک خط لوله بین دو ایستگاه بالادست و پایین‌دست به‌مراه یک انشعاب فرعی به عنوان محل نشت

مدل هیدرولیکی گذرای طراحی شده در این بخش بر اساس فرض الاستیک (Elastic) بودن لوله و اندکی تراکم‌پذیر بودن (Slightly Compressible) سیال درون آن ایجاد شده است. اندکی تراکم‌پذیر بودن سیال بدان معنی است که سیال از معادله حالت مبنی بر مدول بالک (Bulk Modulus) پیروی میکند. مصطلح است که رفتار هیدرولیکی گذرای حاصل از این فرضیات را در معادلاتی با عنوان معادلات ضربه‌ی قوچ (Water Hammer Equations) نشان می‌دهند [۱۷]. رابطه (۱) و (۲) معادلات ضربه قوچ را نشان می‌دهد. معادله (۱) نمایش ترکیبی از معادله پیوستگی و معادله حالت سیال است. معادله (۲) نیز معادله مومنوم برای المان دیفرانسیلی یک‌بعدی از سیال درون لوله است.

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + a^2 \frac{\partial v}{\partial s} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + g \frac{dz}{ds} + \frac{f}{2D} v|v| = 0 \quad (2)$$

که در این معادلات، اپراتور $\frac{d}{dt}$ ، مشتق کامل یا مادی است. P فشار در هر مقطع، v سرعت در هر مقطع، a سرعت حرکت موج، z ارتفاع از مینا، f ضریب اصطکاک داری-ویسباخ، g شتاب گرانش، s متغیر مستقل طول در راستای خط لوله و t معرف زمان است.

راه‌های مختلفی برای حل عددی این معادلات وجود دارد. روشی که برای حل معادلات ضربه کوچ متداولتر است، "روش مشخصه‌ها" (Method of Characteristics) نام دارد. ایده این است که توسط یک ضریب لاگرانژ (λ)، ضریبی از یک معادله را به معادله‌ی دیگر اضافه کنیم. سپس با بسط و مرتب‌سازی دوباره‌ی جملات، مشتقات کامل ایجاد کنیم. در صورت موفق شدن در این روش، به دو معادله‌ی دیفرانسیل معمولی خواهیم رسید [۱۷]. روابط (۳) و (۴) نمایانگر این دو معادله دیفرانسیل معمولی در طول مسیرهای مشخص هستند،

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} + g \frac{dz}{ds} + \frac{f}{2D} v |v| = 0 \dots \dots \text{when } \frac{ds}{dt} = v + a \quad (3)$$

$$\frac{dv}{dt} - \frac{1}{\rho a} \frac{dp}{dt} + g \frac{dz}{ds} + \frac{f}{2D} v |v| = 0 \dots \dots \text{when } \frac{ds}{dt} = v - a \quad (4)$$

معادلات (۳) و (۴) نهایتاً به فرم تفاضل محدود (Finite Difference) نوشته می‌شوند که معادلات لازم برای حل دو پارامتر هد پیزومتریک و سرعت در نقاط میانی خط لوله را بدست می‌دهند. شرایط مرزی برای نقاط بالادست، پاییندست و محل انشعاب بایستی نوشته شود تا حل عددی انجام پذیرد.

بایستی توجه شود که در معادلات (۱) و (۲) ضریب اصطکاک داری-ویسباخ به صورت شبه پایا (Quasi Steady) در نظر گرفته شده است. این نحوه مدل کردن اصطکاک درون لوله در شرایط گذرای شدید باعث ایجاد خطا در رفتار مدل نسبت به واقعیت میشود [۱۸]. در این مقاله فرض بر این است که در طول اجرای روشهای نشت‌یاب، شرایط گذرای کم و متوسط ایجاد میشود. این رفتار را میتوان در اغلب خطوط لوله حاوی مایعات یافت [۶]. اثرات گذرای ناشی از تغییر در عرضه و تقاضا برای سیال در خط و اثرات کنترل شده ناشی از تغییر المانهای کنترلی نظیر شیرها در اغلب زمان بهره‌برداری از خط را میتوان در این محدوده در نظر گرفت.

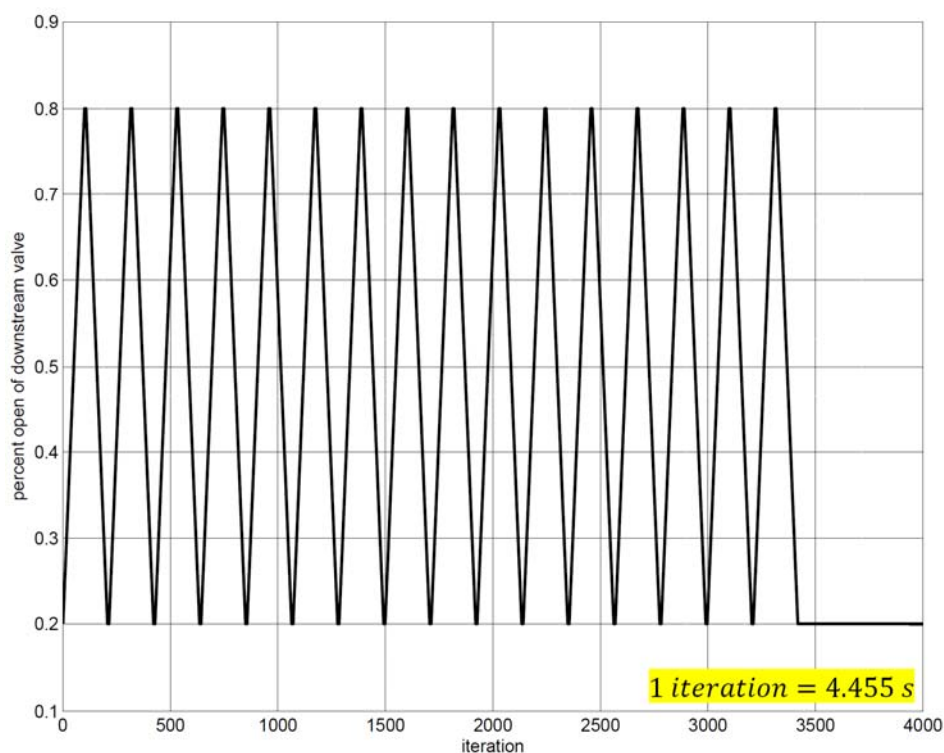
شکل ۲ رفتار شیر پایین‌دست خط لوله ارایه شده در شکل ۱ را نشان میدهد. در این شکل شیر مرتباً بین میزان ۰.۲ باز و ۰.۸ باز نوسان می‌کند. این نوسان به آهستگی ایجاد میشود. بدین معنا که در ۱۰۰ قدم زمانی (در حدود ۴۴۵ ثانیه) حرکت از میزان ۰.۲ تا ۰.۸ انجام میشود. هدف از این تحریک مداوم ایجاد شرایط گذرای متوسط در خط لوله است. اینکار میتواند توسط تغییر تراز هیدرولیکی هر کدام از مخازن بالادست یا پایین‌دست نیز انجام شود.

جدول ۱، پارامترهای خط لوله را نشان میدهد.

در طول این شبیه‌سازی در قدم زمانی هزارم (در حدود ثانیه ۴۴۵) نشتی اتفاق می‌افتد. این اتفاق بوسیله باز شدن نسبی (اما ناگهانی) شیر محل نشت بوجود می‌آید.

نتایج عملکرد مدل هیدرولیک در شکل ۳ و شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکلها عملکرد مدل با عملکرد نرم افزار معتبر HAMMER V8i نیز مقایسه شده است. بدین وسیله مدل هیدرولیک طراحی شده، تصدیق می‌گردد.

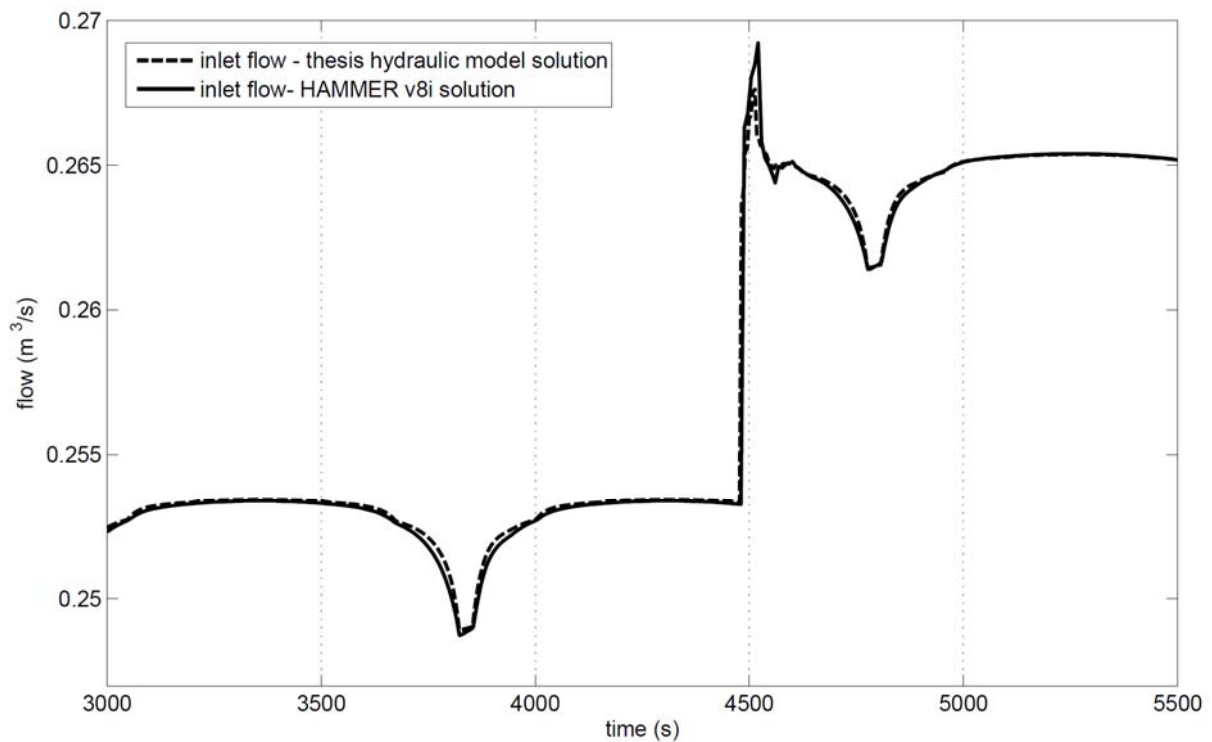
شکل ۳ دبی ورودی خط لوله را نشان میدهد. شکل ۴ نیز دبی خروجی را مشخص میکند. همانطوری که دیده میشود، رفتار مدل هیدرولیکی گذرای طراحی شده به طرز قابل قبولی مشابه رفتاری است که نرم افزار HAMMER V8i پیش بینی می‌کند.



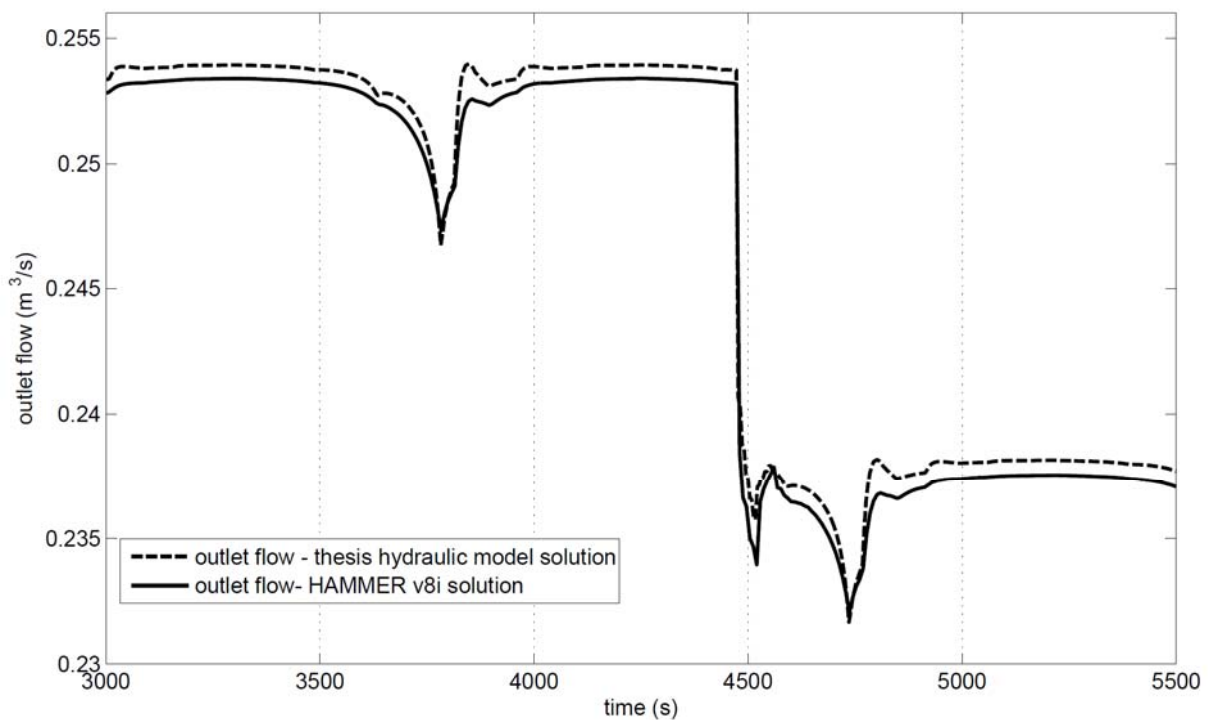
شکل ۲: نوسان شیر پایین دست در طول زمان

جدول ۱: پارامترهای خط لوله

قطر داخلی لوله	D	0.4m	چگالی استاندارد	ρ_0	850 kg/m^3
ضخامت لوله	e	6mm	ارتفاع بالادست	Z_u	250m
طول لوله قبل از نشت	L_1	25,000m	ارتفاع محل نشت	Z_{leak}	120m
طول لوله بعد از نشت	L_2	20,000m	ارتفاع پایین دست	Z_d	180m
هد پایین دست	H_d	500m	سرعت صوت	a	1123 m/s
هد بالادست	H_u	850m	طول قدم زمانی	Δt	4.455s
ضریب افت شیر پایین دست	k_{L-vlv1}	variable	زمان شروع نشت		4459s
ضریب افت شیر محل نشت	k_{L-vlv2}	Changes with the onset of leak	قطر لوله فرعی		0.15m
هد محل نشت	H_{leak}	130m	مدول الاستیسیته	E	200GPa
ضریب اصطکاک (لوله زبر)	f	0.015			



شکل ۳: مقایسه نتایج حل عددی جریان بالادست توسط کد مقاله و حل نرم افزار HAMMER



شکل ۴: مقایسه نتایج حل عددی جریان پایین‌دست توسط کد مقاله و حل نرم افزار HAMMER

روشهای نشت‌یابی بر پایه‌ی بالانس جرمی:

معادله‌ی پیوستگی بدون نشت (به فرم حجم استاندارد) را در نظر بگیرید (رابطه (۵))،

$$Q_{in}^0 - Q_{out}^0 = \frac{\Delta m_{pipe}}{\rho_0} = \Delta V_{pipe}^0 \quad (5)$$

که Q^0 حجم عبوری از ورودی و خروجی (بسته به اندیس آن) در حالت استاندارد است. جمله‌ی Δm_{pipe} نشان‌دهنده تغییرات انباشتگی جرم درون لوله است. ΔV_{pipe}^0 هم نشان‌دهنده تغییرات انباشتگی به صورت حجم استاندارد درون لوله است. از آنجایی که می‌توان نوشت،

$$Q^0 = \int_0^{\Delta t} q^0 dt \quad (6)$$

که q^0 ها دبی حجم در حالت استاندارد هستند.

تمام کمیت‌هایی که تا بحال مورد اشاره قرار گرفت مقادیر واقعی و دقیق خط لوله هستند. طبیعی ایست که ما تنها قادریم تخمینی از موارد بالا را داشته باشیم. حال به بررسی نقش عدم قطعیت‌ها می‌پردازیم. فرض بر این است که پارامتر تخمین زده شده قطعاً در همسایگی مقدار واقعی قرار می‌گیرد. طول بازه نیز دو برابر عدم قطعیت است. برای \hat{q}^0 ها داریم،

$$q^0 \in [\hat{q}^0 - dq \quad \hat{q}^0 + dq] \quad (7)$$

که \hat{q}^0 مقدار اندازه‌گیری شده‌ی دبی ورودی یا خروجی است. dq هم عدم قطعیت آن است.

اگر عدم قطعیت تغییر حجم استاندارد درون لوله را با dV_{pipe}^0 نشان دهیم، طبق تعریف عدم قطعیت داریم،

$$|\Delta V_{pipe}^0| \leq dV_{pipe}^0 \quad (8)$$

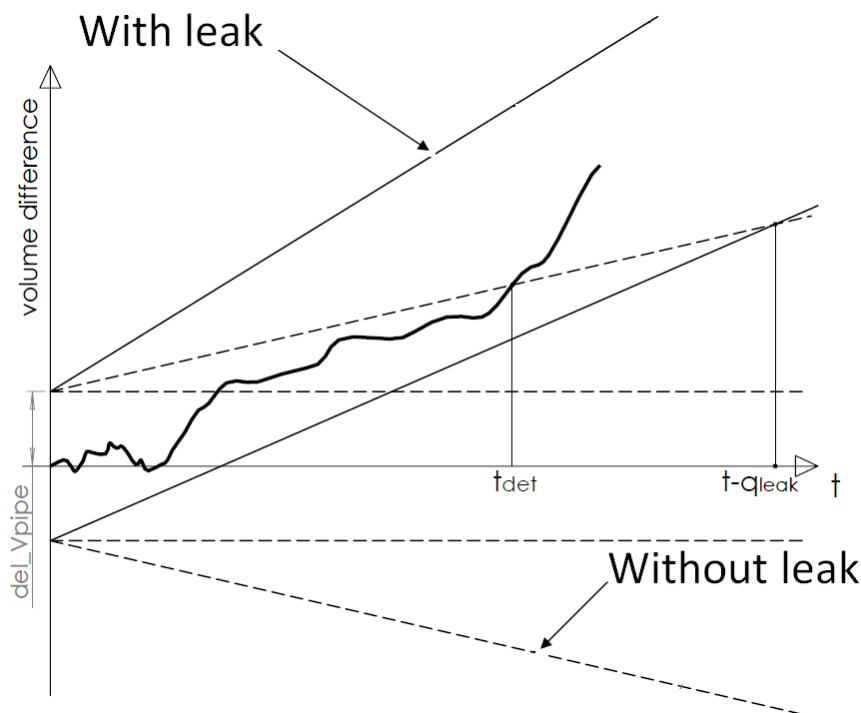
از قرار دادن معادلات ۶، ۷ و ۸ در معادله (۵) نتیجه اساسی زیر بدست خواهد آمد،

$$-T \sum_{i=1}^n (dq_{in} + dq_{in})_{ti} - dV_{pipe}^0 \leq \hat{Q}_{in}^0 - \hat{Q}_{out}^0 \leq +T \sum_{i=1}^n (dq_{in} + dq_{in})_{ti} + dV_{pipe}^0 \quad (9)$$

که رفتار سیگنال تفاوت حجمهای استاندارد اندازه‌گیری شده را در یک بازه زمانی مشخص نشان میدهد. معادله (۹) حدودی برای سیگنال تفاوت حجمهای اندازه‌گیری شده استاندارد بیان میکند. بازیگران این حدود خطای تجمعی فلومترها (جمله‌ای که به صورت سری متناهی نشان داده شده است)، و عدم قطعیت حجم انباشته شده در لوله dV_{pipe}^0 است. در صورت وجود نشت، با تکرار مسیر قبلی و در نظر داشتن دبی نشت در معادله‌ی پیوستگی، به معادله (۱۰) میرسیم.

$$Q_{leak}^0 - T \sum_{i=1}^n (dq_{in} + dq_{in})_{ti} - dV_{pipe}^0 \leq \hat{Q}_{in}^0 - \hat{Q}_{out}^0 \leq Q_{leak}^0 + T \sum_{i=1}^n (dq_{in} + dq_{in})_{ti} + dV_{pipe}^0 \quad (10)$$

که در آن جمله حجم خروجی از نشت (Q_{leak}^0) باعث جابجایی مرزهای سیگنال مورد پایش میشود. معادله (۹) و (۱۰) اساس روشهای نشت‌یابی با بالانس جرمی این مقاله را تشکیل میدهد. شکل ۵ نحوه عمل دو معادله (۹) و (۱۰) را نشان میدهد. وقتی که نشتی اتفاق بیفتد، سیگنال اختلاف حجمها از مرزهای جدید پیروی کرده و نهایتاً از مرز بالای معادله (۹) عبور میکند. خطوط ممتد نماینده مرزهای معادله با نشت (معادله (۱۰)) و خط چین‌های مورب نماینده مرزهای معادله بدون نشت (معادله (۹)) است. زمانی است که سیگنال اختلاف حجمها از مرز بالای معادله (۹) گذر کرده و این بمعنای وقوع نشت است. t_{det} زمانی است که به طور قطع نشت تشخیص داده میشود.



شکل ۵: نحوه رفتار سیگنال اختلاف حجمهای ورودی و خروجی و حدود معادلات ۹ و ۱۰

خطای دبی‌سنج‌ها در معادلات بالا در حالت کلی بیان شد. در صورتی که عدم قطعیت دبی‌سنج‌ها ضریبی از دبی عبوری باشد [۲]،

$$dq_{in} = k_{in} q_{in} \quad (11)$$

$$dq_{out} = k_{out} q_{out} \quad (12)$$

در آنصورت خطاهای دبی‌سنج‌ها در حالت کلی برابر است با

$$+ T \sum_{i=1}^n (k_{in} \hat{q}_{in}^0 + k_{out} \hat{q}_{out}^0) t_i \quad (13)$$

نتایج مدل هیدرولیک را میبایست به گونه‌ای تغییر دهیم تا خطای دی‌سنجها نیز در آن دیده شود. بدین منظور فرض میشود که k_{in} و k_{out} معادل 0.02 است [۱۶]. بدین ترتیب دی اندازه‌گیری شده در همسایگی دی واقعی با طول بازه $k_{in}q_{in}$ یا $k_{out}q_{out}$ (به ترتیب برای ورودی و خروجی) است. برای اینکه بدترین شرایط برای تشخیص نشت بدست آید فرض میشود دی ورودی اندازه‌گیری شده کمترین مقدار ممکن و دی خروجی بیشترین مقدار ممکن را بخود اختصاص میدهند. مساله مهم دیگر نحوه‌ی برخورد با عدم قطعیت انباشتگی است. در این مقاله به دو شکل با این چالش روبه‌رو میشویم، که هر نوع برخورد منجر به یک نوع روش بالانس جرمی خاص خواهد شد. اگر بخواهیم جرم انباشته شده در لوله را با توجه به بحث بالا تقریب بزنییم، خواهیم داشت [۲]:

$$i = [\rho_0 c_T (1 - F\bar{p})^{-1}] [A_0 (e^{D\bar{p}/Ee} + 2\alpha\Delta\bar{T})] [L_0 (1 + \alpha\Delta\bar{T})] \quad (14)$$

i در رابطه (۱۴) نماینده جرم انباشته شده درون یک سگمنت به طول L_0 ، سطح مقطع A_0 و چگالی ρ_0 در شرایط حالت استاندارد است. شرایط استاندارد دمای ۱۵ درجه سانتیگراد و فشار ۱ اتمسفر است. C_T ضریب تغییر چگالی مایع بر اثر تغییر دما است. F تراکم پذیری سیال بوده، E مدول الاستیسیته، e ضخامت لوله، α ضریب انبساط حرارتی و D تابع نحوه‌ی مقید کردن خط لوله است. پارامترهای فرایندی در این رابطه \bar{p} فشار میانگین بالادست و پایین‌دست در نظر گرفته شده است. $\Delta\bar{T}$ تفاوت دمای میانگین بالادست و پایین‌دست با دمای حالت استاندارد است. حالا به دو شکل میتوان از رابطه (۱۴) استفاده کرد.

۱- توجه شود که خطوط لوله مورد بررسی در این مقاله حاوی مایعات است. بنابراین تغییرات انباشتگی جرم درون خط لوله با اینکه بسیار مهم است، اما سهم کوچکی را به نسبت کل جرم مایع درون لوله در هر لحظه به خود اختصاص میدهد [۱۶].

بنابراین یک راهکار برای تعیین حدود انباشتگی در معادله (۹) این است که شرایطی را در نظر بگیریم که انباشتگی در لوله بیشینه و کمینه است. این فرض برای اطمینان بیشتر حتی میتواند از الزامات خط لوله هم فراتر رود. از آنجایی که مدل هیدرولیک ساخته شده دما را ثابت فرض میکند، این شرایط زمانی ایجاد میشود که فشار میانگین \bar{p} بیشینه و یا کمینه شود. اگر این ایده بکار برده شود، روش را طبق قرارداد "بالانس جرمی بدون محاسبه انباشتگی" (UMB) [۱۶] مینامیم. ۲- راه حل دیگر آن است که سعی کنیم تغییرات انباشتگی را به کمک رابطه (۱۴) تقریب بزنییم. با توجه به فشارهای اندازه‌گیری شده بالادست و پایین‌دست تقریبی از انباشتگی جرم بکمک رابطه (۱۴) در هر لحظه بدست می‌آید. سپس میتوان حد بالایی برای تفاضل مقدار واقعی تغییرات انباشتگی و مقدار تخمین زده شده بدست آورد. این تفاوت تابعی از عدم قطعیت‌های فشارسنجها و دماسنجهاست. نتیجه این تخمین با کمک رابطه (۱۴) به صورت معادله (۱۵) است.

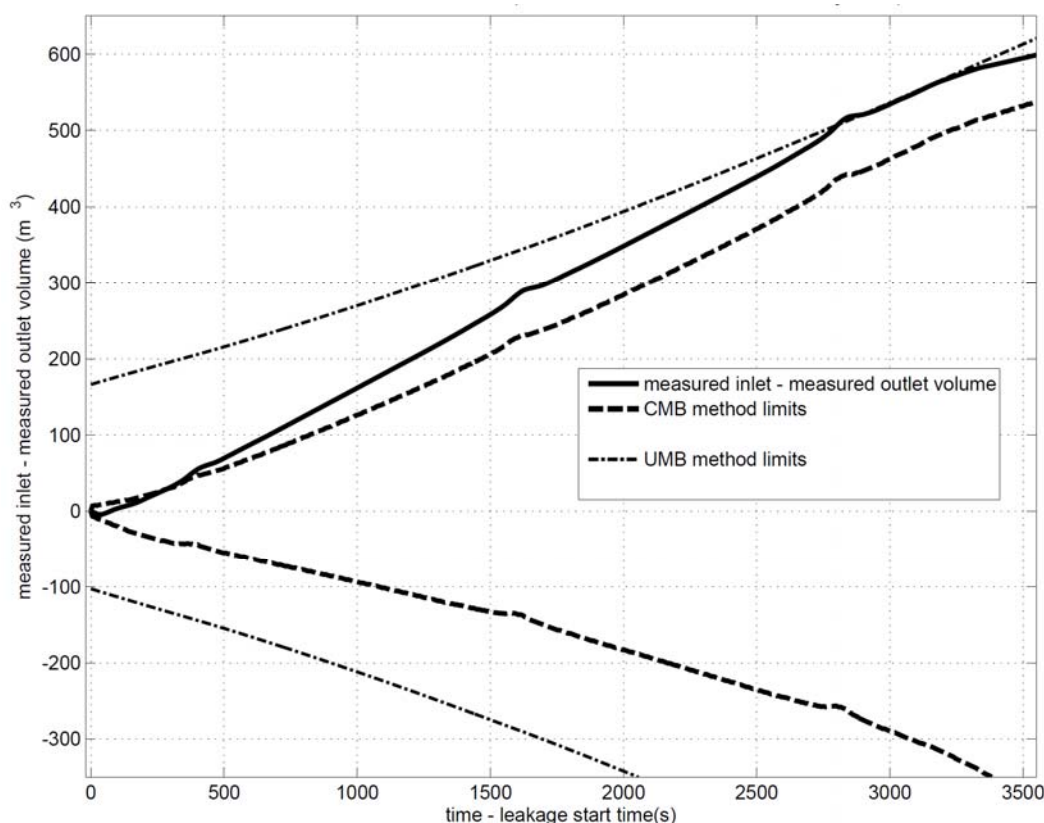
$$|\Delta V_{pipe}^0 - \Delta V_{Axis}^0| \leq dV_{pipe}^0 \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، ΔV_{pipe}^0 تغییر حجم استاندارد واقعی درون لوله، ΔV_{Axis}^0 تغییر حجم استاندارد تخمین زده شده توسط بکار بردن دما و فشار میانگین در معادله (۱۴) است. dV_{pipe}^0 هم عدم قطعیت تغییر حجم استاندارد خط لوله است. اگر رابطه (۶)، (۷) و (۱۵) در قانون پیوستگی (معادله (۵)) قرار داده شود، رابطه عمومی (۱۶) نتیجه خواهد شد،

$$\Delta V_{Axis}^0 - dV_{pipe}^0 - T \sum_{i=1}^n (k_{in} \hat{q}_{in}^0 + k_{out} \hat{q}_{out}^0)_{t_i} \leq \hat{Q}_{in}^0 - \hat{Q}_{out}^0 \leq \Delta V_{Axis}^0 + dV_{pipe}^0 + T \sum_{i=1}^n (k_{in} \hat{q}_{in}^0 + k_{out} \hat{q}_{out}^0)_{t_i} \quad (16)$$

همانطور که دیده میشود، رابطه (۱۶) قادر است مرزهای حدی نزدیکتری به سیگنال اختلاف حجمها (که پایش میشود) نسبت به روش UMB ایجاد کند. این روش را طبق قرارداد "روش بالانس جرمی با محاسبه انباشتگی" (CMB) مینامیم [۱۶].

شکل ۶ نحوه عمل این دو روش را در شبیه‌سازی نشان میدهد. چنانکه مشاهده میشود مرزهای روش CMB بسیار نزدیکتر به سیگنال اختلاف حجمها می‌باشد. و این بمعنای قابلیت بهتر این روش در تشخیص نشت است. علت نیز تخمین انباشتگی خط لوله ناشی از شرایط هیدرولیک گذرا است. بدین ترتیب روش CMB با فاصله کمتر و حدود کوچکتر قادر است سیگنال اختلاف حجمهای ورودی و خروجی را تعقیب کند.



شکل ۶: نحوه عمل دو روش بالانس جرمی در شبیه‌سازی ایجاد نشت در مدل هیدرولیک

نتایج

پارامترهای مدل هیدرولیک در جدول ۲ آمده است. خطای فلومترها مانند قبل است و در جدول ۳ مشاهده میشود. همانطوریکه در جدول ۲ مشاهده میشود ضریب افت شیر پایین دست ثابت است. شرایط گذرا در این مثال توسط نوسان تدریجی هد مخزن بالادست ایجاد میشود. بعلاوه ضریب افت شیر محل نشت در هر بار شبیه‌سازی تغییر میکند. این کار با هدف ساختن نشتهای با درصد متفاوت انجام می‌شود.

در شکل ۷ هم منحنی‌های تشخیص نشت برای دو روش نمایش داده شده است. این منحنی‌ها درصد هر نشت (نسبت دبی نشت به دبی ورودی) در مقابل زمان تشخیص هستند. روشها تقریباً به صورت تابع هایپربولیک عمل می‌کنند. هر چه منحنی برای یک روش نشت‌یاب خاص در صفحه‌ی مختصات به سمت شمال شرقی حرکت کند. حساسیت روش کمتر می‌شود. همانطور که از دو شکل پیداست، عملکرد روش CMB از لحاظ حساسیت به نشت بسیار بهتر از روش UMB است [۱۶]. دو

ششمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب‌یابی ماشین‌آلات

ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اسفند ۱۳۹۰

روش با قطعیت قادر به تشخیص نشت تا کمی کمتر از ۸ درصد هستند. کمترین نشت قابل تشخیص به میزان زیادی تابعی از خطای فلومترهاست [۱۶]. در صورتیکه فلومترهای با خطای کمتر مورد استفاده قرار گیرد، رسیدن به نشت‌های با درصد کمتر نیز امکان پذیر است [۱۶].

جدول ۲: پارامترهای مدل هیدرولیک برای مجموعه مثال این بخش

قطر داخلی لوله	D	0.4m	چگالی استاندارد	ρ_0	850 kg/m^3
ضخامت لوله	e	6mm	ارتفاع بالادست	Z_u	250m
طول لوله قبل از نشت	L_1	25,000m	ارتفاع محل نشت	Z_{leak}	120m
طول لوله بعد از نشت	L_2	20,000m	ارتفاع پایین دست	Z_d	180m
هد پایین دست	H_d	500m	سرعت صوت	a	1123 m/s
هد بالادست	H_u	Variable	طول قدم زمانی	Δt	4.455s
ضریب افت شیر پایین دست	k_{L-vlv1}	60	ضریب انبساط خطی	α	$1.2 \cdot 10^{-5}$
ضریب افت شیر محل نشت	k_{L-vlv2}	Changes with each problem	تعداد قدمهای زمانی		4000
هد محل نشت	H_{leak}	130m	مدول الاستیسیته	E	200GPa
ضریب اصطکاک (لوله زیر)	f	0.015			

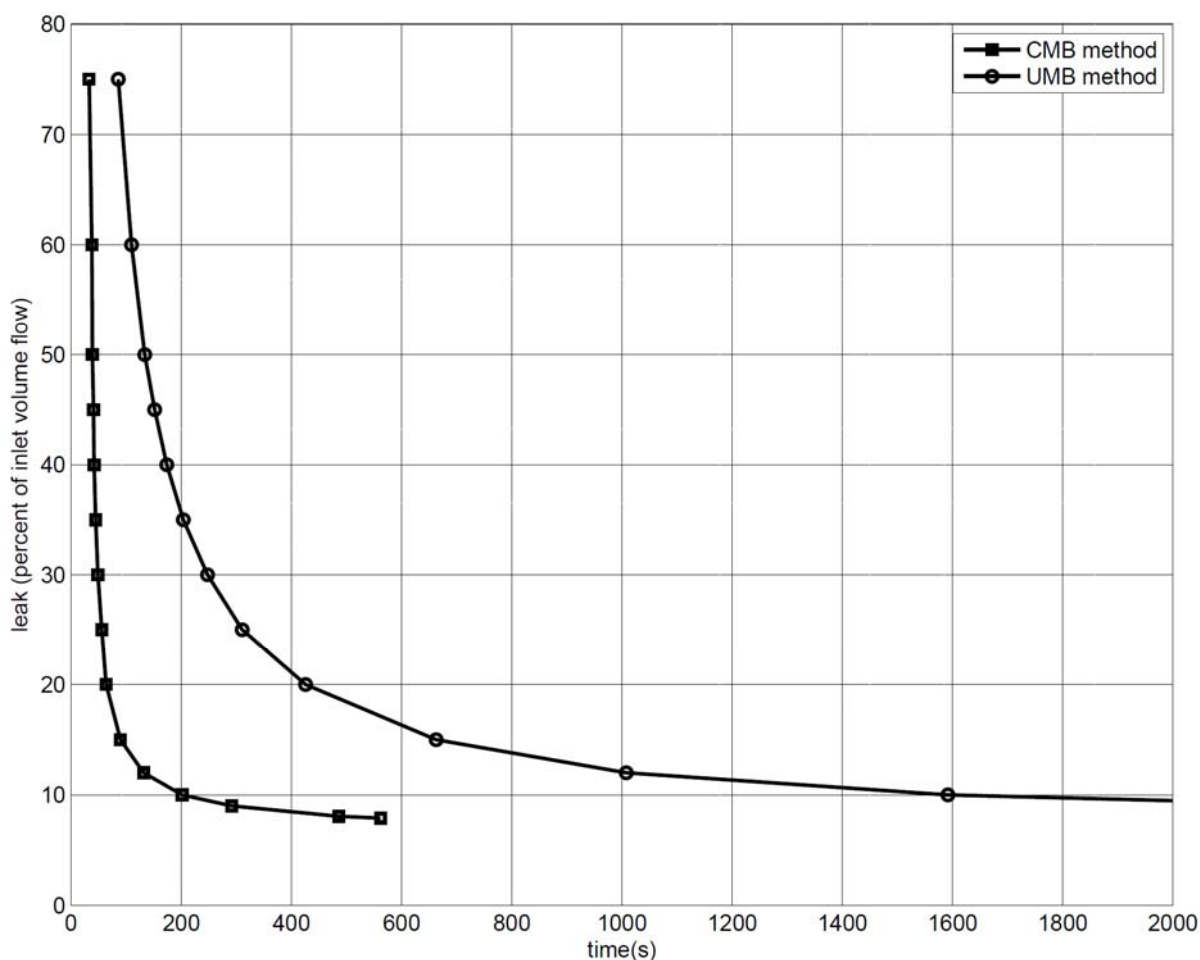
جدول ۳: خطاهای اندازه‌گیری و بازه‌های مورد استفاده در روشهای نشت‌یابی

			عدم قطعیت فلومتر بالادست	dq_{in}	$0.02q_{in}$
عدم قطعیت فشار میانگین	$d\bar{p}$	0.175 bar	عدم قطعیت فلومتر پایین دست	dq_{out}	$0.02q_{out}$
عدم قطعیت دمایی میانگین	$d\bar{T}$	0.25°C	خطای فرضی فلومتر بالادست	δq_{in}	$-0.02q_{in}$
			خطای فرضی فلومتر پایین دست	δq_{out}	$+0.02q_{out}$

همانطریکه دیده میشود دو روش نشتهای تا ۱۰ درصد را در کمتر از ۱ ساعت تشخیص میدهند. بعلاوه روش CMB قادر است تا در کمتر از ۱۰ دقیقه نشتهای کمی کمتر از ۸ درصد را تشخیص دهد. و این در مقایسه با روشهای فعلی مورد استفاده در کشور یک قدم بزرگ رو به جلو است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا مدل هیدرولیک گذرا برای ایجاد شرایط گذرا ایجاد شد. هدف این بود که در یک خط لوله با شرایط گذرای متوسط روشهای نشت‌یابی مبتنی بر بالانس جرمی را مورد بررسی عملکرد قرار دهیم. بدین ترتیب این قابلیت را خواهیم داشت تا در اغلب شرایط کاری یک خط لوله حاوی مایعات به پایش بر خط برای وقوع نشت بپردازیم. نوع پایش به صورت پایش بازه‌ای (Limit Checking) می‌باشد. چالش عمده نحوه مشخص کردن بازه‌هاست که در این مقاله اینکار به دو صورت انجام گرفت و منجر به دو روش شد. نتایج شبیه‌سازی دو روش نشان میدهد که تشخیص نشت در خط لوله در حد دقیقه امکان پذیر است.



شکل ۷: منحنی‌های تشخیص نشت برای دو روش CMB و UMB

منابع

- [1]- American Petroleum Institute, "API 1130: Computational Pipeline Monitoring for Liquid Pipelines", Second Edition, Nov 2002.
- [2]- American Petroleum Institute, "API Publ 1149: Pipeline Variable Uncertainties and Their Effects on Leak Detectability", First Edition, Nov 1993.
- [3]- Beushausen R., Tornow S., Brochers H., "transient leak detection in crude oil pipelines", International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2004.
- [4]- Zhang J., Xu L., "Real Time Pipeline Leak Detection on Shell's North Western Ethylene Pipeline", Spring Meeting at the Ethylene Producers' Conference in Houston AICHE, 2001.
- [5]- Baptista R. M., Masiero P. A., "A Pipeline LDS Trial: Comparing Compensated Volume Balance Against SPRT Statistical Based LDS in a Brazilian Pipeline", International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2004.
- [6]- Geiger G., "Fundamentals of Leak Detection", Krohne Oil & Gas,
- [7]- Odusina E., Akingbola J., Mannel D., "Software-Based Pipeline Leak Detection", Advanced Chemical Engineering Design CHE 4273, Department of Chemical Engineering and Materials Science, University of Oklahoma
- [8]- "Technical Review of Leak Detection Technologies / Volume I – Crude Oil Transmission Pipelines", Alaska Department of Environmental Conservation
- [۹]- "نشت یابی و کنترل نشت گاز(مقدماتی)",
<http://training.nigc.ir/utills/getFile.aspx?Idn=14505>
- [۱۰]- س، کیانی دهکردی، "خطوط لوله و سیستم نشت یاب- چالشها و راهکارها"، اولین کنفرانس خطوط لوله و صنایع وابسته، تهران، تیر ۱۳۸۶.
- [۱۱]- ص، حسینی، "نشت یابی در خطوط انتقال نفت و گاز به روش غیر مخرب آکوستیک امیشن"، سومین کنفرانس لوله و صنایع نفت و گاز، تهران، خرداد ۱۳۹۰.
- [12]- Inaudi D., "Detection and Localization of Micro & Multiphase Leakages using Distributed Fiber Optic Sensing", 3rd Iranian Pipe and Pipeline Conf., May 2011.
- [۱۳]- "نشت یابی خطوط لوله در محدوده منطقه ده عملیات انتقال گاز"،
<http://www.nigc-dist10.ir/Site.aspx?ParTree=11101H111213101H&LnkIdn=79892>
- [۱۴]- "۱۶۹ کیلومتر پیگ رانی هوشمند روی خط لوله گاز ارسنجان - کرمان"،
<http://www.shana.ir/170556-fa.html>
- [۱۵]- "پیگرانی هوشمند روی خطوط لوله گاز ترش برای نخستین بار"،
<http://shana.ir/newsprint.aspx?lang=fa&newsid=158558>
- [۱۶]- آ، خرم، بررسی و مقایسه‌ی روشهای مختلف نشت‌یابی بر پایه‌ی پایش محاسباتی در خطوط لوله، انتخاب یک روش از میان آنها و تصدیق عملکرد آن بوسیله‌ی مقایسه با روش شاهد UMB، پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش طراحی کاربردی در مهندسی مکانیک، زمستان ۱۳۹۰
- [17]- Larock B. E., Jeppson R. W., Watters G. Z., "Hydraulics of pipeline systems", CRC Press, 2000.
- [18]- Chadhry M. H., "Applied Hydraulic Transients", First Edition, Van Nostrand Reinhold Ltd, New York, 1979.