

روش نوین نشت‌یابی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

محمد عطاری^۱، محمود فغفور مغربی^۲

۱- دانشجوی دکترای مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
 ۲- استاد گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
 (نویسنده مسئول) maghrebi@um.ac.ir

پذیرش ۹۵/۵/۱۷

دریافت ۹۴/۹/۲۸

چکیده

در حال حاضر هدر رفت آب به یک نگرانی جهانی تبدیل شده است. تقاضا برای آب در حال افزایش است. این مسئله مدیریت تقاضا و اصلاح الگوی مصرف را ضروری ساخته است. از مهم‌ترین روش‌های مدیریت مصرف، کاهش آب به حساب نیامده است. در این پژوهش یک ایده جدید برای تعیین موقعیت و مقدار نشت‌های موجود در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شبکه‌های عصبی معرفی شد. در این روش با تولید داده‌های آموزشی و اعمال آن به شبکه عصبی، شبکه قادر خواهد بود که با دریافت فشار گرهی، موقعیت و مقدار تقریبی نشت گرهی را تعیین کند. تولید داده‌های آموزشی با اعمال نشت فرضی در گره‌های مشخصی از شبکه و برداشت فشار گرهی انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که این روش می‌تواند با حداقل برداشت اطلاعات هیدرولیکی از نوع فشارها، علاوه بر تعیین موقعیت نشت‌های موجود گرهی، میزان نشت در هر یک از گره‌ها را نیز با دقت مناسبی تعیین کند.

واژه‌های کلیدی: نشت‌یابی، فشارسنجی، شبکه‌های عصبی، شبکه توزیع آب

۱- مقدمه

۲۰ درصد از کل درآمدهای شرکت آب و فاضلاب کشور را برای تعمیر، بازسازی و اصلاح به خود اختصاص داده است که حدود ۳۰ درصد این حوادث روی لوله‌های سامانه توزیع آب بوده است (Soltani & Mohammad Rezapour Tabari 2002).

نشت آب نه تنها منجر به اتلاف منابع آب با کیفیت می‌شود بلکه منجر به آلودگی آب‌های آشامیدنی و همچنین سبب آسیب‌های جدی به انسان و ساختمان‌های اطراف محل نشت می‌شود (Li et al. 2011; Campisano et al. 2010).

هم‌اکنون روش‌هایی چون ابزارهای صوتی، موازنه جرم، عکس برداری هوایی بر مبنای پایش حرارتی، گازهای رسام توسط متصدیان صنعت آب برای شناسایی و کاهش نشت مورد استفاده قرار می‌گیرند (Covas & Ramas 2010). علاوه بر این استفاده از روش‌های مدیریتی نظیر مدیریت هوشمند فشار، از جمله روش‌های موثر در کاهش نشت از شبکه‌های توزیع آب شهری می‌باشند (Soltani Asl & Moghrebi 2008). اگر چه روش‌های نشت‌یابی محلی در برخی شرایط دارای دقت مناسبی هستند، ولی استفاده از آنها هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و در برخی موارد دارای اثر بخشی لازم نیستند؛ به‌عنوان نمونه ابزارهای صوتی برای لوله‌های پلاستیکی

کشور ایران با متوسط بارش حدود ۲۶۰ میلی‌متر در سال در زمره مناطق خشک جهان به شمار می‌رود (Tajrishy & Abrishamchi 2004).

بانک جهانی در گزارشی از کاهش سرانه آب قابل استحصال به‌عنوان چالش پیش روی کشورمان نام برده است. تمام آب ورودی به شبکه‌های توزیع آب مصرف نمی‌شود و بخش قابل توجهی از آن از طریق نشت یا آب به حساب نیامده به هدر می‌رود و هزینه سنگینی را به سازمان‌های آب و فاضلاب تحمیل می‌کند. (Karamouz et al. 2005). 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 است (National Water & Wastewater Co. 2010).

تعداد رخداد حوادث در شبکه آبرسانی معمولاً بسیار بالا است. به‌عنوان مثال در سال ۱۳۷۷ حدود یک میلیون حادثه در سامانه‌های توزیع آب و فاضلاب کشور رخ داده است که بیش از

در پژوهش دیگری تلاش شد با کنترل فشار، مقدار نشت در شبکه به حداقل رسانده شود که نتایج آن موفقیت‌آمیز گزارش شد به طوری که بدون محدودیت قابل توجه در کارایی سیستم مدیریت فشار در شبکه صورت گرفت (Araujo et al. 2006).

در این پژوهش، ایده‌ای جدید به منظور تعیین موقعیت و مقدار نشت‌های موجود در شبکه توزیع آب با استفاده از حداقل برداشت اطلاعات هیدرولیکی از نوع فشارهای گرهی در شبکه معرفی شد. این روش مبتنی بر محاسبه اندازه‌گیری تغییرات فشار ناشی از وجود نشت‌ها در شبکه نسبت به حالت بدون نشت است. در روش مذکور با تولید داده‌های آموزشی و اعمال آن به شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه قادر خواهد بود که با دریافت فشار، موقعیت و مقدار دقیق نشت گرهی را تعیین کند. نحوه تولید داده‌های آموزشی نیز با اعمال نشت فرضی در برخی گره‌های شبکه و برداشت فشار گرهی بر روی شبکه مدل‌سازی شده انجام شد. از مزایای روش فوق می‌توان به عدم حساسیت آن به تعداد نشت‌های موجود در شبکه، شناسایی دقیق موقعیت نشت‌ها، تعیین کمیت نشت با دقت بالا و سادگی انجام کار تنها با برداشت تعداد کمی فشار گرهی، اشاره کرد.

۲- شبکه مورد بررسی

شبکه مورد مطالعه در این مقاله در شکل ۱ نشان داده شده است (Poulakis et al. 2003).

به منظور انجام مدل‌سازی نرم‌افزار شبکه، لازم است تمامی مشخصات شبکه موجود باشد و نیز عملیات کالیبراسیون بر روی آن انجام شده باشد. برای این منظور ابتدا شبکه مورد بررسی شامل لوله‌هایی افقی و عمودی به طول به ترتیب ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متر، متوسط زبری مطلق ۰/۲۶ میلی‌متر و ۲۰ حلقه، ۳۰ گره، ۵۰ لوله و یک مخزن در نرم‌افزار EPANET2.0 مدل شد و مشخصات شبکه به طور کامل به نرم‌افزار داده شد (شکل ۱).

۳- تعیین مقدار دقیق نشت در شبکه

با افزایش مقدار نشت، فشار به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد. اما در یک محدوده کوچک که در این پژوهش 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-a

دارای خطای زیادی می‌باشند (Hunaidi et al. 1998). 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 درصد به ۳۰ درصد در یک دوره بیش از ۱۰ ساله، امکان دستیابی ۱۴۸۰۰۰ نفر از افراد به شبکه آبرسانی فراهم شده است (Marunga et al. 2006).

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 پژوهش‌های انجام شده به منظور نشت‌یابی و کنترل نشت، فشار به عنوان یک عامل مهم در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال در سال ۲۰۱۱ با استفاده از آنالیز حساسیت فشار در گره‌های شبکه، موقعیت نشت حتی در شرایط عدم قطعیت تقاضا تعیین شده است (Perez et al. 2011). در پژوهش دیگری با استفاده از نرم‌افزار EPANET2.0 و با در نظر گرفتن حداقل جریان شبانه و در یک بازه زمانی تقریباً سه ساله نشان داده شد که با کاهش ۳۵ درصدی فشار در شبکه مقدار نشت را می‌توان ۲۵ درصد کاهش داد (Marunga et al. 2006).

در پژوهشی با اعمال الگوریتم چند منظوره ژنتیکی، مکان مناسب قرار دادن دریچه‌های کاهش فشار به طوری تعیین شده که تعداد دریچه‌ها به حداقل برسد و مقدار نشت مینیمم شود (Nicolini et al. 2011). همچنین سلطانی اصل و فغفور مغربی 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 (Soltani Asl & Maghrebi 2008).

مغربی و عطاری به انجام فشارسنجی در حالت وجود و عدم وجود نشت در شبکه در حالت وجود دو نشت همزمان، موقعیت نشت‌ها را در شبکه آبرسانی تعیین کردند (Maghrebi & Attari 2013).

در پژوهش دیگری با استفاده از اطلاعات موجود شبکه شامل جنس، قطر، فشار، عمق قرارگیری لوله و سن به تعیین رابطه‌ای برای پیش‌بینی زمان نشت پرداخته شده است (Jing & Zhi-Hong 2012).

همچنین روشی برای تشخیص نشت در شبکه‌های آب شهری با استفاده از سیستم‌های تشخیص صوتی پیشنهاد شده است (Prodon et al. 2010).

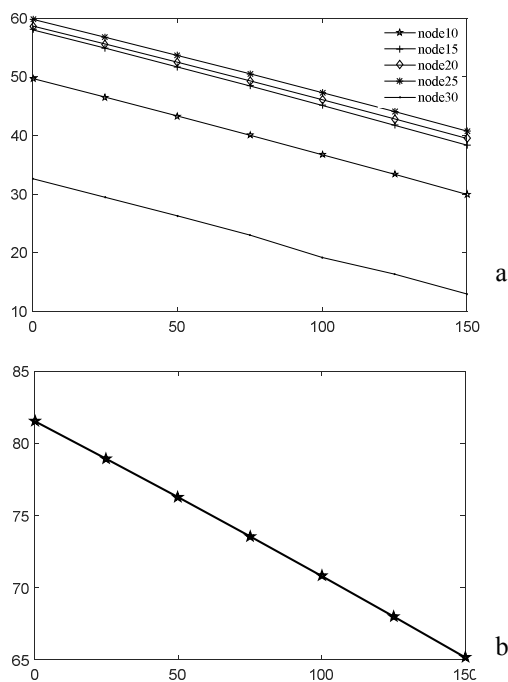


Fig. 2. a) Pressure in different nodes against the amount of leakage in node 2. b) Pressure changes in node 1 against total leakage of network

شکل ۲- a) فشار در گره‌های مختلف در برابر مقدار نشت در گره ۲ و تغییرات فشار در گره ۱ در برابر مقدار کل نشت در شبکه (b)

برای این منظور با استفاده از نرم‌افزار EPANET2.0 به ازای نشت‌های مختلف مقادیر فشار در گره متصل به مخزن (یعنی گره یک) محاسبه می‌شود. این مقادیر به صورت شکل ۲- b ترسیم شده است. با توجه به شکل ۲ که حاصل از تحلیل نرم‌افزاری است، مقدار فشار محاسبه شده در گره متصل به مخزن در شبکه واقعی، مقدار نشت در شبکه واقعی تعیین می‌شود.

۴- نحوه آموزش شبکه عصبی

پس از انتخاب یک مدل مناسب که در این مقاله شبکه عصبی مصنوعی بوده است، اولین مرحله به منظور دست‌یابی به موقعیت و مقدار نشت، آموزش شبکه فوق است. در این مرحله با اعمال یک سری داده‌های ورودی به شبکه عصبی مصنوعی که خروجی آنها نیز مشخص است، شبکه به نحوی آموزش می‌بیند که ارتباط بین ورودی و خروجی‌ها را بیابد. سپس با اعمال نشت فرضی در برخی از گره‌های شبکه و محاسبه فشار گرهی بر روی شبکه مدل‌سازی شده، از اطلاعات حاصل به‌عنوان ورودی‌های آموزش شبکه عصبی

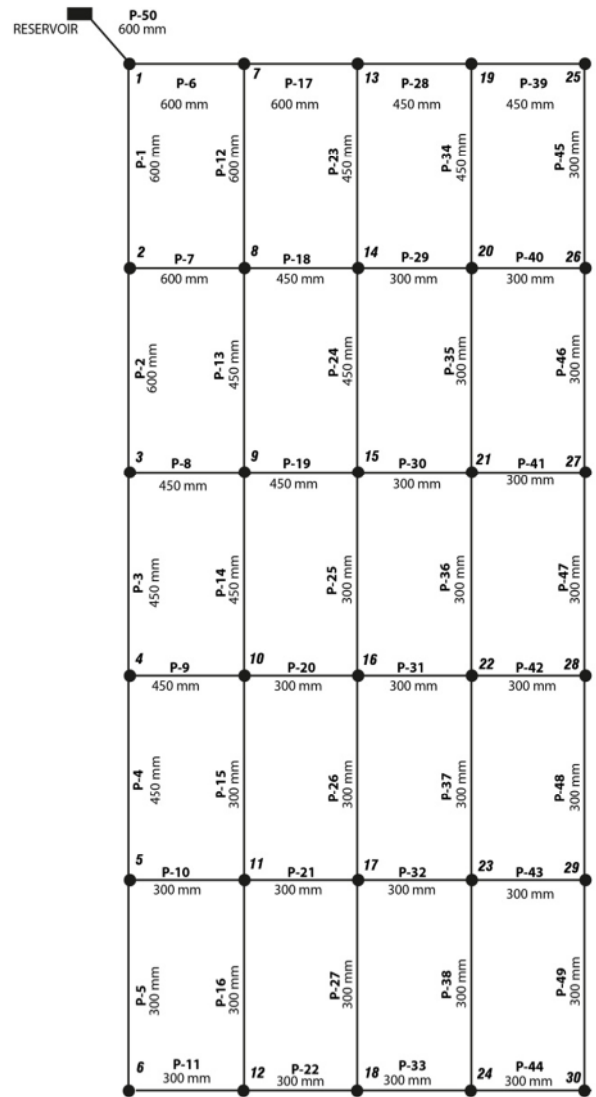


Fig. 1. Layout of the test network (Poulakis et al. 2003)
 شکل ۱- شبکه مورد مطالعه (پولاکیس و همکاران ۲۰۰۳)

نمایش داده شده است و در صورتی که تغییرات نشت در محدوده وسیع‌تری مورد بررسی قرار گیرد، رابطه نشت و فشار به صورت غیر خطی مشاهده خواهد شد. 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. این موضوع در حالتی برقرار است که مخزن تنها با یک گره مستقیماً به شبکه متصل باشد. بنابراین برای تعیین مقدار دقیق کل نشت موجود در شبکه شکل ۱، کافی است مقدار فشار در گره متصل به مخزن (گره یک) اندازه‌گیری شود.

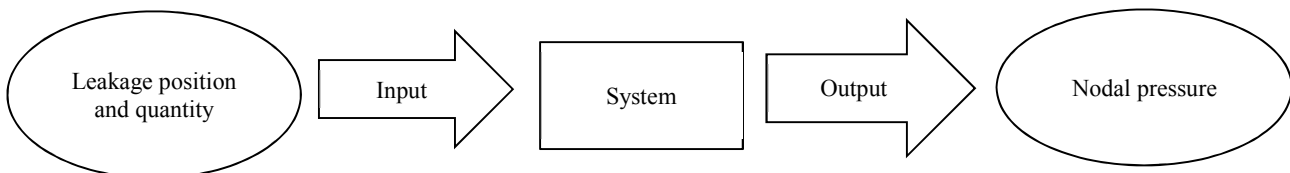


Fig. 3. Input and output system data for training

شکل ۳- داده‌های ورودی و خروجی سیستم برای آموزش

با توجه به شبکه مدل‌سازی شده با اعمال مقادیر مصرف گرهی که در شکل ۴ نشان داده شده است، می‌توان مقادیر فشار تمامی گره‌ها را با استفاده از نرم‌افزار EPANET2.0 به دست آورد. مقادیر فشار محاسبه شده خروجی‌های سیستم برای آموزش است. با اعمال ماتریس نشان داده شده در شکل ۴ و ماتریس فشار به دست آمده حاصل از تحلیل نرم‌افزاری به شبکه‌های عصبی، سیستم رابطه بین مقادیر فشار با موقعیت و مقدار نشت را پیدا خواهد کرد. بدیهی است که هر چه تعداد داده‌های آموزشی بیشتر باشد شبکه نیز بهتر آموزش خواهد دید. در این مقاله تعداد داده‌های آموزشی برابر ۹۷۵ بوده است. همچنین به منظور آموزش شبکه فرضیات زیر اعمال شده است

۱- دو نشت همزمان در شبکه رخ می‌دهد. تمام داده‌های آموزشی با فرض وجود دو نشت همزمان تولید شده و مقادیر فشار متناظر با آن محاسبه شده است.

۲- مقدار کل نشت در شبکه برابر ۵۰ لیتر بر ثانیه است. در این حالت فرض شده جمع مقدار نشت در دو گره برابر ۵۰ است. به عنوان مثال اگر گره‌های ۵ و ۱۳ نشت داشته باشند و میزان نشت گره ۵ برابر ۲۰ لیتر فرض شده باشد، مقدار نشت گره ۱۳ برابر ۳۰ لیتر خواهد بود. در صورتی که میزان نشت در شبکه ثابت فرض نشود، باید به ازای مقادیر مختلف نشت، داده‌های آموزشی تولید نمود که در این حالت تعداد داده‌های لازم برای آموزش مناسب شبکه بسیار زیاد خواهد بود. همانطور که اشاره شد با محاسبه فشار در گره متصل به مخزن (گره یک) در شبکه واقعی و با استفاده از شکل ۲- b که حاصل از تحلیل نرم‌افزاری است، می‌توان مقدار دقیق نشت را محاسبه کرد.

۳- مصرف گرهی برای تولید کلیه داده‌های آموزشی برای تمام گره‌ها ثابت در نظر گرفته شده و مقدار آن برابر ۵۰ لیتر بر ثانیه فرض شده است.

25 $\frac{lit}{s}$	1	7	13	19	25
25 $\frac{lit}{s}$	2	8	14	20	26
	3	9	15	21	27
	4	10	16	22	28
	5	11	17	23	29
	6	12	18	24	30

Fig. 4. An example of input matrix to system for training artificial neural network

شکل ۴- نمونه‌ای از ماتریس ورودی به سیستم برای آموزش شبکه

عصبی مصنوعی

مصنوعی استفاده می‌شود. در این مرحله شبکه عصبی مصنوعی رابطه بین موقعیت و مقدار نشت را با فشار گرهی آموزش می‌بیند. بنابراین به منظور آموزش شبکه عصبی مصنوعی داده‌های ورودی موقعیت و مقدار نشت و خروجی‌ها نیز مقادیر فشار گرهی است. لازم به ذکر است که در داده‌های آموزشی شبکه عصبی مصنوعی نیازی به اطلاعات در زمان عدم وجود نشت نیست (شکل ۳).

به عنوان نمونه با فرض مصرف گرهی برابر ۵۰ لیتر بر ثانیه برای تمامی گره‌ها و در نظر گرفتن میزان نشت برابر ۲۵ لیتر بر ثانیه برای هر کدام از گره‌های ۱ و ۲ ماتریس ورودی به سیستم مطابق شکل ۴ خواهد بود. این ماتریس دارای یک ستون است و تعداد ردیف‌های آن معرف تعداد گره‌های شبکه و برابر ۳۰ است.

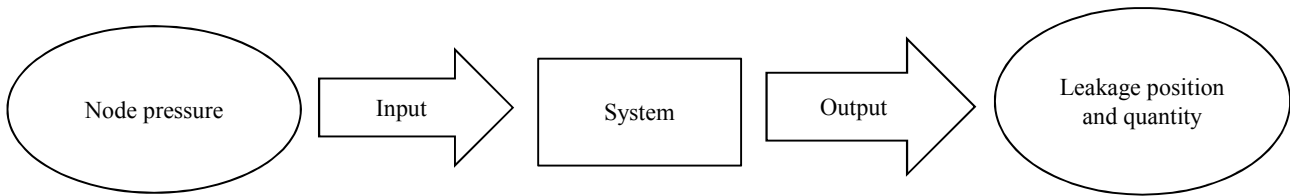


Fig. 5. Input & output data after network training

شکل ۵- داده‌های ورودی و خروجی پس از آموزش شبکه

فرض می‌شود. با این فرض، منحنی تغییرات فشار در یک گره خاص به ازای ترکیبات مختلف دو نشت را می‌توان ترسیم نمود. به‌عنوان مثال با فرض وجود نشت کل ۵۰ لیتر بر ثانیه در شبکه شکل ۱، شکل ۶ که منحنی تغییرات فشار در ۳ گره شماره یک، دو و شش از شبکه برای ترکیبات مختلف دو نشت ۲۵ لیتر بر ثانیه است را می‌توان ترسیم کرد. تعداد ترکیبات در این حالت برای دو نشت همزمان برای شبکه ۳۰ گره‌ی نشان داده شده در شکل ۱ برابر ۴۳۵ حالت است که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\binom{30}{2} = \frac{30 \times 29 \times 28!}{2! \times 28!} = 435$$

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نوسانات فشار در گره ۶ بسیار زیادتر از گره ۲ بوده و گره ۱ نیز همانطور که اشاره شد با توجه به اینکه مقدار نشت در کل شبکه ثابت فرض شده، فاقد هرگونه نوسان است و به ازای ترکیبات گوناگون دو نشت در شبکه دارای مقداری ثابت است. در حالت کلی برای شبکه مورد بررسی می‌توان گفت که هر چه یک گره در شبکه از مخزن دورتر باشد به ازای ترکیبات مختلف دو نشت دارای نوسانات بیشتری نسبت به گره‌های نزدیک به مخزن است. به‌عبارتی در ترکیبات مختلف دو نشت گره‌های نزدیک به مخزن معمولاً دارای مقادیر فشارهای نزدیک و یا برابر با هم می‌باشند اما در گره‌های دور از مخزن در ترکیبات مختلف دو نشت مقادیر فشار گره‌ی نیز بسیار متغیر بوده و مشابه هم نیستند. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که بهتر است اولین گره فشارسنجی از گره‌های دور از مخزن انتخاب شود زیرا به ازای هر ترکیب متفاوت دو نشتی، مقدار فشار نیز متفاوت است.

۵-۲- نحوه انتخاب موقعیت سایر فشارسنج‌ها

سایر فشارسنج‌ها در هر مرحله باید در گره‌هایی قرار بگیرند که

پس از آموزش شبکه این بار ورودی به سیستم مقدار فشار گره‌ی در یک یا چند گره از شبکه بوده و خروجی مقدار و موقعیت نشت‌های موجود در شبکه است (شکل ۵). در این حالت می‌توان با اندازه‌گیری فشار گره‌ی بر روی شبکه واقعی و با استفاده از شبکه عصبی موقعیت و مقدار نشت‌های شبکه را تعیین نمود. در مرحله اول تنها یک ورودی فشار گره‌ی به شبکه معرفی می‌شود. پس از تحلیل نتایج و شناسایی گره‌های احتمالی نشت‌دار، در مرحله بعد با افزایش یکی دیگر به تعداد فشارسنجی‌ها و انجام تحلیل‌ها در هر مرحله به‌صورت مجزا، جواب‌های بهتری حاصل خواهد شد. افزایش فشارسنجی‌ها تا زمانی ادامه می‌کند که جواب‌های شبکه عصبی همگرا شده به‌طوری که با افزایش فشارسنجی تغییری در جواب‌ها حاصل نشود.

۵- بهترین آرایش قرار دادن فشارسنج‌ها

پس از آموزش شبکه عصبی، باید فشار یک یا چند گره از شبکه به‌عنوان ورودی به سیستم داده شود تا بتوان موقعیت و مقدار نشت‌ها را به‌دست آورد. تعیین موقعیت فشارسنجی‌ها در شبکه از اهمیت بالایی برخوردار است به‌طوری که انتخاب نامناسب یک گره برای فشارسنجی سبب می‌شود که نتوان به جواب‌های مناسبی دست یافت و در صورتی که فشارسنجی‌ها به درستی انتخاب شوند، می‌توان انتظار داشت با کمترین تعداد فشارسنج به بهترین جواب‌ها دست یافت. به‌عبارت دیگر آنچه که پس از آموزش سبب می‌شود که در روش شبکه‌های عصبی با کمترین تعداد فشارسنج به جواب‌های مطلوبی دست یافت، انتخاب صحیح نقاط فشارسنجی است. در صورت عدم دقت در نقاط فشارسنجی با تعداد بیشتر فشارسنجی می‌توان به جواب‌های مطلوب دست یافت.

۵-۱- نحوه انتخاب موقعیت اولین فشارسنج

همانطور که اشاره شد در این روش مقدار کل نشت در شبکه، معلوم

اثبات این موضوع در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این شکل با فرض وجود نشت در گره‌های ۱ و ۲ شبکه با قرار دادن ۴ فشارسنج در گره‌های مختلف مقدار نشت با استفاده از شبکه‌های عصبی محاسبه شده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که هر چه متوسط فاصله فشارسنجی‌ها از محل نشت کمتر باشد، درصد خطای تعیین مقدار نشت نیز کمتر خواهد بود.

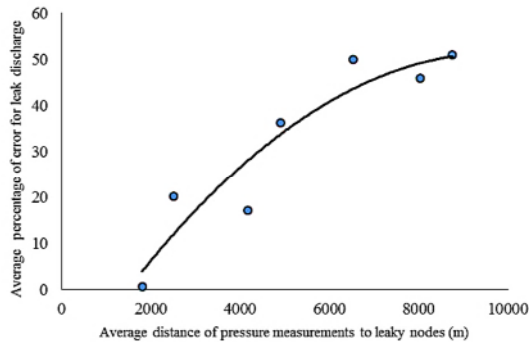


Fig. 7. Relation between average distance of pressure measurement points to leaky nodes and average percentage of error to leak discharge

شکل ۷- رابطه بین متوسط فاصله فشارسنجی‌ها تا محل نشت و درصد خطای تعیین مقدار نشت

۶- بررسی کارایی روش

در این روش شناسایی نشت حتی تا دبی‌های اندک ۱ لیتر بر ثانیه توسط فشارسنجی میدانی قابل شناسایی است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده در صورتی که مقادیر این نشت در گره‌های نزدیک به گره متصل به مخزن اعمال شود، اختلاف فشارها کوچک بوده ولی مقدار این اختلاف‌ها بین ۰/۱ تا ۰/۱۳ متر ستون آب تغییر می‌کند. در حالی که زمانی که نشت به گره‌های دور از مخزن مثلاً گره شماره ۳۰ اعمال شود، اختلاف فشارهای ایجاد شده در سایر گره‌ها افزایش یافته و بین ۰/۱ تا ۰/۲۶ متر ستون آب تغییر می‌کند. دستگاه‌های امروزه معمولاً دارای دقت ۰/۰۱ فشار اتمسفر یا ۰/۱ متر ستون آب است.

فرض می‌شود که در شبکه واقعی گره‌های ۱ و ۲ هر کدام دارای نشت ۲۵ لیتر بر ثانیه باشند و هدف، تعیین موقعیت و مقادیر نشت این گره‌ها است. با توجه به توضیحات داده شده درباره انتخاب گره‌های فشارسنجی، اولین گره فشارسنجی یک گره دور از مخزن انتخاب می‌شود. در این مقاله ۲۰ درصد گره‌های شبکه بر اساس نتایج حاصل از تحلیل اولین فشارسنجی بر اساس مقدار نشت به

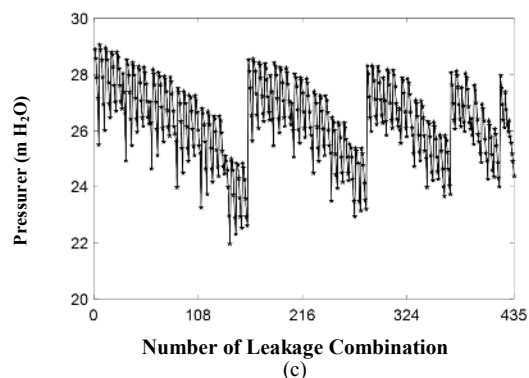
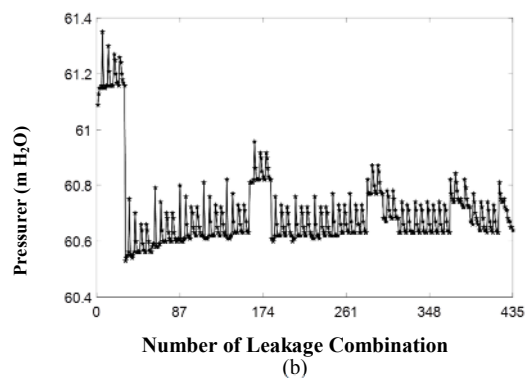
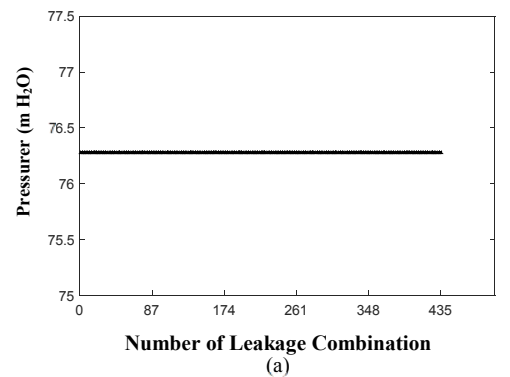


Fig. 6. Pressure fluctuations in a node per different leakage combinations, a) Pressure in node1, b) Pressure in node 2 & c) Pressure in node 6

شکل ۶- نوسانات فشار در یک گره خاص به ازای ترکیبات مختلف نشت در شبکه، (a) فشار در گره ۱، (b) فشار در گره ۲ و (c) فشار در گره ۶

دارای احتمال نشت هستند. در صورتی که گره‌های فشارسنجی از بین گره‌های احتمالی نشت‌دار انتخاب نشوند، با افزایش فشارسنجی تغییر محسوسی در جواب‌ها ایجاد نمی‌شود و معمولاً نمی‌توان موقعیت و مقدار گره‌های نشت‌دار را با دقت بالا تعیین نمود. همچنین در صورتی که گره انتخاب شده از محاسبات حذف شود، آن گره نشت‌دار نبوده و در غیر این صورت آن گره نشت‌دار و یا در مجاورت گره نشت‌دار است.

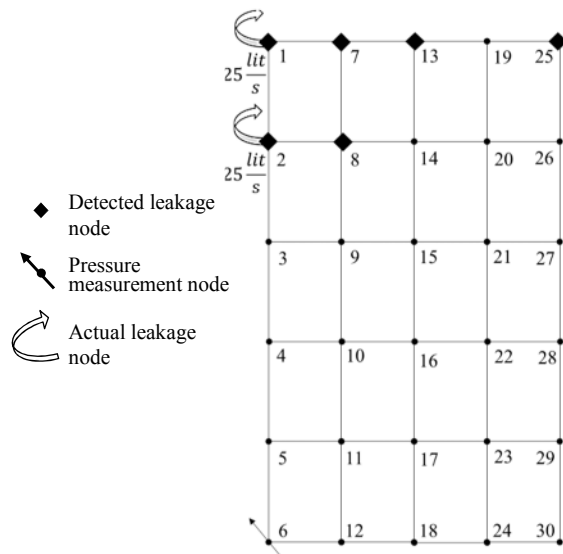


Fig. 8. Leakage possible nodes per pressure measurement in node 6

شکل ۸- گره‌های احتمالی نشت به ازای فشارسنجی در گره ۶

۳۰ گره از محاسبات حذف شد. لازم به ذکر است که در ادامه و با افزایش فشارسنج‌ها تنها ۶ گره مظنون به نشت مورد بررسی قرار می‌گیرند. این امر سبب تسریع دسترسی به جواب‌های صحیح می‌شود. البته در صورتی که با افزایش فشارسنج‌ها، گره‌های دیگر مقدار نشت زیادی را نشان دهند، این گره‌ها در ادامه محاسبات، جایگزین گره‌های حذف شده می‌شوند تا از عدم رخداد نشت در آنها اطمینان حاصل شود. دومین فشارسنجی باید از بین گره‌های احتمالی نشت‌دار انتخاب شود. گره ۷ انتخاب شد. در نتیجه در این مرحله تعداد ورودی‌ها به شبکه عصبی برابر ۲ است. این دو داده ورودی مقادیر فشار گره‌های ۶ و ۷ است. نتایج حاصل از دو فشارسنجی در گره‌های ۶ و ۷ در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با انتخاب گره ۷ به‌عنوان دومین فشارسنج، این گره از گره‌های دارای احتمال نشت حذف می‌شود. بنابراین این گره نشت‌دار نبوده است.

جدول ۲- نتایج حاصل از فشارسنجی در گره‌های ۶ و ۷

Table 2. Results of pressure measurement in nodes 6 & 7

Number of node	Q_P (l/s)
1	26.2
2	8.6
7	-0.4
8	5.2
13	3.8
25	2

عنوان گره‌های احتمالی نشت‌دار در نظر گرفته می‌شوند. به بیان دیگر شبکه دارای ۳۰ گره است و ۲۰ درصد آن برابر ۶ است. بنابراین پس از انجام اولین فشارسنجی ۶ گره‌ی که مقدار نشت بیشتر را دارند، به عنوان گره‌های احتمالی نشت‌دار شناخته می‌شوند. اولین گره فشارسنجی گره ۶ انتخاب شد. مقدار فشار در این گره برابر ۲۸/۹ متر ستون آب به ازای دو نشت ۲۵ لیتر در گره‌های ۱ و ۲ بود. در این حالت تعداد ورودی‌ها به شبکه عصبی مصنوعی برابر یک است که نتایج حاصل از تحلیل در جدول ۱ نمایش داده شده است. با توجه به آنکه در بخش آموزش به ازای ۹۷۵ ترکیب مختلف نشت مقادیر فشار گره ۶ محاسبه شده بود، در این حالت شبکه رابطه بین تنها ورودی به شبکه عصبی که همان فشار گره ۶ است و موقعیت و مقادیر نشت را آموزش دیده و قادر است با فشارسنجی در این گره به صورت معکوس عمل کرده و مقادیر موقعیت و مقدار نشت را تعیین کند. مقادیر نشت به دست آمده در این مرحله به صورت تقریبی است به عبارتی در صورتی که مقدار نشت منفی باشد یا اندکی از صفر بیشتر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که نشت آن گره صفر بوده است. مطابق جدول ۱ گره‌های ۱، ۲، ۷، ۸، ۱۳ و ۲۵ دارای بیشترین مقدار نشت می‌باشند. موقعیت گره‌های احتمالی نشت‌دار در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با انجام تنها یک فشارسنجی موقعیت تقریبی گره‌های نشت‌دار تعیین شده است. به‌منظور دستیابی به جواب‌های مطلوب‌تر لازم است تعداد فشارسنج‌ها افزوده شود. بنابراین با اولین فشارسنجی، ۲۴ گره از

جدول ۱- نتایج حاصل از فشارسنجی در گره ۶

Table 1. Results of pressure measurement in node 6

Number of node	Q_P (l/s)	Number of node	Q_P (l/s)
1	21.93	16	0.00
2	3.47	17	0.01
3	0.51	18	-0.01
4	-0.04	19	1.17
5	-0.01	20	1.14
6	0.00	21	-0.21
7	11.78	22	0.00
8	2.61	23	0.01
9	0.22	24	-0.01
10	-0.04	25	1.47
11	0.01	26	0.30
12	-0.01	27	-0.11
13	4.68	28	0.01
14	1.00	29	0.00
15	0.18	30	0.00

که در رابطه بالا Q_R مقدار نشت واقعی گرهی و Q_P مقدار نشت پیش‌بینی شده به وسیله شبکه عصبی است. نتایج حاصل از این مثال در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده شد، این روش قادر است موقعیت دقیق و مقدار نشت را با تقریب خوبی تخمین بزند. این امر به دلیل انتخاب مناسب فشارسنج‌ها است.

در حالتی دیگر فرض می‌شود که نشت گره ۱۲ برابر ۴ و گره ۲۵ برابر ۴۶ لیتر بر ثانیه باشند. مشابه قبل اولین گره فشارسنجی گره ۶ انتخاب شد. نتایج حاصل از تحلیل در جدول ۵ نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود ۶ گره نشت‌دار به ترتیب اولویت گره‌های ۲۶، ۲۰، ۱۵، ۲۰، ۹، ۲۵ و ۲۱ می‌باشند. دومین گره فشارسنجی از بین گره‌های احتمالی نشت‌دار و گره ۲۶ انتخاب می‌شود که نتایج آن در جدول ۶ نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۶ می‌توان گفت که گره ۲۶ نشت‌دار نبوده است زیرا با فشارسنجی این گره، مقدار نشت آن تقریباً برابر صفر شد. همچنین گره‌های ۹ و ۱۵ را نیز می‌توان از محاسبات حذف نمود به دلیل آنکه نشت این گره‌ها نیز تقریباً برابر صفر بود. بنابراین تنها سه گره ۲۵، ۲۰ و ۲۱ باقی ماندند.

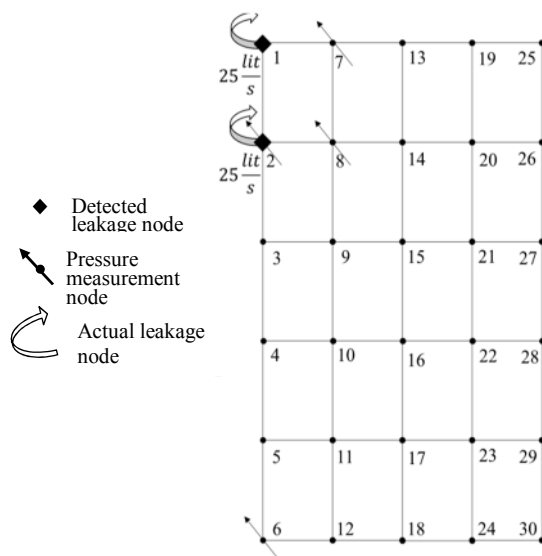


Fig. 9. Assign network leak nodes by using neural networks for leakage in nodes 1 & 2

شکل ۹- تعیین گره‌های نشت‌دار در شبکه با استفاده از شبکه‌های عصبی

برای نشت در گره‌های ۱ و ۲

با توجه به نتایج حاصل از دو فشارسنجی، گره‌های ۱ و ۲ و ۸ در بین ۳۰ گره بیشترین احتمال نشت را دارند. گره‌های ۱۳ و ۲۵ نیز در این مرحله دارای احتمال نشت می‌باشند. سومین فشارسنجی از بین گره‌های احتمالی نشت‌دار است. گره ۸ انتخاب شد.

جدول ۳- نتایج حاصل از فشارسنجی در گره‌های ۶، ۷ و ۸

Table 3. Results of pressure measurement in nodes 6, 7 & 8

Number of node	Q_P (l/s)
1	26.6
2	3.8
8	14.9
13	-2.5
25	-2.2

نتایج حاصل از سه فشارسنجی گره‌های ۶ و ۷ و ۸ در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه گره ۸ از محاسبات حذف نمی‌شود، این گره نشت‌دار و یا در مجاورت گره‌های نشت‌دار است. همچنین مشاهده می‌شود که گره‌های ۱۳ و ۲۵ نیز نشت‌دار نبوده‌اند. در نهایت با انتخاب گره ۲ به عنوان چهارمین فشارسنجی، نشت‌دار بودن این گره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از ۴ فشارسنجی در جدول ۴ نمایش داده شده است.

جدول ۴- نتایج حاصل از فشارسنجی در گره‌های ۲، ۶، ۷ و ۸

Table 4. Results of pressure measurement in nodes 2, 6, 7 & 8

Number of node	Q_P (l/s)	Q_R (l/s)	Error (%)
1	24.9	25	0.4
2	20	25	20

با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌شود که با انتخاب گره ۲ به عنوان چهارمین فشارسنجی، مقدار نشت در این گره ۲۰ لیتر بر ثانیه به دست می‌آید. همچنین با توجه به اینکه مقدار نشت در گره ۸ تقریباً برابر صفر است، می‌توان گفت که این گره نشت‌دار نبوده و تنها در مجاورت دو گره نشت‌دار است. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته تنها دو گره ۱ و ۲ در تمام مراحل فشارسنجی‌ها وجود نشت را نشان داده‌اند و سایر گره‌ها با افزایش تعداد فشارسنجی مقدار نشت را در حدود صفر و یا منفی نشان دادند که نشان‌دهنده آن بود که در آن گره‌ها هیچ گونه نشتی رخ نمی‌دهد. همچنین درصد خطا بر اساس رابطه ۱ تعیین شد

$$\text{Error}(\%) = \frac{(Q_R - Q_P)}{Q_R} \times 100 \quad (1)$$

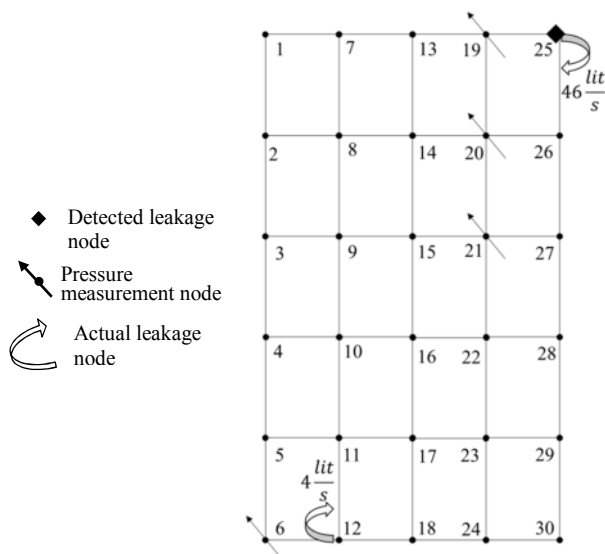


Fig. 10. Assigning network leak nodes by using neural networks for leakage in nodes 12 & 25

شکل ۱۰- تعیین گره‌های نشت‌دار در شبکه با استفاده از شبکه‌های عصبی برای نشت در گره‌های ۱۲ و ۲۵

لازم است که از نشت‌دار نبودن این گره اطمینان حاصل نمود. بنابراین یک فشارسنج دیگر در گره ۱۹ قرار داده می‌شود. با انجام پنجمین فشارسنجی نشت گره ۱۹ برابر $1/56$ - و نشت گره ۲۵ برابر $45/65$ لیتر بر ثانیه به دست می‌آید. بنابراین گره نشت‌دار، گره ۲۵ بوده و مقدار نشت آن نیز مشاهده می‌شود که توسط شبکه‌های عصبی به درستی تخمین زده است. البته این روش قادر به شناسایی گره‌ی که مقدار نشت آن بسیار کمتر است نبود. به‌طور کلی این روش به خوبی می‌تواند گره‌ی که مقدار نشت ماکزیمم را دارد شناسایی کند. نتایج حاصل از این مثال در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

در مثال بعدی فرض می‌شود که دو نشت همزمان ۲۵ لیتر بر ثانیه در دو گره ۳ و ۱۳ رخ دهد. مطابق قبل اولین فشارسنجی در گره شماره ۶ قرار داده می‌شود. گره‌ی که دارای بالاترین مقدار نشت هستند در جدول ۸ نمایش داده شده است.

جدول ۸- نتایج حاصل از یک فشارسنجی در گره ۶

Table 8. Results of pressure measurement in node 6

Number of node	Q_p (l/s)
3	3.23
13	3.02
14	5.36
19	7.31
20	8.54
25	10

جدول ۵- نتایج حاصل از فشارسنجی در گره ۶

Table 5. Results of pressure measurement in node 6

Number of node	Q_p (l/s)	Number of node	Q_p (l/s)
1	0.9	16	0.24
2	1.36	17	0.14
3	2.1	18	0.16
4	1.89	19	2.74
5	0.19	20	4.59
6	0.24	21	3
7	1.2	22	0.03
8	1.52	23	0.06
9	4.28	24	0.06
10	1.27	25	3.56
11	0.19	26	8.77
12	0.2	27	1.76
13	1.71	28	-0.04
14	2.03	29	-0.01
15	5.57	30	-0.01

جدول ۶- نتایج حاصل از فشارسنجی در گره‌های ۶ و ۲۶

Table 6. Results of pressure measurement in nodes 6 & 26

Number of node	Q_p (l/s)
25	13.6
26	0.68
20	12.34
9	0.29
15	-0.4
21	2.59

سومین فشارسنج، گره ۲۰ انتخاب شد. نتایج حاصل از این فشارسنج در جدول ۷ نمایش داده شده است.

جدول ۷- نتایج حاصل از فشارسنجی در گره‌های ۶، ۲۶ و ۲۰

Table 7. Results of pressure measurement in nodes 6, 20 & 26

Number of node	Q_p (l/s)
25	31.74
20	-0.54
21	6.42

بنابراین با انجام سه فشارسنجی تنها دو گره ۲۵ و ۲۱ باقی ماند. در صورتی که فشارسنج چهارم را در گره ۲۱ قرار داده شود مقدار نشت این گره $0/6$ و مقدار نشت گره ۲۵ برابر ۳۰ لیتر بر ثانیه به دست می‌آید. بنابراین گره ۲۱ نیز نشت‌دار نبوده است. در این مثال با افزایش تعداد فشارسنج‌ها مقدار نشت همه گره‌ها به مقدار نزدیک به صفر رسید اما گره ۱۹ که در اولین فشارسنجی در اولویت هفتم بود مقدار نشت آن یک سیر صعودی داشته و در چهارمین فشارسنجی مقدار نشت $16/46$ لیتر بر ثانیه را نشان داد. بنابراین

نیز شبکه‌های عصبی قادر به شناسایی گره‌های نشت‌دار است. فرض می‌شود که چهار گره ۵، ۶، ۱۱ و ۱۲ هر کدام ۱۲/۵ لیتر بر ثانیه دارای نشت باشند. مشابه قبل بر اساس اصول ذکر شده برای انتخاب فشارسنجی اولین گره فشارسنجی، گره ۶ انتخاب شد. در این حالت ۶ اولویت اول گره‌های احتمالی نشت در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۱۰- نتایج حاصل از یک فشارسنجی در گره ۶

Table 10. Results of pressure measurement in node 6

Number of node	Q _P (l/s)
12	20.7
18	8.96
6	3.95
24	2.13
5	2.03
17	1.68

همانطور که مشاهده می‌شود با اولین فشارسنجی سه گره نشت‌دار واقعی در شش اولویت اول قرار گرفتند. با توجه به اینکه گره ۶ در جواب‌های حاصل از اولین فشارسنجی می‌باشد پس گره فوق نشت‌دار بوده و یا در مجاورت گره نشت‌دار است زیرا فشارسنجی در این گره انجام شده ولی این گره از محاسبات حذف نشده است. فشارسنجی دوم گره ۱۸ انتخاب شد. نتایج حاصله در جدول ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۱۱- نتایج حاصل از فشارسنجی در گره‌های ۶ و ۱۸

Table 11. Results of pressure measurement in nodes 6 & 18

Number of node	Q _P (l/s)
12	7.92
18	-1.57
6	22.23
24	3.16
5	4.56
17	3.5

بنابراین با توجه به جدول ۱۱ گره ۱۸ نشت‌دار نبوده است. سومین گره فشارسنجی گره ۵ انتخاب شد. نتایج حاصل از این فشارسنجی در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۱۲- نتایج حاصل از فشارسنجی در گره‌های ۵، ۶ و ۱۸

Table 12. Results of pressure measurement in nodes 5, 6 & 18

Number of node	Q _P (l/s)
12	4.36
6	19.35
24	0.83
5	8.08
17	-4.85

نتایج حاصل از اولین فشارسنجی موقعیت تقریبی گره‌های نشت‌دار را مشخص نموده است. مطابق جدول ۸ گره ۲۵ دارای بالاترین مقدار نشت بوده و این گره به‌عنوان دومین فشارسنجی انتخاب می‌شود. نتایج حاصله در جدول ۹ نشان داده شده است.

جدول ۹- نتایج حاصل از فشارسنجی در گره‌های ۶ و ۲۵

Table 9. Results of pressure measurement in nodes 6 & 25

Number of node	Q _P (l/s)
3	2.33
13	11.38
14	17.56

مطابق جدول ۹ با انجام دومین فشارسنجی گره‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۵ که از محل نشت نیز دور بوده‌اند نیز از محاسبات حذف می‌شوند. همانطور که مشاهده می‌شود با انجام تنها دو فشارسنجی هر دو گره نشت‌دار به خوبی شناسایی شده‌اند. به‌منظور افزایش دقت جواب‌ها و تعیین مقدار کمیت نشت سومین فشارسنجی گره ۱۴ انتخاب شد. در این حالت با انجام سه فشارسنجی نشت گره ۱۴ نیز برابر صفر شد و مقادیر نشت در گره‌های ۳ و ۱۳ به ترتیب برابر ۵/۴ و ۲۲/۵۵ لیتر بر ثانیه شد. در بین دو گره باقیمانده چهارمین فشارسنجی، گره ۱۳ انتخاب شد. در این حالت مقدار نشت گره‌های ۳ و ۱۳ به ترتیب برابر ۴/۴ و ۱۸/۷ لیتر بر ثانیه بود. در نهایت به‌منظور دستیابی به مقدار دقیق‌تر در کمیت نشت در صورت انتخاب گره ۳ به‌عنوان پنجمین گره فشارسنجی نشت گره ۳ برابر ۲۱/۸۴ و نشت ۱۳ برابر ۳۰/۶ لیتر بر ثانیه پیش‌بینی می‌شود. با توجه به همگرا شدن جواب‌ها به دو گره ۳ و ۱۳ نیازی به افزایش تعداد فشارسنجی‌ها نیست و می‌توان گفت که این دو گره قطعاً نشت‌دار می‌باشند. در این مثال همانطور که مشاهده می‌شود با انجام پنج فشارسنجی علاوه بر تعیین موقعیت دقیق گره‌های نشت‌دار، مقدار کمیت نشت در حالتی که فاصله بین دو گره نشت‌دار زیاد باشد، باز هم با دقت خوبی پیش‌بینی شد.

۷- بررسی کارایی روش برای هر تعداد نشت

همانطور که اشاره شد، شبکه تنها برای وجود دو نشت همزمان در شبکه آموزش دید و کارآیی روش نیز تنها برای حالت وجود دو نشت همزمان در شبکه مورد بررسی قرار گرفت. اما تعداد نشت‌های رخ داده در شبکه هر تعدادی می‌تواند باشد. در این حالت

است که موقعیت دقیق و مقدار نشت را با تقریب خوبی تخمین بزند. نتایج حاصل از این مثال در شکل ۱۱ نشان داده شده است. به عبارتی دیگر این روش حساسیتی نسبت به تعداد نشت‌های رخ داده در شبکه ندارد و به ازای هر تعداد نشت قابلیت شناسایی موقعیت و مقدار آنها توسط این روش وجود خواهد داشت. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در روش فوق علاوه بر تعیین موقعیت نشت، در اکثر مواقع مقدار نشت با دقت قابل قبولی نیز قابل شناسایی بوده و میزان خطا کمتر از ۳۰ درصد است و با توجه به نتایج حاصله در تحلیل‌های مختلف می‌توان گفت که متوسط خطا در برآورد میزان کمیت نشت کمتر از ۱۵ درصد است.

۸- نتیجه‌گیری

با وجود اینکه نشت در شبکه‌های توزیع آب باعث هدر رفت منابع ارزشمند آب شیرین می‌شود، اما خطر بزرگ‌تر ورود مواد آلاینده به شبکه است. روش‌های رایج نشت‌یابی که بر پایش شبکه، منطقه به منطقه نشت را جستجو می‌کنند بسیار هزینه‌بر و وقت‌گیر می‌باشند، لذا اخیراً روش‌هایی که با مدل‌سازی شبکه به صورت فراگیر موقعیت نقاط با پتانسیل نشت را شناسایی می‌کند، مورد توجه قرار گرفته‌اند. شناسایی نشت در شبکه‌های توزیع آب نقش قابل توجهی در کاهش آب به حساب نیامده دارند. در این مقاله یک ایده جدید به منظور تعیین موقعیت و مقدار نشت‌های موجود در شبکه با استفاده از شبکه‌های عصبی ارائه شد. نتایج حاصل از این روش نشت‌یابی نشان‌دهنده قابلیت شناسایی موقعیت و مقدار نشت‌های موجود در شبکه است. نحوه انتخاب اولین فشارسنج نیز همانطور که اشاره شد باید در گرهی قرار گیرد که بالاترین نوسانات فشار را داشته باشد و به ازای ترکیبات مختلف نشت کمترین مقادیر فشار یکسان را داشته باشند. سایر فشارسنج‌ها نیز بنا به موقعیت گره‌های احتمالی و از بین آنها باید انتخاب شود. مقدار کل نشت در شبکه نیز تنها با فشارسنجی در گره متصل به مخزن قابل شناسایی است.

در این پژوهش در داده‌های آموزشی تولید شده به منظور آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی کمترین مقدار نشت فرضی گرهی برابر ۱۰ درصد مقدار مصرف گرهی بود. پس از تحلیل‌های انجام شده نتایج نشان می‌دهد با توجه به نحوه آموزش شبکه عصبی این روش تنها مقادیر نشت بیشتر از ۱۰ درصد مصرف گرهی را شناسایی

با توجه به جدول ۱۲ می‌توان گفت که گره ۵ نشت‌دار بوده و یا در مجاورت گره نشت‌دار است. همچنین می‌توان گفت که گره‌های ۲۴ و ۱۷ نشت‌دار نیستند زیرا نشت آنها نزدیک به صفر و یا منفی شده است. بنابراین تنها سه گره ۱۲، ۶ و ۵ باقی مانده است. سپس گره ۱۲ به عنوان فشارسنجی چهارم انتخاب شد که این گره از محاسبات حذف نمی‌شود. این گره مقدار نشت ۶/۰۴ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. با افزایش فشارسنجی‌ها گره ۱۱ مقدار نشت آن بر خلاف سایر گره‌ها یک مقدار افزایشی داشت؛ به طوری که در فشارسنجی اول تا چهارم مقدار نشت این گره به ترتیب برابر ۱/۳۶، ۴/۷۵، ۱۲/۰۲ و ۱۵/۷۶ لیتر بر ثانیه بود، بنابراین از نشت‌دار نبودن این گره باید اطمینان حاصل نمود. فشارسنجی پنجم گره ۱۱ انتخاب شد. این گره از محاسبات حذف نمی‌شود و مقدار نشت ۹/۱۷ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. نتایج حاصله از ۵ فشارسنجی در جدول ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با وجود آنکه شبکه تنها برای دو نشت آموزش دیده است، قادر

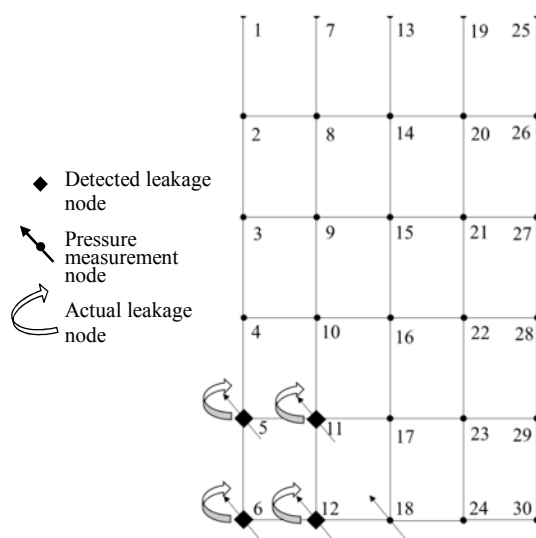


Fig. 11. Assigning network leak nodes by using neural networks for leakage in nodes 5, 6, 11 & 12

شکل ۱۱- تعیین گره‌های نشت‌دار در شبکه با استفاده از شبکه‌های عصبی برای نشت در گره‌های ۵، ۶، ۱۱ و ۱۲

جدول ۱۳- نتایج فشارسنجی در گره‌های ۵، ۶، ۱۱، ۱۲ و ۱۸
Table 13. Results of pressure measurement in nodes 5, 6, 11, 12 & 18

Number of node	Q _P (l/s)	Q _R (l/s)	Error (%)
5	9.39	12.5	24.88
6	12.75	12.5	2
11	9.17	12.5	26.64
12	8.75	12.5	30

آموزشی از میزان خطا کاست. یکی دیگر از مزایای این روش آن است که در اکثر مواقع با انجام تنها یک فشارسنجی می‌توان به موقعیت تقریبی گره‌های نشت‌دار پی برد و به‌منظور تعیین موقعیت دقیق‌تر گره‌های نشت‌دار و مقدار نشت باید تعداد فشارسنج‌ها را افزایش داد.

می‌کند و قادر به شناسایی مقادیر کمتر از آن نیست. به‌منظور برطرف کردن این ضعف می‌توان با تولید داده‌های آموزشی جدید که مقادیر کمتر از ۱۰ درصد مصرف گرهی را شامل شوند، نشت‌های کمتر از این مقدار را نیز شناسایی نمود. همچنین برای دستیابی به جواب‌های دقیق‌تر می‌توان با افزایش تعداد داده‌های

References

- Araujo, L.S., Ramos, H. & Coelho, S.T., 2006, "Pressure control for leakage minimization in water distribution systems management", *Journal of Water Resources Management*, 20, 133-149.
- Soltani Asl, M. S. & Maghrebi, M. F., 2008, "Intelligent pressure management to reduce leakage in urban water supply networks, a case study of Sarafrazan District, Mashhad", *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 20 No.3 (71), 99-104. (In Persian)
- Campisano, A., Creaco, E. & Modica, C., 2010, "RTC of valves for leakage reduction in water supply network", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136, (1) 138-141.
- Covas, D., & Ramos, H., 2010, "Case studies of leak detection and location in water pipe systems by inverse transient analysis", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2) 248-257.
- Hunaidi, O., Chu, W., Wang, A., & Guan, W., 1998, "Effectiveness of leak detection methods for plastic water distribution pipes", *Workshop on Advancing the State of our Distribution Systems*, Denver: The Practical Benefits of Research.
- Jing, K., & Zhi-Hong Z., 2012, "Time prediction model for pipeline leakage based on grey relational analysis", *Journal of Physics Procedia* 25, 2019-2024.
- Karamouz, M., Tabesh, M., Nazif, S., & Moridi, A., 2005, "Estimation of hydraulic pressure in water networks using artificial neural networks and fuzzy logic", *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 1 No.16 (53), 3-14. (In Persian)
- Li, W., Ling, W., Liu, S., Zhao, J., Liu, R., Chen, Q., Qiang, Z. & Qu., J., 2011, "Development of system for detection, early warning, and control of pipeline leakage in drinking water distribution: A case study", *Journal of Environmental Science*, 23(11) 1816-1822.
- Maghrebi, M. F. & Attari, M., 2013, "A new method in leak detection of a water supply networks using minimal number of nodal pressure measurements for the case of two nodal leaks", *7th National Congress on Civil Engineering, Zahedan, Sistan and Baluchestan, Iran*. (In Persian)
- Marunga, A., Hoko, Z., & Kaseke, E., 2006, "Pressure management as a leakage reduction and water demand management tool: The case of the City of Mutare, Zimbabwe", *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 31, 763-770.
- National Water & Wastewater Company, 2010, *Statistics and information of rural water and wastewater company*, Tehran, Iran. (In Persian)
- Nicolini, M., Giacomello, C., & Ded, K., 2011, "Calibration and optimal leakage management for a real water distribution network", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137 (1) 134-142.

- Perez, R., Puig, V., Pascual, J., Quevedo, J., Landeros, E. & Peralta, A., 2011, "Methodology for leakage isolation using pressure sensitivity analysis in water distribution networks", *Journal of Control Engineering Practice* 19, 1157-1167.
- Poulakis, Z., Valougeorgis, D. & Papadimitriou, C., 2003, "Leakage detection in water pipe networks using a bayesian probabilistic framework", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 18, 315-327.
- Prodon, A., DeNegre, S. & Liebling, T.M., 2010, "Location leak detection sensors in a water distribution network by solving prize-collecting steiner arborescence problems", *Journal of Math. Program. Ser B*, 124, 119-141.
- Soltani, J. & Mohammdrezapour Tabari, M., 2012, "Determination of the effective parameters on the rate of failure in in the pipelines of the water supply networks by the use of a hybrid method on the ANN and GA", *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 23 No.3 (83) , 2-15. (In Persian)
- Tajrishi, M. & Abrishamchi, A., 2004, "Management of water resources demands in the country", *The First Congress on the Prevention of the Wasting the National Resources*, Tehran, Iran. (In Persian)