

## کاربرد روش اندازه‌گیری گرهی فشار در شناسایی نشت

محمد عطاری<sup>۱</sup>، محمود فغفور مغربی<sup>۲\*</sup> و علی‌رضا منوریان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی

(دریافت: ۹۵/۵/۷، پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۲، نشر آنلاین: ۹۵/۱۲/۲۳)

### چکیده

در حال حاضر هدررفت آب به یک نگرانی جهانی تبدیل شده است. از طرفی تقاضا برای آب در حال افزایش است. این مسأله مدیریت تقاضا و اصلاح الگو مصرف را ضروری ساخته است. از مهم‌ترین روش‌های مدیریت مصرف، کاهش آب به حساب نیامده می‌باشد. در این مقاله یک ایده جدید جهت تعیین موقعیت و مقدار نشت در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تحلیل اختلاف فشارهای گرهی در حالت نشت‌دار و بدون نشت معرفی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که این روش می‌تواند با حداقل برداشت اطلاعات هیدرولیکی از نوع فشارها، علاوه بر تعیین موقعیت نشت‌های موجود گرهی، گرهی که نشت بیشتر را دارد و همچنین مقدار دقیق نشت را شناسایی کند.

**کلیدواژه‌ها:** نشت‌یابی، فشارسنجی، فشار گرهی، شبکه توزیع آب.

### ۱- مقدمه

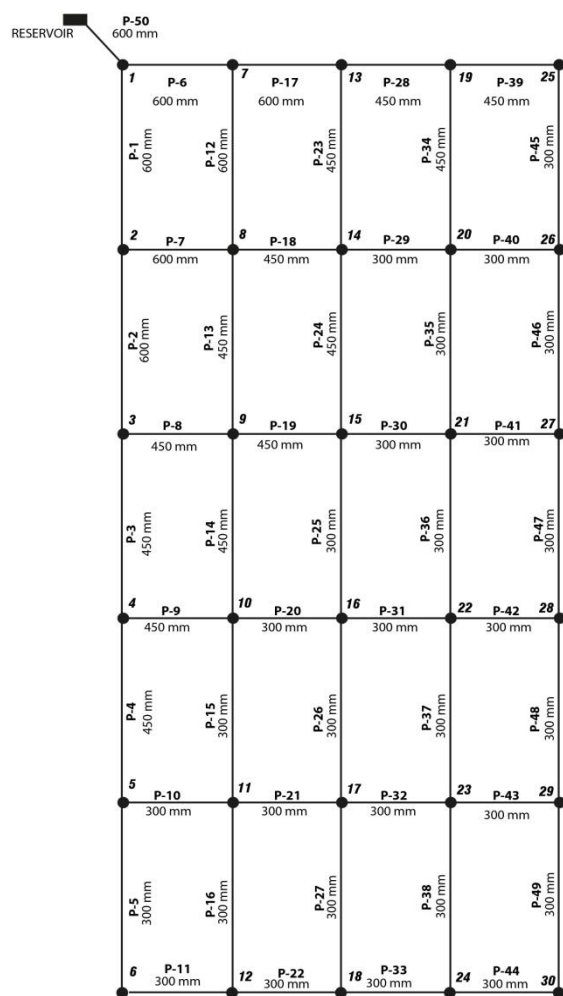
انتقال، تصفیه، ذخیره و توزیع به عنوان یک فعالیت دراز مدت و با برنامه‌ریزی مدون جلوگیری کرد. تعداد رخ داد حوادث در شبکه آبرسانی معمولاً بسیار بالا می‌باشد. به عنوان مثال در سال ۱۳۷۷ حدود یک میلیون حادثه در سامانه‌های توزیع آب و فاضلاب کشور رخ داده است که بیش از ۲۰ درصد از کل درآمدهای شرکت آب و فاضلاب کشور برای تعمیر، بازسازی و اصلاح به خود اختصاص داده است که حدود ۳۰ درصد این حوادث روی لوله‌های سامانه توزیع آب بوده است (سلطانی و طبری، ۱۳۹۱).

نشت آب نه تنها منجر به اتلاف منابع آب با کیفیت می‌شود، بلکه منجر به آلودگی آب‌های آشامیدنی و در بدترین حالت سبب آسیب‌های جدی به انسان‌ها و ساختمان‌های اطراف محل نشت می‌شود (Li و همکاران، ۲۰۱۱ و Campisano و همکاران ۲۰۱۰). این امر نشان دهنده یک مشکل اجتماعی بزرگ در زمان دوره‌های کم‌آبی می‌باشد. با کاهش هدر رفت آب می‌توان دستیابی افراد بیشتری را به شبکه آبرسانی فراهم کرد. به عنوان مثال در شهر مانیل با کاهش هدر رفت آب از ۶۳٪ به ۳۰٪ در یک دوره بیش از ۱۰ ساله، امکان دستیابی ۱۴۸۰۰۰ نفر از افراد به شبکه آبرسانی

کشور ایران با متوسط بارش سالانه حدود ۲۶۰ میلی‌متر در زمره مناطق خشک جهان است (تجربی و ابریشمی، ۱۳۸۳). بانک جهانی در گزارشی از کاهش سرانه آب قابل استحصال به عنوان چالش پیش رو کشور نام برده است (Internal World-Bank، ۲۰۰۴) نظر به این که در گذشته آب به قیمت ارزان و به آسانی در دسترس بوده، لذا دستگاه‌های مسئول توزیع آب شهری تا قبل از تشکیل شرکت‌های آب و فاضلاب نسبت به کاهش آب به حساب نیامده به عنوان راه حلی برای صرفه‌جویی در منابع آب، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش بازده یا درآمد، توجه کافی نداشتند. در سال‌های اخیر کمبود شدید منابع و افزایش سریع هزینه‌های تولید آب باعث شده که موضوع آب به حساب نیامده مورد توجه قرار گیرد. بر طبق آمار اعلام شده آب و فاضلاب کشور، مقدار آب به حساب نیامده در شبکه‌های روستایی ۳۱/۹۶ درصد و در مناطق شهری ۲۸/۳ درصد می‌باشد (آمار و اطلاعات شرکت‌های آب و فاضلاب روستایی، ۱۳۸۹). بنابر این در کنار تأمین آب از منابع جدید باید از هدر رفت آب در مراحل مختلف

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۵۱۱۳۳۵۲۶

شبکه مورد بررسی که در شکل (۱) نشان داده شده و شامل لوله‌هایی افقی و عمودی که طول آن‌ها به ترتیب ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متر، متوسط زبری مطلق ( $e$ ) کلیه لوله‌ها برابر با ۰/۲۶ میلی‌متر و ۲۰ حلقه، ۳۰ گره، ۵۰ لوله و یک مخزن می‌باشد را، Poulakis و همکاران، (۲۰۰۳) در نرم‌افزار EPANET2.0 مدل کرده و مشخصات شبکه بطور کامل به نرم‌افزار داده می‌شود.



شکل ۱- شبکه (Poulakis و همکاران، ۲۰۰۳)

سپس شبکه با فرض عدم وجود نشت مورد تحلیل قرار گرفته و مقادیر فشارهای گرهی برداشت می‌شوند. در مرحله بعد با اعمال دو نشت فرضی هم‌زمان در دو گره و تحلیل شبکه، فشارهای گرهی برداشت می‌شود که برای شبکه (Poulakis و همکاران، ۲۰۰۳) تعداد ترکیبات ممکنه دو نشت هم‌زمان ۴۳۵ حالت است که از رابطه (۱) به دست می‌آید:

فراهم شده است (Marunga و همکاران، ۲۰۰۶). کمبود آب در ایران یکی از عوامل محدود کننده اصلی در توسعه طی دهه‌های آینده بشمار خواهد رفت. از این‌رو لازم است طرح‌ها و برنامه‌ریزی‌هایی برای استفاده مطلوب از آب و حفظ جایگاه آن بعنوان یکی از محورهای توسعه در نظر گرفته شود.

عوامل بسیار زیادی در به وجود آمدن نشت در شبکه آب دخالت دارند. یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در ایجاد نشت در شبکه آبرسانی فشار است، به طوری که در دهه‌های اخیر می‌توان گفت در اکثر تحقیقات انجام گرفته جهت نشت‌یابی و کنترل نشت، فشار به عنوان یک عامل مهم در نظر گرفته شده است. بعنوان مثال Perez و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از آنالیز حساسیت فشار در گره‌های شبکه، موقعیت نشت را حتی در صورت عدم قطعی تقاضا تعیین کردند. Marunga و همکاران، (۲۰۰۶) با استفاده از نرم‌افزار EPANET2.0 و با در نظر گرفتن حداقل جریان شبانه و در یک بازه زمانی تقریباً سه ساله نشان دادند که با کاهش ۳۵ درصدی فشار در شبکه مقدار نشت را می‌توان ۲۵ درصد کاهش داد. (Marunga و همکاران، ۲۰۱۱) موفق شدند که با اعمال الگوریتم چند منظوره ژنتیکی مکان مناسب قرار دادن دریچه‌های کاهش فشار را تعیین کنند، به طوری که تعداد دریچه‌ها به حداقل برسد و مقدار نشت مینیمم شود. همچنین سلطانی‌اصل و فغفور مغربی، (۱۳۸۸) با مدل‌سازی شبکه با استفاده از نرم‌افزار EPANET 2.1 و با در نظر گرفتن نشت در گره‌ها نشان دادند که با مدیریت فشار می‌توان مقدار نشت را حدود ۳۶ درصد کاهش داد.

در این تحقیق، یک ایده جدید جهت تعیین موقعیت و مقدار نشت در شبکه توزیع آب با استفاده از حداقل برداشت اطلاعات هیدرولیکی از نوع فشارهای گرهی در شبکه معرفی می‌شود. این روش مبتنی بر محاسبه میزان اختلاف فشار ناشی از وجود نشت‌ها در شبکه بوده و می‌تواند به خوبی در تخمین موقعیت و مقدار دقیق نشت در شبکه‌های کوچک و بزرگ مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲- روابط اولیه و شبکه مورد بررسی

ایده بکار رفته در این تحقیق بر مبنای محاسبه اختلاف فشار گرهی است که این ایده اولین بار توسط فغفور مغربی و همکاران گزارش گردیده است (فغفور مغربی و همکاران، ۱۳۹۱). نکته مهم در این روش این است که جهت انجام مدل‌سازی نرم‌افزار شبکه، بایستی تمامی مشخصات شبکه موجود بوده و نیز عملیات کالیبراسیون بر روی آن انجام شده باشد. برای این منظور ابتدا

روش کار بدین صورت است که ابتدا مقادیر اندیس نسبی نشت  $LI^r(m/n)$  برای دو گره  $m$  و  $n$  از ماتریس شاخص نشت و به ازای نشت پایه که با  $LI^r(m/n)_{bl}$  نشان داده می‌شود، محاسبه می‌گردد. سپس با انجام فشارسنجی در گره‌های  $m$  و  $n$  از شبکه در حالت وجود نشت واقعی، مقادیر  $LI^r(m/n)_{rl}$  به ازای نشت واقعی نیز برداشت می‌شود. سپس با تعریف یک بازه به عنوان "بازه شناسایی نشت" اقدام به شناسایی گره‌های نشت‌دار می‌گردد. منظور از بازه شناسایی نشت بازه ایست که ترکیباتی که در آن قرار می‌گیرند دارای احتمال نشت هستند و ترکیباتی که در محدوده این بازه واقع نمی‌شوند در آن‌ها احتمال رخداد نشت وجود ندارد.

مراجع مختلف مقادیر متفاوتی را برای حدود انحراف از مقادیر اصلی در شبکه‌های توزیع آب ارائه کرده‌اند. شرکت آب نیوزیلند هنگامی که جریان در شبکه بیش از ۱۰ درصد مصارف کل گرهی باشد، مقدار ۵٪ را به عنوان انحراف از مقدار دبی توصیه کرده است. در این مقاله نیز مقدار اولیه این بازه ۵٪ در نظر گرفته شده است، که به علت احتمال وجود خطا در برداشت اطلاعات میدانی و خطا در کالیبراسیون بوده که بر حسب شرایط و در صورت لزوم این بازه را می‌توان تغییر داد.

همان طور که در رابطه (۳) مشاهده می‌شود حداقل دو گره نیازمند برداشت فشارسنجی است. لیکن در صورتی که بیش از یک گره در بازه شناسایی نشت قرار گیرد، اقدام به فشارسنجی در گره‌های دیگر ضروری است. این افزایش تعداد گره‌های فشارسنجی تا آنجا ادامه می‌یابد که از فصل مشترک گره‌های دارای پتانسیل نشت به ازای زوج گره‌های فشارسنجی شده، گره‌های نشت‌دار واقعی حاصل گردد.

رابطه بین تعداد فشارسنجی‌ها ( $P$ ) و تعداد اندیس‌های نسبی نشت ایجاد شده ( $N$ ) نیز بر اساس رابطه (۴) تعیین می‌شود:

$$N = \frac{P}{\binom{P}{2}} = \frac{P!}{2 \times (P-2)!} \quad (4)$$

#### ۴- تعیین مقدار دقیق نشت

با افزایش مقدار نشت، فشار به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد (نشریه ۳۰۸-الف، ۱۳۸۹) از دیدگاه نظری، جریان از دورن یک سوراخ با ابعاد ثابت (اریفیس<sup>۱</sup>) با جذر فشار آب دورن آن متناسب است و رابطه آن مطابق با رابطه (۵) تعریف می‌گردد:

$$\binom{N}{M} = \binom{30}{2} = 435 \quad (1)$$

که در آن  $N$  تعداد گره‌ها و  $M$  تعداد نشت‌های هم‌زمان رخ داده در شبکه است. حال برای تحلیل حساسیت شبکه نسبت به موقعیت نشت و چگونگی تغییر فشارها، از رابطه (۲) استفاده می‌گردد:

$$LI(i) = \frac{(H_{nol}^i - H_l^i)}{(H_{nol}^j - H_l^j)_{max}} \times 100 \quad (2)$$

که در آن  $H_{nol}^i$  هد فشار در حالت بدون نشت در گره  $i$ ،  $H_l^i$  هد فشار در حالت نشت دار در گره  $i$ ،  $H_{nol}^j$  هد فشار در حالت بدون نشت در گره  $j$ ،  $H_l^j$  هد فشار در حالت نشت‌دار در گره  $j$  و  $LI(i)$  درصد اختلاف فشار در دو حالت نشت دار و بدون نشت در گره  $i$  بوده که به آن "اندیس نشت" گفته می‌شود. در ادامه، عملکرد این روش بر روی شبکه (Poulakis و همکاران، ۲۰۰۳) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۳- تعریف ماتریس شاخص نشت و بازه نشت

در این‌جا به منظور بررسی کارایی روش سعی شده است تا با تعمیم رابطه (۲) و افزودن چند گام محاسباتی، بتوان با انجام حداقل فشارسنجی در تعدادی از گره‌های شبکه موقعیت نشت را تشخیص داد. برای این منظور ابتدا با اعمال دو نشت هم‌زمان پایه فرضی که برای شبکه مورد نظر ۴۳۵ حالت است، در هر حالت شبکه را تحلیل کرده و با استفاده از رابطه (۲) مقادیر  $LI$  برای تمامی گره‌ها به دست می‌آید. در نهایت با داشتن مقادیر  $LI$  برای وجود دو نشت هم‌زمان در تمامی حالت‌ها، می‌توان اقدام به تشکیل ماتریسی با عنوان "ماتریس شاخص نشت" نمود.

از آنجا که اندیس نشت به تنهایی نمی‌تواند کمکی به شناسایی نشت نماید، بایستی رابطه کامل‌تری ارائه نمود. لذا از یک اندیس نشت بدون بعد دیگر استفاده می‌شود. در این حالت فرمول (۲) به شکل زیر تعمیم داده می‌شود:

$$LI^r\left(\frac{m}{n}\right) = \frac{LI^r(m)}{LI^r(n)} = \frac{(H_{nol}^m - H_l^m)}{(H_{nol}^n - H_l^n)} \quad (3)$$

که در آن  $m$  و  $n$  گره‌های انتخاب شده جهت فشارسنجی و  $r$  نشان دهنده گره‌های نشت‌دار است.  $LI^r(m/n)$  اندیس نسبی نشت تعریف می‌شود.

با فشارسنجی در گره (۱) مقدار کل نشت در شبکه را می-توان تشخیص داد. برای این منظور با استفاده از نرم‌افزار EPANET2.0 به ازای نشت‌های مختلف مقادیر فشار در گره متصل به مخزن (گره یک) محاسبه می‌شود. این مقادیر به صورت نمودار در شکل (۲-ب) ترسیم شده است.

حال در صورتی که فشار در گره (۱) بر روی سیستم کالیبره شده در واقعیت اندازه‌گیری شود، با توجه به شکل (۲) به سادگی می‌توان مقدار کل نشت را تعیین کرد.

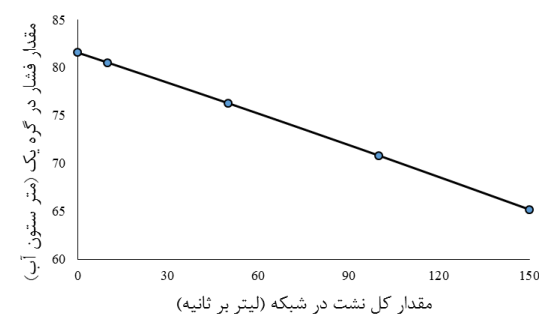
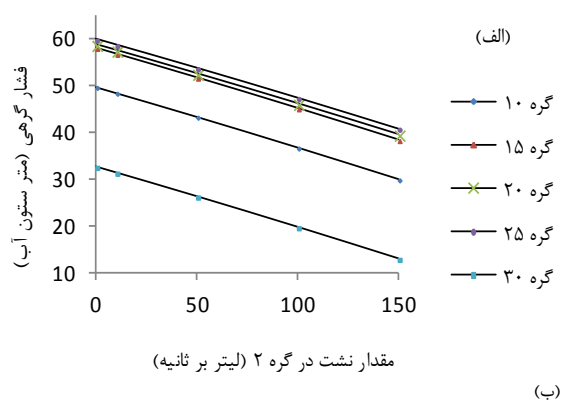
به عنوان مثال فرض می‌شود که فشار در گره (یک) برابر ۷۶/۲۸ متر ستون آب اندازه‌گیری شده باشد. با توجه به شکل (۲) مقدار نشت کل در شبکه برابر ۵۰ لیتر بر ثانیه خواهد بود. بنابراین در حالت وجود دو نشت هم‌زمان جمع دو نشت برابر ۵۰ لیتر بر ثانیه خواهد بود. در روش ارائه شده در این مقاله در صورتی آگاهی از مقدار نشت، تعیین موقعیت‌های نشت در شبکه با دقت بالاتری انجام می‌پذیرد.

#### ۵- تعیین موقعیت نشت در حالت وجود دو نشت هم‌زمان

به عنوان یک مسئله نمونه، از (Poulakis و همکاران، ۲۰۰۳) استفاده می‌شود. مصرف گرهی در تمامی لوله‌ها ۵۰ l/s بوده و قطر لوله‌ها و شماره گره‌ها و لوله‌ها نیز در شکل (۱) نشان داده شده است. ابتدا بر روی شبکه شکل (۱) با اعمال دو نشت هم-زمان که در مجموع برای ۳۰ گره مشتمل بر ۴۳۵ ترکیب می-باشد، شبکه را تحلیل کرده و با استفاده از رابطه (۲) ماتریس شاخص نشت تشکیل می‌شود. این ماتریس در جدول (۱) نمایش داده شده است. برای تشکیل این جدول فرض شده است که دو نشت هم‌زمان ۲۵ لیتر بر ثانیه در شبکه رخ می‌دهد. در این جدول مقادیر ردیف فوقانی حالت‌های گره‌های نشت‌دار بوده و مقادیر ستون سمت چپ بیانگر اثر نشت در سایر گره‌ها می‌باشد و مقادیر داخل جدول نیز مقادیر شاخص نشت بوده است. تهیه این جدول تنها بر اساس کار تحلیلی صورت گرفته و فقط با وجود مشخصات شبکه کالیبره شده می‌توان آن را به دست آورد. پس از انجام کارهای دفتری نیاز به برداشت اطلاعات میدانی است. در گام بعدی فرض شده است دو نشت هم‌زمان ۲۵ لیتر بر ثانیه در گره‌های ۱۷ و ۲۰ رخ داده است. با استفاده از نرم‌افزار EPANET2.0 شبکه را با وجود این دو نشت هم‌زمان تحلیل کرده و مقادیر فشارهای گرهی برداشت می‌شود (جدول (۲)).

$$Q = Cp^n \quad (۵)$$

که در این رابطه  $Q$  دبی خروجی از منفذ،  $p$  فشار و  $C$  ضریب تخلیه روزنه می‌باشد. اگر چه یک سری آزمایش‌ها نشان داده است که در مورد تأثیر فشار بر روی نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری این رابطه برقرار نیست. رابطه بین فشار و نشت که توسط مطالعات مرکز تحقیقات آب انگلستان در انگلیس (نشریه شماره ۳۰۸-الف) به دست آمده است، نشان می‌دهد که تغییرات فشار با نشت در فشارهای متعارف تقریباً خطی است. در این مقاله نیز در یک محدوده کوچک که در این مقاله از صفر تا سه برابر مقادیر مصرف گرهی مورد بررسی قرار گرفته است تغییرات به صورت خطی مشاهده می‌شود که این موضوع در شکل (۲-الف) نمایش داده شده است. در حالت کلی به ازای یک مقدار ثابت برای نشت، با تغییر موقعیت نشت، مقادیر فشارهای گرهی تغییر می‌کنند. به استثنای گره متصل به مخزن که در آن، فشار تنها به مقدار نشت وابسته بوده و مستقل از موقعیت نشت و تعداد گره‌های نشت‌دار است. بنابراین برای تعیین مقدار دقیق کل نشت موجود در شبکه شکل (۱) کفایت مقدار فشار در گره متصل به مخزن (گره یک) اندازه‌گیری شود.



شکل ۲- الف) منحنی مقادیر فشار در گره‌های مختلف در برابر مقدار نشت در گره ۲، ب) منحنی تغییرات فشار در گره (۱) در برابر مقدار کل نشت در شبکه

جدول ۱- ماتریس شاخص نسبی نشت برای مسئله نمونه- دو نشت پایه هم زمان ۲۵ لیتر بر ثانیه

شماره حالت		۱	۲	۳	...	۳۴۷	...	۴۳۵
شماره نشتی	شماره گره	۱و۲	۳و۱	۴و۱	...	۲و۱۷	...	۳و۲۹
		۱	۹۸/۸	۸۳/۵	۷۵/۳		۵۷/۵	
۲	۱۰۰	۹۲/۴	۸۲		۶۸/۲		۴۹/۹	
۳	۹۹/۵	۱۰۰	۸۸/۳		۷۲/۹		۵۵	
۴	۹۹	۹۷/۸	۱۰۰		۸۰/۴		۶۴	
۵	۹۹	۹۷/۶	۹۸/۹		۸۶/۱		۷۱/۲	
۶	۹۸/۸	۹۷/۲	۹۷/۱		۹۲/۲		۸۱/۵	
۷	۹۶/۶	۸۹/۲	۸۰/۷		۶۶/۶		۴۷/۳	
۸	۹۹	۹۲/۱	۸۳		۶۸/۶		۵۰/۱	
۹	۹۹	۹۷/۲	۸۸/۷		۷۴/۱		۵۵/۹	
۱۰	۹۹/۱	۹۷/۹	۹۹/۹		۸۰/۵		۶۴	
۱۱	۹۹	۹۷/۵	۹۷/۶		۹۱/۹		۷۷/۵	
۱۲	۹۸/۸	۹۷/۲	۹۶/۹		۹۳/۴		۸۳/۶	
۱۳	۹۶/۴	۹۰/۵	۸۲		۷۰		۴۹/۵	
۱۴	۹۸	۹۲/۶	۸۳/۹		۷۱/۸		۵۱/۶	
۱۵	۹۸/۸	۹۶/۲	۸۸/۲		۷۴/۶		۵۶/۲	
۱۶	۹۶/۸	۹۷	۹۵/۱	....	۸۶/۳	....	۷۱/۳	
۱۷	۹۸/۸	۹۷/۲	۹۶/۳		۱۰۰		۸۳/۹	
۱۸	۹۸/۶	۹۷	۹۶/۳		۹۵/۳		۸۸/۳	
۱۹	۹۶/۹	۹۱/۵	۸۳/۵		۷۷/۷		۵۲/۱	
۲۰	۹۷/۴	۹۲/۴	۸۴/۵		۸۳/۶		۵۳/۸	
۲۱	۹۸/۱	۹۴/۹	۸۸/۷		۸۲/۱		۶۲/۴	
۲۲	۹۸/۵	۹۶/۲	۹۳/۴		۸۸/۲		۷۹/۱	
۲۳	۹۸/۶	۹۶/۸	۹۵/۴		۹۵/۸		۹۰/۴	
۲۴	۹۸/۸	۹۷	۹۶		۹۵/۴		۹۴/۴	
۲۵	۹۷/۱	۹۱/۸	۸۳/۷		۷۸/۲		۵۲/۶	
۲۶	۹۷/۴	۹۲/۶	۸۵/۲		۸۱/۹		۵۵/۷	
۲۷	۹۸/۱	۹۴/۸	۸۸/۹		۸۳/۶		۶۴/۱	
۲۸	۹۸/۵	۹۶	۹۳/۲		۸۸/۸		۷۷/۹	
۲۹	۹۸/۶	۹۶/۷	۹۵/۱		۹۴/۹		۹۶/۳	
۳۰	۹۸/۶	۹۶/۸	۹۵/۷		۹۵/۲		۱۰۰	

جدول ۲- مقادیر فشارهای گرهی مسئله نمونه- نشت واقعی گره های ۱۷ و ۲۰

شماره گره	کمیت های نشت دار		کمیت های بدون نشت	
	$Q (L/S)$	$H_i^1 (m)$	$Q (L/S)$	$H_i^1 (m)$
۱	۵۰	۸۱/۵۶	۵۰	۷۶/۲۸
۲	۵۰	۶۶/۹۷	۵۰	۶۰/۷۱
۳	۵۰	۶۰/۰۴	۵۰	۵۳/۳۵
۴	۵۰	۴۹/۶۷	۵۰	۴۲/۲۹
۵	۵۰	۴۲/۸۴	۵۰	۳۴/۹۴
۶	۵۰	۳۴/۷۱	۵۰	۲۶/۲۵
۷	۵۰	۷۰/۰۴	۵۰	۶۳/۹۳
۸	۵۰	۶۶/۵۳	۵۰	۶۰/۲۳
۹	۵۰	۵۸/۵	۵۰	۵۱/۷
۱۰	۵۰	۴۹/۶۸	۵۰	۴۲/۲۹
۱۱	۵۰	۳۸/۶۷	۵۰	۳۰/۲۳
۱۲	۵۰	۳۴/۱۷	۵۰	۲۵/۶
۱۳	۵۰	۶۶/۴۵	۵۰	۶۰/۰۲
۱۴	۵۰	۶۳/۶	۵۰	۵۷/۰۱
۱۵	۵۰	۵۸/۰۱	۵۰	۵۱/۱۶
۱۶	۵۰	۴۳/۹۴	۵۰	۳۶/۰۲
۱۷	۵۰	۳۶/۰۷	۷۵	۲۶/۸۹
۱۸	۵۰	۳۳/۳۴	۵۰	۲۴/۵۹
۱۹	۵۰	۶۰/۷۱	۵۰	۵۳/۵۸
۲۰	۵۰	۵۸/۶۴	۷۵	۵۰/۹۷

۲۱	۵۰	۵۰/۱۲	۵۰	۴۲/۵۸
۲۲	۵۰	۴۰/۷۳	۵۰	۳۲/۶۳
۲۳	۵۰	۳۴/۷۴	۵۰	۲۵/۹۵
۲۴	۵۰	۳۲/۷۸	۵۰	۲۴/۰۲
۲۵	۵۰	۵۹/۷۸	۵۰	۵۲/۶
۲۶	۵۰	۵۵/۴۷	۵۰	۴۷/۹۵
۲۷	۵۰	۴۸/۰۸	۵۰	۴۰/۴۱
۲۸	۵۰	۳۹/۸۴	۵۰	۳۱/۶۹
۲۹	۵۰	۳۴/۳۷	۵۰	۲۵/۶۶
۳۰	۵۰	۳۲/۶	۵۰	۲۳/۸۶

گره‌های ۱۷ و ۲۰ است، که به عنوان جواب واقعی با علامت مربع نشان داده شده، تعداد زیادی از جواب‌های غیر واقعی در محدوده بازه نشت قرار گرفته‌اند.

بنابر این باید با افزایش تعداد فشارسنجی‌ها این جواب‌های غیر واقعی را حذف کرد. گره ۲۵ برای فشارسنجی سوم انتخاب می‌شود. با توجه به رابطه (۴) تعداد اندیس‌های نسبی نشت (۳) می‌باشد. در این حالت ۲۵ گره که در هر سه بازه نشت قرار می‌گیرند، دارای احتمال نشت می‌باشند. فشارسنجی چهارم در گره ۲۷ در نظر گرفته می‌شود. در این حالت تعداد اندیس‌های نسبی نشت برابر ۶ خواهد بود که ۱۲ ترکیب مظنون به نشت خواهند بود.

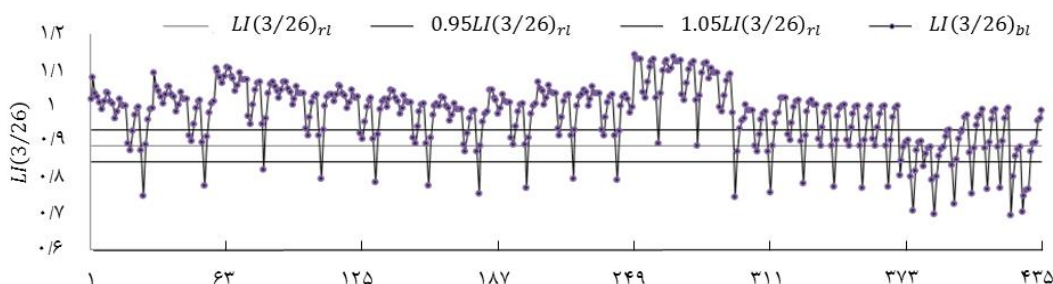
حال محاسبات با انتخاب دو فشارسنجی دلخواه آغاز می‌شود (گره‌های ۳ و ۲۶) و با استفاده از رابطه (۲) و در نظر گرفتن ۵ درصد برای حدود بازه شناسایی نشت، این بازه تعیین می‌شود.

$$LI^{17,20}(m/n) = \frac{(H_{nol}^m - H_l^m)}{(H_{nol}^n - H_l^n)} = LI(3/26)rl$$

$$= \frac{(60.04 - 53.35)}{(55.47 - 47.95)} = 0.8896$$

$LI^{17,20}(3/26) \times (1 \pm 0.05)$  نشت شناسایی بازه حدود

مقادیر  $LI(3/26)_{bl}$  نیز با استفاده از رابطه (۳) و جدول ماتریس نشت (جدول (۱)) به دست می‌آید. نتایج در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، علاوه بر ترکیب ۳۴۷ که نشان‌دهنده نشت



شکل ۳- تغییرات اندیس نسبی نشت در کل ترکیبات دو نشتی ممکن با فشارسنجی در گره‌های ۳ و ۲۶

باشند. این موضوع در شکل (۴) نشان داده شده است. روش انتخاب نقاط فشارسنجی بدین صورت بوده که با در نظر گرفتن ۵٪ برای حدود بازه شناسایی نشت و انتخاب دو گره دلخواه فشارسنجی، محاسبات آغاز شده است. گره سوم فشارسنجی از بین نقاط احتمالی نشت انتخاب می‌شود. در صورتی که گره انتخاب شده جدید از گره‌های احتمالی نشت حذف شود، نشت‌دار نبوده اما اگر گره انتخاب شده باز هم در بین گره‌های نشت‌دار احتمالی باشد، احتمالاً گره انتخاب شده جدید نشت‌دار بوده و یا

در فشارسنجی پنجم نیز گره ۲۰ انتخاب می‌شود که در این حالت تعداد اندیس‌های نسبی نشت برابر ۱۰ بوده و ۱۱ ترکیب مظنون به نشت هستند. در فشارسنجی‌های ششم (گره ۲۹) و هفتم (گره ۶) که تعداد اندیس‌های نسبی نشت آن به ترتیب ۱۵ و ۲۱ خواهند بود به ترتیب ۵ و ۳ ترکیب مظنون به نشت‌اند. در نهایت با انتخاب ۸ فشارسنجی ۳، ۶، ۲۰، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷ و ۲۹، تنها ترکیب ۳۴۷ در تمامی ۲۸ نمودار ترسیم شده در محدوده بازه نشت است. بنابر این ترکیب ۱۷ و ۲۰ گره‌های نشت‌دار می-

شناسایی کند. در این حالت گره‌ی که بیشترین تکرار را دارد گره نشت‌دار می‌باشد. در صورتی که در آخرین فشارسنجی تعداد تکرار گره‌ها با هم برابر باشند گره پرتکرار بر اساس فشارسنجی ما قبل آخر تعیین می‌شود.

برای درک بهتر موضوع فرض می‌شود که نشت گره‌های ۱۷ و ۲۰ به ترتیب ۱۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه باشند. محاسبات با در نظر گرفتن ۵ درصد برای حدود بازه شناسایی نشت آغاز می‌شود. اما در فشارسنجی چهارم نقاط فشارسنجی گره‌های ۳، ۲۵، ۲۶ و ۲۷ می‌باشند. این روش هیچ جوابی نمی‌دهد و بنابر این حدود بازه یک درصد افزایش می‌یابد. این افزایش بازه ادامه می‌یابد، اما در هر مرحله با افزایش فشارسنجی‌ها جوابی به دست نمی‌آید، تا در نهایت با ۱۱ درصد برای حدود بازه شناسایی نشت با ۶ فشارسنجی در گره‌های ۳، ۲۰، ۲۵، ۲۶، ۲۷ و ۲۹ این روش جواب {۱۵ و ۲۰} را می‌دهد. حال در صورتی که گره ۱۵ به عنوان فشارسنجی هفتم انتخاب شود تغییری در جواب حاصل نمی‌گردد، بنابر این محاسبات در همین جا به اتمام می‌رسد. مشاهده می‌شود تعداد تکرار گره‌های ۱۵ و ۲۰ در فشارسنجی ششم برابر یک می‌باشد، بنابر این برای مشاهده گره پرتکرار به جواب‌ها در فشارسنجی پنجم توجه می‌شود که گره ۲۰ بیشترین تکرار را دارد، پس گره ۲۰ قطعاً گره نشت‌دار است و ماکزیمم مقدار نشت را دارد. لازم به ذکر است گره‌های محتمل نشت در فشارسنجی پنجم شامل گره‌های ۶، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۲۰، ۲۳، ۲۴، ۲۹ و ۳۰ است. مشاهده می‌شود در این حالت نیز با وجود این که نشت‌های واقعی بسیار متفاوت از نشت‌های فرضی است، نشت گره ۲۰ به طور دقیق و منطقه تقریبی نشت گره دیگر شناسایی می‌شود.

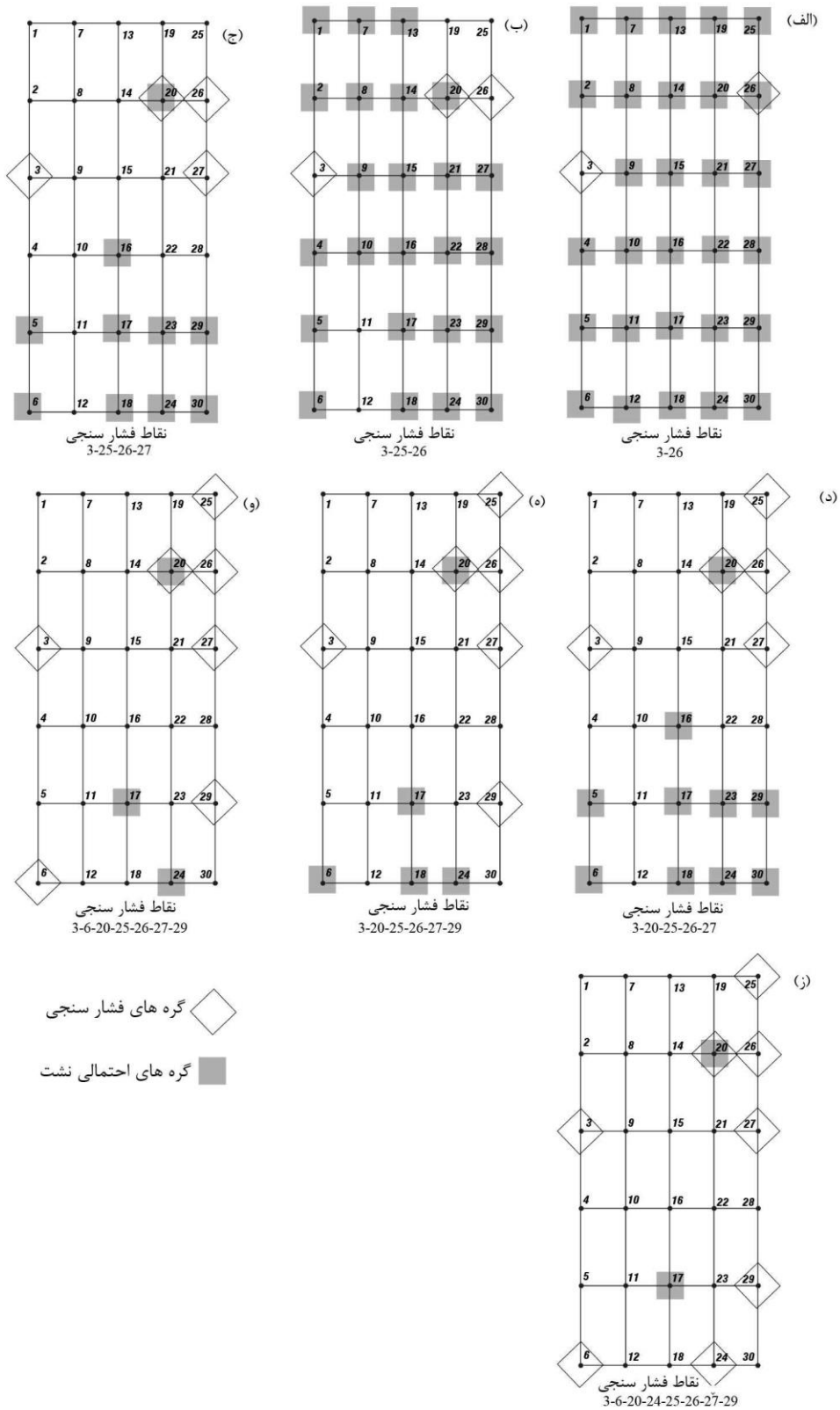
در مثال بعد فرض می‌شود که گره‌های ۲۰ و ۱۷ به ترتیب نشت‌های ۴۰ و ۳۰ لیتر بر ثانیه داشته باشند. در این حالت با در نظر گرفتن پنج درصد برای حدود بازه شناسایی نشت و انتخاب شش فشارسنجی ۳، ۲۰، ۲۵، ۲۶، ۲۷ و ۲۹ این روش دو جواب {۶ و ۲۰} و {۱۷ و ۲۰} را می‌دهد. سپس با انتخاب گره ۶ به عنوان فشارسنجی هفتم تنها جواب گره‌های {۱۷ و ۲۰} می‌باشد و با افزایش فشارسنجی تغییری در جواب‌ها حاصل نمی‌شود. همچنین همان‌طور که در فشارسنجی ششم مشاهده می‌شود، گره ۲۰ بیشترین تکرار را دارد، بنابر این نشت این گره ماکزیمم است. در این مثال نیازی به افزایش حدود بازه نبوده، چرا که با در نظر گرفتن پنج درصد برای حدود بازه شناسایی نشت، جواب‌ها به دو گره ۱۷ و ۲۰ همگرا شدند.

در مجاورت گره نشت‌دار واقع شده است. سایر گره‌های فشارسنجی را به همین صورت از بین گره‌های احتمالی نشت انتخاب می‌شوند. محاسبات تا زمانی ادامه می‌یابد که جواب‌ها به دو یا سه گره همگرا شود. جدول (۴) نشان دهنده این موضوع است.

به منظور نشان دادن جامعیت روش این بار با فرض این که گره‌های ۴ و ۲۰ دارای نشت واقعی ۲۵ لیتر بر ثانیه باشند، نحوه انتخاب فشارسنجی‌ها نشان داده می‌شود. ماتریس شاخص نشت بر اساس دو نشت پایه ۲۵ لیتر بر ثانیه تشکیل شده است. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن ۵٪ برای حدود بازه شناسایی نشت و انتخاب گره‌های ۲ و ۲۲ برای فشارسنجی کار آغاز می‌شود. به جز گره‌های ۲۲، ۲۳، ۲۸ و ۲۹ سایر گره‌ها دارای احتمال نشت هستند. برای فشارسنجی سوم گره ۴ که دارای بیشترین تکرار در بین ۴۳۵ ترکیب است (با ۱۳ بار تکرار) انتخاب می‌شود. این گره از محاسبات حذف نمی‌شود. بنابر این گره ۴، گره نشت‌دار و یا در مجاورت گره نشت‌دار واقع است. حال برای فشارسنجی چهارم گره ۵ که دارای ۱۱ بار تکرار در ترکیبات است انتخاب می‌شود. این گره از محاسبات حذف می‌شود و بنابر این پیش‌بینی می‌شود که گره ۵ نشت‌دار نبوده است. به همین صورت محاسبات ادامه یافته تا جواب‌ها به {۴ و ۲۰} و {۱۰ و ۲۰} همگرا شوند و در صورت انتخاب بیش از ۹ فشارسنجی تغییری در جواب‌ها حاصل نمی‌شود. ملاحظه می‌شود در فشارسنجی ۲ تا ۶ تعداد دفعات تکرار گره ۴ بیشتر از گره ۱۰ می‌باشد و از فشارسنجی ۷ به بعد نیز تعداد دفعات تکرار دو گره با هم برابر است، بنابر این می‌توان گفت که احتمال نشت گره ۴ بیشتر از گره ۱۰ است.

ممکن است که نشت‌های واقعی رخ داده در شبکه با نشت‌های فرض شده اختلاف داشته باشند. در این صورت احتمال دارد با افزایش فشارسنجی به جای آن که جواب‌ها به دو یا سه گره همگرا شود، به هیچ جوابی نرسند. در نتیجه، بایستی حدود بازه شناسایی نشت را افزایش داد و محاسبات را از اول آغاز کرد. در صورتی که با افزایش فشارسنجی باز هم جوابی به دست نیاید، دوباره حدود بازه افزایش می‌یابد. افزایش حدود بازه در هر مرحله یک درصد می‌باشد. در این حالت احتمال‌های وجود دارد:

- ۱- ممکن است این روش موقعیت دقیق هر دو گره نشت‌دار و همچنین گره‌ی که نشت بیشتر را دارد شناسایی کند.
- ۲- ممکن است این روش موقعیت دقیق گره‌ی که نشت بیشتر را دارد و موقعیت تقریبی گره‌ی که نشت کمتر را دارد



شکل ۴- گره‌های احتمالی دارای نشت به ازای فشارسنجی‌های مختلف



در حالت نشت دار، موقعیت نشت را می‌توان مشخص نمود. نتایج این تحقیق نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند با حداقل برداشت اطلاعات هیدرولیکی از نوع فشارهای گرهی، موقعیت نشت‌ها و علاوه بر آن، گرهی که نشت بیشتر را دارد تعیین نمود. در انتخاب نشت پایه نیز احتمال رخ داد دو حالت وجود دارد:

- ۱- مقدار نشت پایه برابر با مقدار نشت واقعی می‌باشد.
- ۲- مقدار نشت پایه می‌تواند کمتر و یا بیشتر از نشت واقعی باشد.

که در حالت اول این روش به طور دقیق موقعیت دو نشت را تعیین کرده و علاوه بر آن قادر است که گرهی که نشت بیشتر را دارد تعیین کند. در این حالت بازه شناسایی نشت به علت وجود خطا در کالیبراسیون و یا دستگاه‌های فشارسنجی در این مقاله ۵٪ از مقدار اندیس نسبی نشت در نظر گرفته شد.

در حالت دوم این روش ممکن است موقعیت دقیق دو نشت به همراه گرهی که نشت بیشتر را دارد و یا موقعیت دقیق گرهی که نشت بیشتر و موقعیت تقریبی گرهی که نشت کمتر را دارد تعیین کند. اما در این حالت این روش حتماً موقعیت گرهی که نشت بیشتر را دارد تعیین می‌کند. همچنین در این حالت، بازه اولیه شناسایی نشت در این مقاله ۵٪ از مقدار اندیس نسبی نشت در نظر گرفته و در صورتی که با افزایش فشارسنجی جوابی به دست نیاید، این مقدار افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که انتخاب فشارسنجی نیز نقش مهمی در انتخاب گرہ‌های نشت‌دار ایفا می‌کنند، به طوری که به جز دو فشارسنجی اول که انتخاب آن‌ها دلخواه است، انتخاب سایر فشارسنجی‌ها بستگی به گرہ‌های نشت‌دار و تعداد تکرار آن‌ها دارد. افزایش تعداد فشارسنجی‌ها نیز تا زمانی ادامه می‌یابد که جواب‌ها به دو و یا سه گرہ همگرا شوند.

همچنین روش معرفی شده در این مقاله مستقل از تعداد و مقدار نشت‌های موجود در شبکه است. بر اساس تعداد نشت‌های موجود در شبکه تنها تغییر ایجاد شده در روند حل مسأله، ابعاد ماتریس شاخص نشت است. به عنوان مثال برای شبکه مورد بررسی در این مقاله در صورتی که تنها یک نشت در شبکه رخ دهد، با توجه به ۳۰ گرہی بودن شبکه پولاکیس، ماتریس شاخص نشت دارای ۳۰ ردیف و ۳۰ ستون خواهد بود. به طریق مشابه برای حالت دو نشت بر اساس رابطه (۱) ارائه شده در مقاله، ۴۳۵ حالت می‌تواند رخ دهد و بنابر این ماتریس شاخص نشت دارای ۳۰ ردیف و ۴۳۵ ستون خواهد بود. در نتیجه در صورتی که روش برای حالت یک نشت و دو نشت به صورت هم-زمان مورد استفاده قرار گیرد، ماتریس شاخص نشت دارای ۳۰ ردیف و ۴۶۵ حالت خواهد بود. به همین ترتیب با افزایش تعداد نشت‌های یک شبکه آبرسانی ابعاد ماتریس شاخص نشت نیز به

جدول ۴- نمایش نحوه انتخاب نقاط فشار سنجی بر اساس

تعداد تکرار گرہ‌ها

تعداد گرہ‌های فشار سنجی	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
گرہ‌های فشارسنجی انتخابی	۲	۴	۵	۱۰	۱	۲۶	۲۵	۱۹
در هر مرحله	۲۲							
شماره گرہ								
۱	۶	۳	۲	۲	۰	۰	۰	۰
۲	۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۷	۴	۲	۲	۲	۰	۰	۰
۴	۱۳	۱۲	۱۲	۱۲	۱۰	۳	۲	۱
۵	۱۲	۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۶	۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۷	۷	۳	۲	۲	۰	۰	۰	۰
۸	۱۰	۲	۱	۱	۱	۰	۰	۰
۹	۴	۳	۲	۲	۲	۰	۰	۰
۱۰	۱۲	۱۱	۱۱	۱۱	۹	۳	۲	۱
۱۱	۷	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۲	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۳	۱۱	۳	۲	۲	۲	۰	۰	۰
۱۴	۷	۳	۲	۲	۲	۰	۰	۰
۱۵	۶	۳	۲	۲	۲	۰	۰	۰
۱۶	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۷	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۸	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۹	۷	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۰
۲۰	۷	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۲۱	۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲۴	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲۵	۶	۳	۲	۲	۲	۲	۰	۰
۲۶	۷	۲	۲	۲	۲	۰	۰	۰
۲۷	۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

تعداد نقاط تکرار گرہ‌ها

۶- نتیجه گیری

شناسایی نشت در شبکه‌های توزیع آب نقش قابل توجهی در کاهش آب به حساب نیامده دارند. در این مقاله یک ایده جدید جهت تعیین موقعیت نشت در شبکه توزیع آب با استفاده از تحلیل اختلاف فشارهای گرہی در حالت نشت دار و بدون نشت ارائه گردید. در این روش با انتخاب یک مقدار پایه برای نشت و مدل سازی هیدرولیکی شبکه در نرم‌افزار EPANET2.0، ماتریس شاخص نشت را تشکیل داده و پس از برداشت فشارهای گرہی

Campisano A, Creaco E, Modica C, "RTC of Valves for Leakage Reduction in Water Supply Network", Journal WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT (2010) 136: 1(138).

Internal World Bank, Report (2004).

Li W, Ling W, Liu S, Zhao J, Liu R, Chen Q, Qiang Z, Qu J, "Development of system for detection, early warning, and control of pipeline leakage in drinking water distribution: A case study", Journal Environmental Science (2011), 23(11) 1816-1822.

Marunga A, Hoko Z, Kaseke E, "Pressure management as a leakage reduction and water demand management tool: The case of the City of Mutare, Zimbabwe", Journal Physics and Chemistry of the Earth 31 (2006) 763-770.

Nicolini M, Giacomello C, Ded K, "Calibration and Optimal Leakage Management for a Real Water Distribution Network", Journal Water Resources Planning and Management (2011) 134-142.

Perez R, Puig V, Pascual J, Quevedo J, Landeros E, Peralta A, "Methodology for leakage isolation using pressure sensitivity analysis in water distribution networks", Journal Control Engineering Practice 19 (2011) 1157-1167.

Poulakis Z, Valougeorgis D, Papadimitriou C, (2003), "Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework", Probabilistic Engineering Mechanics. 18: pp. 315-327.

The New Zealand Water and Waste Association Wairoa Aotearoa (2009), "Modeling special interest group", national modeling guidelines, "Water Distribution Network Modeling", Draft version 01 revision 04, April 2009.

صورت تصاعدی افزایش یافته است، لیکن با انجام فشارسنجی- های گرهی امکان شناسایی گره‌های مظنون به نشت وجود داشته و در صورت تغذیه شبکه توسط یک مخزن به راحتی می- توان مقدار دبی نشت را تخمین زد.

## ۷- مراجع

تجربشی م، ابریشم‌چی ا، ۱۳۸۳، "مدیریت تقاضای منابع آب در کشور"، پذیرفته شده در اولین همایش روش‌های پیشگیری از اتلاف منابع ملی.

سلطانی اصل م، فغفور مغربی م، "مدیریت هوشمند فشار به منظور کاهش نشت در شبکه‌های آبرسانی، مطالعه موردی: منطقه سرافرازان مشهد"، مجله آب و فاضلاب، ۱۳۸۸، شماره ۳.

سلطانی ج، محمد رضاپور طبری م، "تعیین عوامل مؤثر بر نرخ شکست لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تلفیق شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنیک"، نشریه آب و فاضلاب، ۱۳۹۱، شماره ۳.

شرکت آب و فاضلاب کشور، ۱۳۸۹، "آمار و اطلاعات شرکت‌های آب و فاضلاب روستایی"، گزارش پایان سال ۸۹.

فغفورمغربی م، حسن‌زاده ی، یزدانی س، ۱۳۹۱، "کالیبراسیون مدل‌های شبکه توزیع آب شهری با استفاده از روش بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها"، فصل‌نامه علمی- پژوهشی آب و فاضلاب اصفهان، شماره ۸۵.

نشریه "راهنمای شناخت و بررسی عوامل مؤثر در آب به حساب نیامده و راهکارهای کاهش آن"، شماره ۳۰۸- الف، ۱۳۸۹.

## EXTENDED ABSTRACT

# Application of Nodal Pressure Measurement to Leakage Detection

Mohammad Attari, Mahmoud F. Maghrebi \*, Alireza Monavarian

Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

Received: 28 July 2016; Accepted: 12 March 2017

### Keywords:

Leakage detection, Pressure measurement, Nodal pressure, Water distribution network

## 1. Introduction

Water loss has been changed into a global concern in recent decades (Araujo et al., 2006). Since water demand has been increased, it is necessary to manage its consumption patterns to overcome this problem. The most important part of managing water consumption is to decrease the water loss. In this paper, a new idea is presented to detect the leakage location and its quantity in a water distribution network, using nodal pressures analyzes in two cases of with and without leakage discharges. The results have shown that this method not only can determine the location of leaky node, but also the leakage quantity by using nodal pressure data.

## 2. Methodology

The applied method in this paper is based on the calculation of nodal pressure differences. In order to study the effect of the leakage on the pressure variations in water distribution systems, two analyses should be performed, namely with and without the presence of leakage. The leakage index can then be calculated as follows:

$$LI^r(i) = \frac{H_{nol}^i - H_l^i}{(H_{nol}^i - H_l^i)_{max}} \times 100 \quad (1)$$

Where  $H_{nol}^i - H_l^i$  is the head difference at node  $i$  due to leakage at node  $r$ , and  $LI^r(i)$  is the leakage index. As the leakage index formula alone would not help the detection of the leakage, a comprehensive equation should be developed. In this case, equation (1) is generalized into the following form:

$$LI^r\left(\frac{m}{n}\right) = \frac{LI^r(m)}{LI^r(n)} = \frac{(H_{nol}^m - H_l^m)}{(H_{nol}^n - H_l^n)} \quad (2)$$

Where  $m$  and  $n$  are chosen nodes for pressure measurements,  $r$  refers to the leaky node and  $LI^r(m/n)$  is the ratio of the leakage indices.

## 3. Results and discussions

The network, which has already been introduced by Poulakis et al (Poulakis et al., 2003), is used in the present work. This network contains 20 loops, 30 nodes, 50 pipes and one reservoir. The horizontal and

\* Corresponding Author

E-mail addresses: mohamad.attari@yahoo.com (Mohammad Attari), magrebi@yahoo.com (Mahmoud F. Maghrebi), a.monavarian@yahoo.com (Alireza Monavarian).

vertical lengths of pipes are 1000 and 2000 meters, respectively, the absolute roughness ( $e$ ) of all pipes is 0.26 millimeter and the nodal consumption of all pipes is considered to be 50 liters per second. Fig. (1) illustrates the overall configurations of the network.

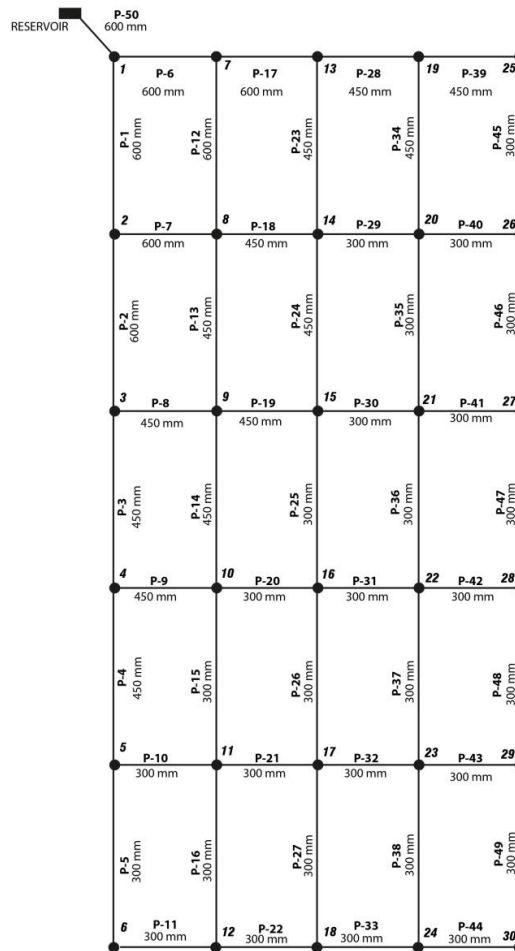


Fig. 1. Case study network (Poulakis et al., 2003)

By increasing the quantity of leakage, pressure decreases linearly. Generally, for a fixed amount for each leakage, by changing the position of leakage, the nodal pressures will be changed, except for the node which is connected to the reservoir. The pressure at this node only depends on the amount of leakage, and is independent of the leakage position. Thus, for a precise determination of the total amount of existing leakage in the network of Fig. (1), it is sufficient to measure the pressure values at node 1 that is connected to the tank. For this purpose, the pressure at node 1 for different leakages are calculated, using the EPANET 2.0 software.

At first two simultaneous leakages are applied to the network of Fig.1 with a total number of combinations equal to 435. Then, the network is analyzed and the matrix of leakage index is computed, using Eq. (1).

This matrix is shown in Table (1). It is supposed that two simultaneous leakage discharges with a magnitude of 25 liters per second have occurred within the network. In this table the values of the upper row are leakage modes, the left column values show the effect of leakage on other nodes and the values within the table are the leakage indices. Calculation of this table is an analytic work and it can only be achieved through the existence of calibrated network characteristics.

Table 1. A short view of the leakage matrix for two simultaneous leaks with equal amounts of 25 l/s.

Leaky node	1,2	1,3	1,4	...	17,20	...	29,30
Node number							
1	89.79	83.5	75.3	...	57.5	...	41.64
...	...	...	...	...	...	...	...
30	98.63	96.8	95.7	...	95.2	...	100

In the next step, it is assumed that two leaks each with a discharge of 25 l/s are applied simultaneously to nodes 17 and 20. Then the network is analyzed by EPANET 2.0 software and the nodal pressures are calculated.

Now as a part of field measurement, pressure at two arbitrary nodes (nodes 3 and 26) have been performed. Then, using Eq. (1), the associated leak index calculated based two nodes of pressure is obtained. Due to imperfect network calibration, inconsistency between the simulated and real leak discharges and some error associated with probes, five percent variation in leakage detection is considered (Aotearoa, 2009):

$$LI^{17,20}(3/26)_{ri} = 0.8896$$

So, the leak index of the suspected nodes to leak should be within the following range:  $[0.95 \times 0.8896, 1.05 \times 0.8896]$

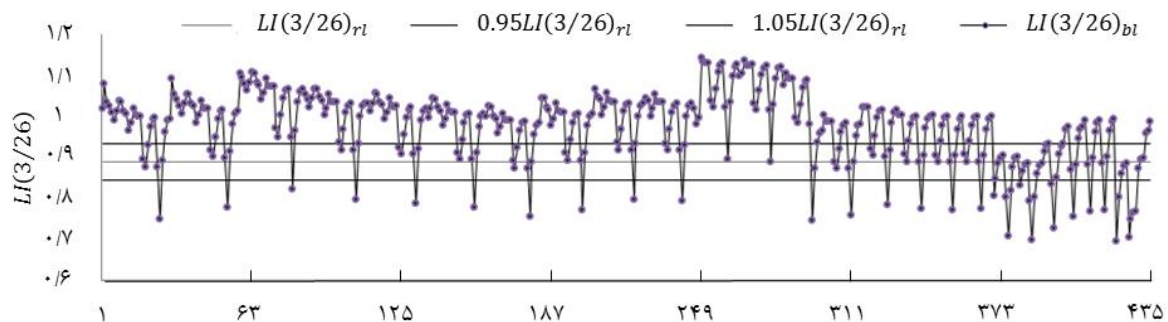


Fig. 2. Variation of the relative leakage index for all the feasible combinations

In order to calculate the base leakage index, the values  $LI^{17,20}(3/26)_{bi}$  with a total number of 435, are calculated using Eq. (2) and leakage matrix is given in Table 1. The results are shown in Fig. (2). Fig. (2) shows the relative leak indices calculated for the whole combination numbers of two leaky nodes in the network. Additionally, leakage index due to leaks at nodes 17 and 20 (as the real leaks), is marked with squares. It can be observed that a large number of unreal answers have been located out of the acceptable interval. So, by increasing the number of pressure measurements, the unreal answers will be eliminated. Node 25 is selected for the third pressure measurement. This leads to a total number of three leak indices: 3/25, 3/26 and 25/26. As the number of nodal pressure measurements is increased, the intersection of the suspected leaky nodes will be decreased. The results have shown that three nodal pressure measurement is not enough so the number of the pressure measurement should be increased. From the observed results, it is found that a total number of 8 pressure measurements, namely at nodes 3, 6, 20, 24, 25, 26, 27 and 29, will be able to exactly detect the leaky nodes i.e. nodes 17 and 20. The arrangement of the pressure measurements is an important factor which may lead to still lower number of pressure measurements.

#### 4. Conclusions

In this research, a new idea has been presented to detect the leakage location and its quantity in a water distribution network. The work can be divided into two parts. In the first part, pressure analysis in two cases of with and without leakage conditions will be performed by the use of EPANET. Then at the second part, the actual pressure measurement from the real network will be carried out. Comparing the simulated and real leak indices will consider as a measure for leak detection in the network. A total number of 8 nodal pressure measurement is found suitable for the leak detection in a network with a moderate size such the one given in this research work.

#### 5. References

- Araujo LS, Ramos H, Coelho ST, Pressure Control for Leakage Minimization in Water Distribution System Management, Journal Water Resources Management (2006) 20, 133-149.
- Poulakis Z, Valougeorgis D, Papadimitriou C, (2003), "Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework", Probabilistic Engineering Mechanics. 18, 315-327.
- The New Zealand Water and Waste Association Wairoa Aotearoa (2009), "Modeling special interest group", national modeling guidelines, "Water Distribution Network Modeling", Draft version 01 revision 04, April 2009.