## روش نوین نشت یابی با استفاده از شبکههای عصبی مصنوعی

محمد عطاري ، محمود فغفور مغربي ً

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

(دریافت ۹٤/۹/۲۸ پذیرش ۹۵/۵/۱۷)

#### چکيده

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 مهم ترین روش های 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 می شود. نتایج نشان میدهد که این روش می تواند 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، فشا*ر*سنجی، شبکههای عصبی، شبکه توزیع آب

#### ۱ – مقدمه

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 نمی شود و بخش قابل توجهی از آن از طریق نشت یا آب به حساب نیامده به هدر می رود و هزینه سنگینی را به سازمانهای آب و فاضلاب تحمیل می کند. (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 فاضلاب کرور. 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

دوره ۲۹ شماره ا سال ۱۳۹۷

۲۰ درصد از کل در آمدهای 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 می شود بلکه منجر به آلودگی آبهای آشامیدنی و همچنین سبب آسیبهای جدی به انسان و ساختمانهای اطراف محل نشت می شود (Li et al. 2011; Campisano et al. 2010).

هم اکنون روش هایی چون ابزارهای صوتی، موازنه جرم، عکسبرداری هوایی بر مبنای پایش حرارتی، گازهای رسام توسط متصدیان صنعت آب برای شناسایی و کاهش نشت مورد استفاده از قرار میگیرند (Covas & Ramas 2010). علاوه بر این استفاده از روش های مدیریتی نظیر مدیریت هوشمند فشار، از جمله روش های موثر در کاهش نشت از شبکه های توزیع آب شهری می باشند (Soltani Asl & Moghrebi 2008). اگر چه روش های نشت یا بی محلی در برخی شرایط دارای دقت مناسبی هستند، ولی استفاده از آنها هزینه بر و زمان بر بوده و در برخی موارد دارای اثر بخشی لازم نیستند؛ به عنوان نمونه ابزارهای صوتی برای لوله های پلاستیکی

دارای خطای زیادی می باشند (Hunaidi et al. 1998). با کاهش هدر رفت آب می توان 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 مهم ترین عوامل مؤثر در ایجاد نشت در شبکه آبرسانی فشار است، به طوری که در دهههای اخیر می توان گفت در اکثر پژوهش های انجام شده به منظور نشت یابی 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 موقعیت نشت حتی در شرایط عدم قطعیت تقاضا تعیین شده است ایزه زمانی تقریباً سه ساله نشان داده شد که با کاهش ۳۵ در صدی فشار در شبکه مقدار نشت را می توان ۲۵ در صد 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 2.1 EPANET و با در نظر گرفتن نشت در گرهها نشان دادند که با مدیریت فشار می توان مقدار نشت را حدود ۳۶ درصد کاهش داد Maghrebi).

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 Zhi-Hong & Zhi). (2012

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

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

در این پژوهش، ایده ای 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 اندازه گیری تغییرات فشار ناشی از وجود نشتها در شبکه نسبت به حالت بدون نشت است. در روش مذکور با تولید داده های آموزشی و اعمال آن به شبکه های عصبی مصنوعی، شبکه قادر خواهد بود که با دریافت فشار، موقعیت و مقدار دقیق نشت گرهی را تعیین کند. نحوه تولید داده های آموزشی نیز با اعمال نشت فرضی در برخی گره های شبکه و برداشت فشار می توان به عدم حساسیت آن به تعداد نشت های موجود در شبکه، شناسایی دقیق موقعیت نشتها، تعیین کمیت نشت با دقت بالا و

# ۲ - شبکه مورد بررسی

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

به منظور انجام مدل سازی 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 لوله هایی افقی و عمودی به طول به ترتیب ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متر، متوسط زبری مطلق ۲۶/۰ میلی متر و ۲۰ حلقه، ۳۰ گره، ۵۰ لول و یک مخزن در نرم افزار PANET2.0 مدل شد و مشخصات شبکه به طور کامل به نرم افزار داده شد (شکل ۱).

## ۳- تعیین مقدار دقیق نشت در شبکه

با افزایش مقدار نشت، فشار بهصورت 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 بهصورت خطی مشاهده میشود که این موضوع در شکل ۲ – a

> <sup>۱۵</sup> آب و فاضل ب www.SID.ir



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 – ۵) فشار در گرهای مختلف در برابر مقدار نشت در گره ۲ و
(b) تغییرات فشار در گره ۱ در برابر مقدار کل نشت در شبکه

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

۴- نحوه آموزش شبکه عصبی

پس از انتخاب یک مدل مناسب که در این مقاله شبکه عصبی مصنوعی بوده است، اولین مرحله به منظور دست یابی به موقعیت و مقدار نشت، آموزش شبکه فوق است. در این مرحله با اعمال یک سری داده های ورودی به شبکه عصبی مصنوعی که خروجی آنها نیز مشخص است، شبکه به نحوی آموزش می بیند که ارتباط بین ورودی و خروجی ها را بیابد. سپس با اعمال نشت فرضی در برخی از گرهای شبکه و محاسبه فشار گرهی بر روی شبکه مدل سازی شده، از اطلاعات حاصل به عنوان ورودی های آموزش شبکه عصبی

|--|



Fig. 1. Layout of the test netwok (Poulakis et al. 2003) (۲۰۰۳ شکل۱- شبکه مورد مطالعه (پولاکیس و همکاران

نمایش داده شده است و در صورتی که تغییرات نشت در محدوده وسیع تری مورد بررسی قرار گیرد، رابطه نشت و فشار بهصورت 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) اندازه گیری شود.







**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

عصبي مصنوعي

مصنوعی استفاده می شود. در این مرحله شبکه عصبی مصنوعی رابطه بین موقعیت و مقدار نشت را با فشار گرهی آموزش می بیند. بنابراین به منظور آموزش شبکه عصبی مصنوعی داده های ورودی موقعیت و مقدار نشت و خروجی ها نیز مقادیر فشار گرهی است. لازم به ذکر است که در داده های 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.

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 بهدست آورد.

مقادیر فشار محاسبه شده خروجیهای سیستم برای آموزش است. با اعمال ماتریس نشان داده شده در شکل ۴ و ماتریس فشار بهدست 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 – d که حاصل از تحلیل نرمافزاری است، می توان مقدار دقیق نشت را محاسبه کرد.

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

> ۱۲ آب و فاضل ب www.SID.ir



Fig. 5. Input & output data after network training شکل۵- دادههای ورودی و خروجی پس از آموزش شبکه

فرض می شود. با این فرض، منحنی تغییرات فشار در یک گره خاص به ازای ترکیبات مختلف دو نشت را می توان ترسیم نمود. به عنوان مثال با فرض وجود نشت کل ۵۰ لیتر بر ثانیه در شبکه شکل ۱، شکل ۶ که منحنی تغییرات فشار در ۳گره شماره یک، دو و شش از شبکه برای ترکیبات مختلف دو نشت ۲۵ لیتر بر ثانیه است را می توان 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 به صورت زیر محاسبه می شود

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

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. به عبارتی در ترکیبات مختلف دو نشت گرههای نزدیک به مخزن معمولاً دارای مقادیر فشارهای نزدیک و یا برابر با هم میباشند اما در گرهی نیز بسیار متغیر بوده ترکیبات مختلف دو نشت مقادیر فشار گرهی نیز بسیار متغیر بوده نود که بهتر است ای دو نشت مقادیر فشار گرهی نیز بسیار منهیر بوده مشابه هم نیستند. با توجه به مطالب ذکر شده می توان 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 منهاوت 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 می توان با اندازه گیری 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 می شود. پس از تحلیل نتایج و شناسایی گرههای احتمالی نشتدار، در مرحله بعد با افزایش یکی دیگر به تعداد فشار سنجیها و انجام تحلیلها در هر افزایش فشار سنجیها تا زمانی ادامه پیدا می کند که جوابهای افزایش فشار سنجی ها تا زمانی ادامه پیدا می کند که جوابهای شبکه عصبی همگرا شده به طوری که با افزایش فشار سنجی تغییری در جوابها حاصل نشود.

## ۵– بهترین آرایش قرار دادن فشارسنجها

پس از آموزش شبکه عصبی، باید فشار یک یا چندگره از شبکه به عنوان ورودی به سیستم داده شود تا بتوان موقعیت و مقدار نشتها را به دست آورد. تعیین موقعیت فشار سنجی ها در شبکه از اهمیت بالایی بر خوردار است به طوری که انتخاب نامناسب یک گره برای فشار سنجی سبب می شود که نتوان به جواب های مناسبی دست یافت و در صورتی که فشار سنجی ها به در ستی انتخاب شوند، می توان انتظار داشت با کمترین تعداد فشار سنج به بهترین جواب ها دست یافت. به عبارت دیگر آنچه که پس از آموزش سبب می شود که در روش شبکه های عصبی با کمترین تعداد فشار سنج به جواب های مطلوبی دست یافت، انتخاب صحیح نقاط فشار سنجی است. در صورت عدم دقت در نقاط فشار سنجی با تعداد بیشتر فشار سنجی می توان به جواب های 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 شکل۷- 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 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 ۱/۰ تا ۱/۰ متر ستون آب تغییر گره شماره ۰۰ اعمال شود، اختلاف فشارهای ایجاد شده در سایر گره شماره ۰۰ این مقدار این اختلاف قشارهای در حالی که زمانی که نشت به گرههای دور از مخزن مثلاً گره شماره ۰۰ اعمال شود، اختلاف فشارهای ایجاد شده در سایر گره شماره ۰۰ اعمال شود، اختلاف فشارهای ایجاد شده در سایر میلاً مین ۱/۰ تا ۲۶/۰ متر ستون آب تغییر ای میکند. دستگاهای امروزه معمولاً دارای دقت ۱/۰ فشار اتمسفر میکند. دستگاهای امروزه معمولاً دارای دقت ۱/۰ متر ستون آب تغییر یا ۱/۰ متر ستون آب است.

فرض می شود 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 می شود. 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 نمی شود و معمولا نمی توان 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.

> ۱۹ آب <mark>و فاضل</mark>اب www.SID.ir



#### جدول ۱ – نتایج حاصل از فشارسنجی در گره ۶ Table 1. Results of pressure measurement in node 6

Number of node	$\mathbf{Q}_{\mathbf{P}}(\mathbf{l}/\mathbf{s})$	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





۳۰ گره از محاسبات حذف شد. لازم به ذکر است که در ادامه و با افزایش فشارسنج ها تنها ۶ گره مظنون به نشت مورد بررسی قرار می گیرند. این امر سبب تسریع دسترسی به جواب های صحیح می شود. البته در صورتی که با افزایش فشارسنج ها، گره های دیگر مقدار نشت زیادی را نشان دهند، این گره ها در ادامه محاسبات، جایگزین گره های حذف شده می شوند تا از عدم رخداد نشت در آنها اطمینان حاصل شود. دومین فشارسنجی باید از بین گره های اطمینان حاصل شود. دومین فشارسنجی باید از بین گره های مرحله تعداد ورودی ها به شبکه عصبی برابر ۲ است. این دو داده ورودی مقادیر فشار گره های ۶ و ۷ است. نتایج حاصل از دو فشارسنجی در گرهای ۶ و ۷ در جدول ۲ نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده میشود با انتخاب گره ۷ بـهعنـوان دومـین فشارسنج، این گره از گرههای دارای احتمال نشت حـذف مـیشـود. بنابراین این گره نشتدار نبوده است.

کو ۲ **جدول ۲** – نتایج حاصل از فشارسنجی در گردهای  $\mathcal{S}$  و ۲ **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

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.

۸ و ۸ **جدول ۳**- نتایج حاصل از فشارسنجی در گرەهای ۶. ۷ و 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 گردهای ۶ و ۷ و ۸ در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه گره ۸ از محاسبات حذف نمی شود، این گره نشت دار و یا در مجاورت گرههای نشت دار است. همچنین مشاهده می شود که گرههای ۱۳ و ۲۵ نیز نشت دار نبوده اند. در نهایت با انتخاب گره ۲ به عنوان چهار مین فشار سنجی، نشت دار بودن این گره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از ۴ فشار سنجی در جدول ۴ نمایش داده شده است.

۸ و ۸ مال از فشارسنجی در گر،های ۲، ۶، ۲ و ۸ **Table 4.** Results of pressure measurement in nodes 2, 6, 7 & 8

Number of node	$Q_{P}\left(l/s\right)$	$Q_{R}\left(l/s\right)$	Error(%)
1	24.9	25	0.4
2	20	25	20

با توجه به جدول ۴ مشاهده می شود که با انتخاب گره ۲ به عنوان چهارمین فشارسنجی، مقدار نشت در این گره ۲۰ لیتر بر ثانیه به دست می آید. همچنین با توجه به اینکه مقدار نشت در گره ۸ تقریباً برابر صفر است، می توان گفت که این گره نشت دار نبوده و تنها در مجاورت دو گره نشت دار است. با توجه به تحلیل های صورت گرفته تنها دو گره ۱ و ۲ در تمام مراحل فشار سنجی ها وجود نشت را نشان داده اند و سایر گره ها با افزایش تعداد فشار سنجی مقدار نشت را در حدود صفر و یا منفی نشان دادند که نشان دهنده آن بود که در آن گره ها هیچ گونه نشتی رخ نمی دهد. همچنین در صد خطا بر اساس رابطه ۱ تعیین شد

$$\operatorname{Error}(\%) = \frac{(Q_{R} - Q_{P})}{Q_{R}} \times 100 \tag{1}$$

که در رابطه بالا Q<sub>R</sub> مقدار نشت واقعی گرهی و Q<sub>P</sub> مقدار نشت پیش بینی 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 بهدلیل انتخاب مناسب فشارسنجها است.

در حالتی دیگر فرض می شود 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 می شود ۶گره نشت دار به تر تیب اولویت گرههای ۲۶، ۱۵، ۲۰، ۹، ۲۵ و ۲۱ می باشند. دومین گره فشار سنجی از بین گرههای احتمالی نشت دار و گره ۲۶ انتخاب می شود که نتایج آن در جدول ۶ نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۶ می توان گفت که گره ۲۶ نشت دار نبوده است زیرا با فشار سنجی این گره، مقدار نشت آن تقریباً برابر صفر شد. همچنین گرههای ۹ و ۱۵ را نیز می توان 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 **شکل۹** – تعیین گرههای نشتدار در شبکه با استفاده از شبکههای عصبی برای نشت در گرههای ۱ و ۲

۲۱ آب و فاضلاب www.SID.ir





لازم است که از نشت دار نبودن این گره اطمینان حاصل نمود. بنابراین یک فشارسنج دیگر در گره ۱۹ قرار داده می شود. با انجام پنجمین فشارسنجی نشت گره ۱۹ برابر ۱/۵۶ – و نشت گره ۲۵ برابر ۴۵/۶۵ لیتر بر ثانیه به دست می آید. بنابراین گره نشت دار، گره ۲۵ بوده و مقدار نشت آن نیز مشاهده می شود که توسط شبکههای عصبی به درستی تخمین زده است. البته این روش قادر به شناسایی گرهی که مقدار نشت آن بسیار کمتر است نبود. به طور کلی این روش به خوبی می تواند گرهی که مقدار نشت ماکزیم 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. ۶گرهی که دارای بالاترین مقدار نشت هستند در جدول ۸ نمایش داده شده است.

# $\mathcal{F}$ منتایج حاصل از یک فشارسنجی در گره 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

فشارسنجی در گره ۶	<b>جدول ۵</b> - نتایج حاصل از
-------------------	-------------------------------

روش نوین نشت یابی با.

 Table 5. Results of pressure measurement in node 6

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	

۲۶ و ۲۶ **جدول** ۶- نتایج حاصل از فشارسنجی در گردهای ۶ و ۲۶ **Table 6.** Results <u>of pressure measurement in nodes 6</u> &

		26
C	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.

۲۰ و ۲۰ و ۲۰ و ۲۰ و ۲۰ و ۲۰ و ۲۰ معلمان ۶. ۲۶ و ۲۰ Table 7. Results of pressure measurement in nodes 6, 20

<del>cc</del> 20		
Number of node	$Q_P(l/s)$	
25	31.74	
20	-0.54	
21	6.42	

بنابراین با انجام سه فشار سنجی تنها دو گره ۲۵ و ۲۱ باقی ماند. در صورتی که فشار سنج چهارم را در گره ۲۱ قرار داده شود مقدار نشت این گره ۶/۰ و مقدار نشت گره ۲۵ برابر ۳۰ لیتر بر ثانیه بهدست می آید. بنابراین گره ۲۱ نیز نشت دار نبوده است. در این مثال با افزایش تعداد فشار سنجها مقدار نشت همه گرهها به مقدار نزدیک به صفر رسید اما گره ۱۹ که در اولین فشار سنجی در اولویت هفتم بود مقدار نشت آن یک سیر صعودی داشته و در چهارمین فشار سنجی مقدار نشت آن یک سیر مغودی داشته و در چهارمین

```
دوره ۲۹ شماره ۱ سال ۱۳۹۷
```

نتایج حاصل از اولین فشارسنجی موقعیت تقریبی گر،های نشتدار را مشخص نموده است. مطابق جدول ۸گره 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

	20
Number of node	$Q_P(l/s)$
3	2.33
13	11.38
14	17.56

مطابق جدول ۹ با انجام دومین فشارسنجی گردهای ۱۹، ۲۰ و ۲۵ که از محل نشت نیز دور بودهاند نیز از محاسبات حذف می شوند. همانطور که مشاهده می شود با انجام تنها دو فشارسنجی هـر دو گـره نشتدار به خوبی شناسایی شدهاند. به منظور افزایش دقت جواب ها و تعيين مقدار كميت نشت سومين فشارسنجي گره ۱۴ انتخاب شـد. در این حالت با انجام سه فشارسنجی نشت گره ۱۴ نیز برابر صفر شد و مقادیر نشت در گرههای ۳ و ۱۳ به تر تیب 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 دقیق تر در کمیت نشت در صورت انتخاب گره ۳ بهعنوان پنجمین گره فشارسنجی نشت گره ۳ برابر ۲۱/۸۴ و نشت ۱۳ برابر ۶/ ۳۰ لیتر بر ثانیه پیش بینی می شود. با توجه به همگرا شدن جواب ها به دو گر ، ۳ و ۱۳ نیازی به افزایش تعداد فشارسنجيها نيست و مي توان گفت كه اين دو گره قطعا نشتدار میباشند. در این مثال همانطور که مشاهده میشود با انجام پنج فشارسنجی علاوہ بر تعیین موقعیت دقیے گرہ ہای نشتدار، مقدار کمیت نشت در حالتی که فاصله بین دو گره نشتدار زیاد باشد، باز هم با دقت خوبی پیش بینی 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 رخداده در شبکه هر تعدادی می تواند باشد. در این حالت

نیز شبکههای عصبی قادر به شناسایی گرههای نشتدار است. فرض می شود 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 فشار سنجی اولین گره فشار سنجی، 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 می شود با اولین فشارسنجی سه گره نشت دار واقعی در شش اولویت اول قرار گرفتند. با توجه به اینکه گره ۶ در جواب های حاصل از اولین فشارسنجی می باشد پس گره فوق نشت دار بوده و یا در مجاورت گره نشت دار 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.

 ۱۸ منایج حاصل از فشارسنجی در گردهای ۶ و ۲۸

 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 ایـن فشارسـنجی در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

۲. ۶ و ۱۸ می در گر،های ۵، ۶ و ۱۸ **جدول ۱۲** - نتایج حاصل از فشارسنجی در گر،های ۵، ۶ و ۲. **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

با توجه به جدول ۱۲ می توان گفت که گره ۵ نشت دار بوده و یا در مجاورت گره نشت دار است. همچنین می توان گفت که گره های ۲۴ و ۱۷ نشت دار نیستند زیرا نشت آنها نز دیک به صفر و یا منفی شده است. بنابراین تنها سه گره ۱۲، ۶ و ۵ باقی مانده است. سپس گره ۱۲ به عنوان فشار سنجی چهارم انتخاب شد که این گره از محاسبات حذف نمی شود. این گره مقدار نشت ۴ /۶ لیتر بر ثانیه را نشان می دهد. با افزایش فشار سنجی ها گره ۱۱ مقدار نشت آن بر خلاف سایر گره ها مقدار نشت این گره به تر تیب برابر ۶/۱۲، ۲/۱۶ و ۲/۱۷ مقدار نشت این گره به تر تیب برابر ۱/۳۶، ۲/۱۶ و ۲/۷۶ ایتر بر ثانیه بود، بنابراین از نشت دار نبودن این گره باید اطمینان حاصل نمود. فشار سنجی پنجم گره ۱۱ انتخاب شد. این گره اید اطمینان حاصل نمی شود و مقدار نشت ۱۷/۹ لیتر بر ثانیه را نشان می دهد. نتایج حاصله نمی شود و مقدار نشت ۲۱/۹ لیتر بر ثانیه را نشان می دهد. نتایج حاصله از ۵ فشار سنجی در جدول ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده



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 گر،های ۵، ۶، ۱۸، ۱۲ و ۱۱ Table 13. Results of pressure measurement in nodes 5, 6, 11, 12 & 18

Number of node	$Q_{P}\left(l/s\right)$	$Q_{R}\left(l/s\right)$	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

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. بهعبارتی 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 می دهد 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 می توان گفت که متوسط خطا در بر آورد 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 بزرگ تر ورود مواد آلاینده به شبکه است. روش های رایج نشت یابی که بر پایش شبکه، منطقه به منطقه نشت را جستجو ميكنند بسيار هزينهبر و وقتگير ميباشند، لذا اخیراً روش هایی 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 ایـده جدیـد بـهمنظـور تعیین موقعیت و مقدار نشت های موجود در شبکه با استفاده از شبکههای عصبی ارائه شد. نتایج حاصل از این روش نشتیابی نشاندهنده قابلیت شناسایی موقعیت و مقدار نشت. ای موجـود در شبکه است. نحوه انتخاب اولین فشارسنج نیز همانطور که اشاره شد بايد در گرهي قرار گيرد كه بالاترين نوسانات فشار را داشته باشـد 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 بهمنظور 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

۲۵ آب و فاضلاب www.SID.ir

آموزشی از میزان خطا کاست. یکی دیگر از مزایای این روش آن است که در اکثر مواقع با انجـام تنهـا يـک فشارسـنجي مـيتـوان بـه دقیق تر گرههای نشت دار و مقدار نشت باید تعداد فشار سنجها را افزایش داد.

میکند و قیادر به شناسایی مقیادیر کمتیر از آن نیست. بهمنظور برطرف کردن این ضعف می توان با تولید داد،های آموزشی جدید که مقادیر کمتر از ۱۰ درصد مصرف گرهمی را شامل شوند، 🦳 موقعیت تقریبی گرههای نشتدار پی برد و بهمنظور تعیین موقعیت نشتهای کمتر از این مقدار را نیـز شناسـایی نمـود. همچنـین بـرای دستیابی به جوابهای دقیق تر می توان 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.

دوره ۲۹ شماره ۱ سال ۱۳۹۷

- 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)

مجله آب و فاضلاب ۲۶