

Estimation of Hydraulic Pressure in Water Networks Using Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic

Mohammad Karamouz*, Massoud Tabesh**, Sara Nazif**, and Ali Moridi***

Abstract

Hydraulic pressure is one of the most significant parameters in optimizing water distribution networks. Its simulation and estimation are essential tools in water distribution network management due to the significant effects it has on certain parameters of these networks. As a result of water losses to leakage, not all the inflow to urban water networks is consumed. Water leakage results in losses of supply, pressure, and capital investment. It also has adverse effects on water transfer capability, water treatment, and other elements in the distribution process. Furthermore, water quality problems could result from pollution at leak points. It is, therefore, necessary to estimate the amount of leakage at each point as a function of pressure.

In this paper, artificial neural network as a powerful and flexible mathematical tool is used to model pressure estimation based on reservoir head, node elevation, water consumption, and the amount of leakage at a given point. Part of Tehran metropolitan water distribution system is modeled and the EPANET2.0 software is used to estimate the pressure variations in the network. Two different artificial neural network models, namely, a multi-layered ANN and a fuzzy logic neural network (ANFIS) are used for this purpose. The results are analyzed and compared with those from EPANET.

Key Words: Water Distribution Network, Leakage, Artificial Neural Network, Fuzzy Logic, Pressure Estimation.

پیش‌بینی فشار در شبکه‌های آبرسانی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و استنتاج فازی

محمد کارآموز* مسعود تابش** سارا نظیف**
علی مریدی***

(دریافت ۸۳/۱۱/۲۵ پذیرش ۸۴/۳/۳۰)

چکیده

فشار نقاط مصرف در شبکه‌های آبرسانی یکی از مهم‌ترین پارامترهای هیدرولیکی است که می‌تواند در مدیریت بهینه شبکه‌های توزیع آب مورد استفاده قرار گیرد. از آنجایی که فشار، اثرات متفاوتی بر پارامترهای مختلف مدیریت شبکه، همچون عملکرد هیدرولیکی، قابلیت اطمینان، پایداری شبکه و نشت دارد، لذا شناسایی روند تغییرات و تعیین میزان آن از اهمیت بسیاری در سطوح مختلف مدیریتی برخوردار است. بخش قابل توجهی از آب ورودی به شبکه‌های توزیع آب شهری به صورت نشت به هدر می‌رود. وجود نشت در شبکه‌های آبرسانی موجب اتلاف منابع و سرمایه صرف شده در تولید، انتقال، تصفیه و توزیع آب، ایجاد مشکلات کیفی در آب شرب به علت ورود آلودگی به شبکه توزیع آب از محل نشت و غیره می‌شود. با توجه به نقش حیاتی آب در زندگی و کمبود منابع آب قابل شرب و همچنین هزینه‌های گزاف فراهم نمودن آب شرب سالم، باید سعی شود تا تلفات آب به حداقل رسانده شود. برای این منظور و با توجه به تاثیر متقابل نشت و فشار بر یکدیگر، ابتدا لازم است تا در هر نقطه بتوان میزان نشت را با توجه به فشار موجود تعیین کرد. با توجه به قابلیت‌ها و مزایای شبکه عصبی و سهولت استفاده از آن به عنوان یک ابزار کار، در این مقاله سعی شده تا مدل شبکه عصبی برای تعیین فشار در هر نقطه با توجه به ارتفاع مخزن، ارتفاع نقطه، و میزان مصرف با لحاظ کردن نشت موجود در آن نقطه تدوین شود. در این مقاله تغییرات فشار در قسمتی از شبکه توزیع آب شهر تهران با استفاده از مدل EPANET2.0 شبیه‌سازی شده است. برای این منظور از دو مدل شبکه عصبی و همچنین ترکیب شبکه عصبی با منطق فازی استفاده شده و نتایج حاصل از آن‌ها با نتایج مدل تحلیل هیدرولیکی و نیز با یکدیگر مقایسه شده و توانایی مدل‌های شبکه عصبی در پیش‌بینی فشار نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع آب، نشت، شبکه عصبی، منطق فازی، پیش‌بینی فشار.

*Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University, Karamouz@aut.ac.ir
** Assistant Professor, and Ph.D Student, respectively, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran
*** Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Amir Kabir University

* استاد دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
** استادیار و دانشجوی کارشناسی ارشد گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران
*** دانشجوی دکتری مهندسی آب دانشگاه صنعتی امیرکبیر

ترک‌های موجود در شبکه مشخص شود، در طول دوره آغاز نشت تا مرئی شدن محل نشت، میزان آب زیادی هدر می‌رود که با اعمال مدیریت صحیح فشار در شبکه می‌توان تا حد زیادی جلوی هدر رفتن آب از این طریق را گرفت. از بین روش‌های مختلف کنترل نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری، روش مدیریت فشار شبکه ساده‌ترین، سریع‌ترین و احتمالاً ارزان‌ترین راه ممکن می‌باشد [۲]. کاهش فشار شبکه باعث می‌شود تا تعداد محل‌های نشتی و نیز آهنگ نشت آب کاهش یابند. با استفاده از رابطه‌ای که میزان ذخیره آب حاصل از کاهش نشت شبکه را به صورت تابعی از فشار شبکه نشان می‌دهد، می‌توان به ارزیابی اقتصادی مزایای کنترل نشت به شیوه اعمال مدیریت فشار پرداخت. چگونگی محاسبه نشت در طول سالیان اخیر با استفاده از تجارب کشورهای مختلف توسط IWA (۲۰۰۰) به صورت استاندارد ارائه شده است [۳].

عدم اطلاع از میزان نشت در گره‌های شبکه، انجام مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه را با دشواری روبرو می‌سازد؛ چرا که استفاده از مقادیر تقاضا در گره‌ها بدون در نظر گرفتن نشت موجود در شبکه، منجر به نتایج غیر واقعی برای دبی و فشار در گره‌ها می‌گردد. برای حل این مشکل و مدل‌سازی نشت تلاش‌هایی صورت گرفته است. از جمله جرمانپولوس^۱ (۱۹۸۵) و ولا^۲ (۱۹۹۱) روابطی برای توزیع نشت در تک‌تک لوله‌های شبکه ارائه دادند که برخی روابط ارائه شده به علت پیچیدگی و وسعت پارامترها با استقبال کمتری روبرو شد [۴]. اخیراً نیز آرانجو^۳ و همکاران (۲۰۰۳) و بروس^۴ و همکاران (۲۰۰۳) روابطی را برای محاسبه نشت در گره‌ها ارائه دادند. در این روابط، نشت گره‌ها با توجه به تعداد مشترکین هر گره و یا به صورت درصدی از تقاضا در هر گره محاسبه شده است [۶۰۵]. هم‌چنین اسدیانی (۱۳۸۳) برای محاسبه نشت در شبکه و لحاظ کردن اثرات نشت در فشار نقاط مختلف شبکه، از ویژگی آب‌پخش‌های موجود در نرم‌افزار EPANET استفاده کرده است که نتایج حاصله از این مطالعات نشان از مطلوبیت روش مورد استفاده دارد [۴].

فشار، از جمله پارامترهای هیدرولیکی تعیین‌کننده وضعیت عملکرد و سرویس‌دهی شبکه‌های توزیع آب شهری بوده و از اهمیت بالایی برخوردار است. فشار زیاد موجب افزایش نشت، تلفات مصرف و بالارفتن تعداد حوادث شبکه می‌شود. از طرفی فشارهای پایین در شبکه نیز موجب عدم تأمین کامل مصارف و یا تأمین نامطلوب آنها خواهد شد. هم‌چنین فشار از نظر عملکرد و نیز وضعیت سازه‌ای بر روی پایداری سیستم مؤثر است. در فشارهای بالا، احتمال وقوع حوادث و شکست سیستم افزایش پیدا کرده و پایداری سازه‌ای و نیز امکان ادامه عملکرد سیستم و سرویس‌دهی مطلوب آن به مخاطره می‌افتد. لذا برای یک بهره‌بردار، مطلوب است که تغییرات فشار تنها در محدوده استانداردهای مجاز باشد تا تأمین اهداف مختلف موجود در شبکه که غالباً از لحاظ تغییرات مطلوب فشار با یکدیگر در تضاد هستند، به تعادل برسند. بنابراین با توجه به مطالب ذکر شده، آگاهی از چگونگی تغییرات فشار از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. تابش و همکاران (۲۰۰۳) به سنجش عملکرد هیدرولیکی و قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع آب از نقطه نظر فشار هیدرولیکی و تغییرات آن در نقاط مصرف پرداختند [۱].

تمام آب ورودی به شبکه‌های توزیع آب شهری مصرف نمی‌شود و بخش قابل توجهی از آن به هدر می‌رود که از آن به عنوان نشت یا آب به حساب نیامده یاد می‌شود. نشت در شبکه از طریق لوله‌های شکسته و ترک خورده، اتصالات و متعلقات معیوب و یا به علت عدم اجرای صحیح عملیات لوله‌گذاری و اتصالات صورت می‌گیرد. در مواردی که علت نشت از شبکه، ترک‌ها و درزهای موجود در بخش‌های مختلف آن می‌باشد؛ از آن‌جا که با تغییر فشار آب اندازه این درز و ترک‌ها نیز تغییر می‌کند، به عبارت دیگر با افزایش فشار بازشدگی ترک‌ها بیشتر شده و با کاهش فشار ترک‌ها بسته می‌شوند؛ میزان نشت از محل ترک، با میزان فشار موجود در آن نقطه نسبت مستقیم دارد. لذا با ایجاد هرگونه تغییری در فشار آب، آهنگ اتلاف (نشت) آب از شبکه نیز تغییر می‌کند. از طرفی، فشار زیاد احتمال بروز نشت را افزایش داده و باعث می‌شود تا محل نشت زودتر آشکار شود. از آن‌جا که معمولاً مدت زمان زیادی طول می‌کشد تا نشت ناشی از

¹ Germanopoulos

² Vela

³ Arango

⁴ Brrows

و تراز سطح آبخوان بهره جستند. در مورد اخیر، با در نظر گرفتن ورودی‌ها و خروجی‌های متعدد به آبخوان، و شبیه‌سازی آن با یک مدل آب زیرزمینی، اطلاعات اولیه برای آموزش مدل شبکه عصبی تهیه گردید. در این مطالعات، مدل شبکه عصبی تهیه شده در قالب یک مدل بهینه‌سازی جهت برداشت بهینه از آبخوان تهران و تامین نیازها مورد استفاده قرار گرفته است. هم‌چنین کارآموز در پیش‌بینی سیلاب از انواع روش‌های مختلف شبکه عصبی استفاده کرده است که در این مورد با توجه به ویژگی‌های پدیده سیلاب، شبکه عصبی تاخیری، بهترین نتایج را به دست داده است [۱۲، ۱۳ و ۱۴].

۲- روش کار

۲-۱- ساختار مدل‌سازی نشت در مدل تحلیل هیدرولیکی

برای پیش‌بینی تغییرات نشت با کنترل فشار، نیاز به رابطه‌ای است که نشت در هر نقطه از شبکه را به صورت تابعی از فشار در آن نقطه نمایش دهد. برای نشت آزاد (تخلیه در هوا)، می‌توان از معادله تئوری دبی خروجی از روزنه، با فرض سطح مقطع ثابت به صورت رابطه ۱ استفاده کرد

(۱)

$$Q = KP^{0.5}$$

در رابطه ۱، Q دبی نشت از روزنه موجود بر روی لوله، P فشار در محل نشت و k ضریب ثابتی است که بستگی به شکل و سطح مقطع روزنه دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این رابطه میزان نشت متناسب با جذر فشار در محل وقوع نشت در نظر گرفته شده است. برخی از تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که دبی نشت به مقدار قابل توجهی از آنچه دبی روزنه پیشنهاد می‌کند، بیشتر است [۲]. لذا به عنوان یک رابطه کلی برای تخمین نشت از رابطه ۲ استفاده می‌شود

(۲)

$$Q = CP^n$$

ضریب C بستگی به ویژگی‌های خاص هر روزنه دارد. در منابع مختلف و برای کشورهای مختلف با توجه به

از جمله مشکلات استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل هیدرولیکی، مشکل بودن امکان ایجاد ارتباط بین آنها و مدل‌های مختلف مدیریتی می‌باشد. لذا در این مقاله با توجه به قابلیت‌های شبکه عصبی سعی بر استفاده از این روش برای ایجاد ارتباط بین مدل تحلیل هیدرولیکی و سایر مدل‌ها می‌باشد. شبکه‌های عصبی مصنوعی، به دلیل قابلیت‌های ویژه‌ای که دارند، کاربردهای وسیعی در زمینه‌های مختلف پیدا کرده‌اند. از کاربردهای مهم این شبکه‌ها می‌توان به شناسایی الگو، مدل‌سازی و کنترل اشاره نمود که برای هر کاربرد خاص، شبکه عصبی با ساختار متفاوت ارائه شده است. از جمله مزایای شبکه عصبی می‌توان به قابلیت تقریب زنی هر نوع تابع، قابلیت تطبیق^۱ یا به‌روز سازی خود، پایداری و نیز سادگی کار با آن و عدم نیاز به درک عمیق از روابط بین متغیرها و تابع اشاره کرد. هم‌چنین به علت دوام^۲ سیستم مدل‌سازی شبکه عصبی متغیرهای نادرست، تاثیر کمی در نتایج مدل دارند [۷].

داماس^۳ و همکاران (۲۰۰۰) از شبکه عصبی برای کنترل سیستم‌های تامین آب بهره جستند. آنها از شبکه عصبی برای پیش‌بینی نیاز آبی جهت اعمال سیاست‌های کنترلی استفاده کردند [۸]. تابش و همکاران (۱۳۸۲) از شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین تقاضای کوتاه مدت آب شهری استفاده کردند [۷]. هم‌چنین گیم^۴ (۲۰۰۳) به کاربرد شبکه عصبی برای تدوین سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری ارزیابی وضعیت لوله‌ها در شبکه توزیع آب پرداخته است [۹]. گیس^۵ و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای تعیین میزان کلر باقیمانده در نقاط مختلف شبکه توزیع آب شهری استفاده کرد [۱۰].

مونس^۶ (۲۰۰۲) با استفاده از اطلاعات حاصل از حس‌گرهای موجود در شبکه توزیع آب شهری، مدل شبکه عصبی مصنوعی را برای پیش‌بینی و طبقه‌بندی نشت در شبکه مورد استفاده قرار داد [۱۱]. کارآموز و همکاران (۲۰۰۴) در دو رویکرد متفاوت از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی سیلاب و هم‌چنین پیش‌بینی تغییرات کیفیت

¹ Self-Adaptive

² Robustness

³ Damas

⁴ Geem

⁵ Gibbs

⁶ Mounce

آن از حداقل جریان شبانه می توان میزان نشت را در زمان حداقل جریان شبانه با استفاده از رابطه ۶ محاسبه کرد (۶)

$$Leak_{MNF} = MNF - NLNU$$

که NLNU مصرف نرمال شبانه، MNF دبی اندازه گیری شده در زمان جریان حداقل شبانه و $Leak_{MNF}$ نشت در زمان جریان حداقل شبانه می باشد.

برای تخمین نشت در سایر ساعات شبانه روز می توان از رابطه ۷ استفاده کرد.

$$Leak_t = Leak_{MNF} (AZP_t / AZP_{MNF})^n \quad (7)$$

در رابطه ۷، $Leak_{MNF}$ نشت در زمان حداقل جریان شبانه، AZP_t فشار متوسط منطقه در زمان t ، AZP_{MNF} فشار متوسط ایزوله در زمان حداقل جریان شبانه و $Leak_t$ میزان نشت در زمان t است. برای تعیین مقدار n از مفاهیم مختلفی استفاده می شود که معروف ترین آنها نظریه FAVAD^۱ می باشد [۱۵]. در این نظریه توان n با توجه به نسبت سطح مقطع منافذ ثابت نشت به سطح مقطع منافذ متغیر، تعیین شده و با تغییرات فشار مطابق شکل ۱ تغییر می نماید. مقدار P_0 در شکل ۱ برابر با فشاری است که در آن مقدار n تعیین شده و P_1 برابر با فشار در شرایط مورد بررسی شبکه است. هم چنین منظور از پارامتر Rfv در شکل مزبور نسبت سطح مقاطع منافذ ثابت نشت مانند سوراخ شدگی ها به سطح مقطع منافذ متغیر نشت مانند درز و ترک ها در فشار P_0 می باشد [۱۶].

روش های مختلفی برای تخصیص نشت روزنه های فرضی در نظر گرفته شده بر روی لوله به گره های موجود در شبکه و محاسبه C وجود دارد، با توجه به نتایج مطلوب روش پیشنهادی اسدیانی (۱۳۸۳) و نیز امکان استفاده از نرم افزار EPANET، در این مقاله از روش اسدیانی (۱۳۸۳) استفاده شده است. در ادامه، توضیحات بیشتر در رابطه با چگونگی محاسبه نشت و نیز روش مورد بحث ارائه شده است.

پس از محاسبه نشت کل شبکه در زمان حداقل جریان شبانه برای تعیین ضریب C'_i به این ترتیب عمل می شود:
۱- با توجه به جمعیت تحت پوشش هر گره، میزان دبی مستقل از فشار و یا همان مصرف مشترکین در زمان

وضعیت شبکه توزیع آنها مقادیر مختلفی برای توان n پیشنهاد شده است.

پس از محاسبه دبی نشت ناشی از هر یک از روزنه های موجود در سراسر طول لوله ها، مجموع نشت به دست آمده به طور مساوی به گره های موجود در دو سر لوله تخصیص داده می شود و لذا در نهایت نشت هر گره را می توان از رابطه ۳ محاسبه کرد

$$Q_i = C_i \sum_{j=1}^m \frac{L_{ij}}{2} \sum_{k=1}^s P_k^n \quad (3)$$

که در آن، m تعداد لوله های متصل به گره i ، s تعداد روزنه های موجود بر روی نصف طول لوله، L_{ij} طول لوله i م متصل به گره i ، P_k فشار در محل روزنه k م و C_i ثابت مربوط به گره i است.

با لحاظ کردن فشار هر گره، نشت هر یک از گره ها را می توان از رابطه ۴ به دست آورد (۴)

$$Q_i = C_i \sum_{j=1}^m \frac{L_{ij}}{2} P_i^n$$

که در آن، P_i فشار در محل گره i می باشد. از آن جا که طول لوله های ورودی به هر گره، مقدار ثابتی است، رابطه بالا را می توان به صورت رابطه ۵ اصلاح کرد (۵)

$$Q_i = C'_i P_i'^n$$

در رابطه ۵، C'_i ثابت جدیدی است که در آن اثرات طول لوله های ورودی به گره i نیز لحاظ شده است. از جمع مقادیر نشت مربوط به گره های موجود در شبکه، می توان کل نشت موجود در شبکه را به دست آورد. برای به دست آوردن ضرایب C'_i نیاز به داده هایی در ارتباط با میزان نشت موجود در شبکه می باشد. برای به دست آوردن این اطلاعات از روش آنالیز حداقل جریان شبانه استفاده می شود. به این منظور میزان جریان موجود در یک شبکه مجزا (ایزوله)، که ورودی ها و خروجی های آن کنترل شده و از مناطق مجاور خود مجزا شده است، در هنگام شب و در فاصله زمانی حداقل تقاضای مشترکین اندازه گیری می شود که آن را حداقل جریان شبانه می نامند. حداقل جریان شبانه از دو مولفه مصرف نرمال شبانه و نشت تشکیل شده است که با تعیین مصرف نرمال شبانه و کسر

¹ Fixed and Variable Area Discharge

تمام پارامترهای موجود در رابطه ۸ قبلاً تعریف شده‌اند.

۴- پس از محاسبه ضریب C مربوط به کل شبکه، با استفاده از رابطه ۴ دبی وابسته به فشار هر گره محاسبه شده و به میزان دبی قبلی گره اضافه می‌شود.

۵- با تخصیص دبی جدید به تمام گره‌های موجود در شبکه، مدل تحلیل هیدرولیکی مجدداً اجرا شده و فشار تک تک گره‌ها ثبت می‌شود.

۶- با توجه به این‌که فشار موجود در هر نقطه با برداشت آن نقطه ارتباط مستقیم دارد، لذا فشار ثبت شده در مرحله ۵ با فشار ثبت شده در مرحله ۲ یکسان نبوده و مجدداً مراحل ۳ تا ۵ تکرار می‌شوند تا فشار به دست آمده در تمام گره‌های شبکه ثابت شود.

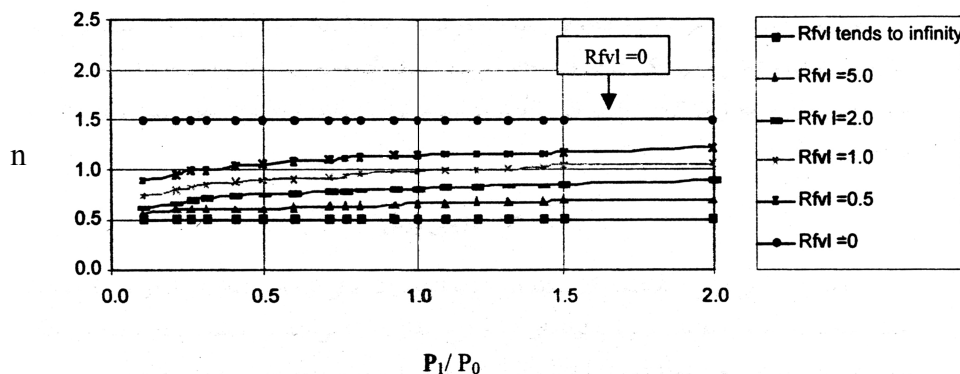
حداقل جریان شبانه برای تمام گره‌های موجود در شبکه تعیین می‌شود.

۲- با تخصیص دبی مستقل از فشار به هر گره، مدل تحلیل هیدرولیکی اجرا شده و فشار تک تک گره‌های موجود در شبکه ثبت می‌شود.

۳- با توجه به میزان نشت کل شبکه محاسبه شده در زمان حداقل جریان شبانه و استفاده از رابطه ۸، ضریب C برای کل شبکه محاسبه می‌شود و nn تعداد گره‌های موجود در شبکه می‌باشد.

(۸)

$$C = \frac{Leak_{MNF}}{\sum_{i=1}^{nn} \left(\sum_{j=1}^m \frac{L_{ij}}{2} \times P_i^n \right)}$$



شکل ۱- توان n در رابطه توانی فشار نشت براساس مفهوم FAVAD [۱۶].

به راحتی با تعیین میزان مصرف مشترکین در هر ساعت میزان نشت هر گره شبکه را محاسبه کرد. همان‌طور که از مراحل بالا بر می‌آید، انجام این مراحل به خصوص برای شبکه‌های گسترده بسیار زمان‌گیر و خسته‌کننده می‌باشد؛ لذا برای کاهش زمان مورد نیاز می‌توان از ویژگی گزینه آبفشان‌های موجود در مدل تحلیل هیدرولیکی EPANET2.0 استفاده کرد.

آبفشان‌ها، تاسیسات متصل به انشعابات هستند که جریان عبوری از یک نازل^۲ یا روزنه، که به اتمسفر تخلیه می‌شود را مدل می‌کنند. دبی عبوری از یک آبفشان به صورت تابعی از فشار موجود، در گره تغییر می‌کند. برای مدل‌سازی آبفشان‌ها در EPANET2.0 از رابطه ۱۰ استفاده می‌شود

۷- پس از طی مراحل مذکور، ضریب C به دست آمده باید کالیبره شود. به این منظور باید مجموع دبی وابسته به فشار در کل گره‌های شبکه با نشت کلی سیستم که در زمان حداقل جریان شبانه محاسبه شده یکسان باشد. در صورت عدم توافق این دو، C با استفاده از رابطه ۹ اصلاح می‌شود

(۹)

$$C_{new} = C_{old} (Leak_{MNF} / Leak_{cal})$$

در رابطه ۹ ضریب محاسبه شده در مرحله قبل، Leak_{cal} نشت محاسبه شده با ضریب C_{old} و C_{new} ضریب اصلاح شده است.

۸- با تغییر ضریب C میزان فشار گره‌ها و به تبع آن نشت هر گره تغییر کرده و مجدداً مراحل ۳ به بعد تکرار می‌شوند تا مدل کالیبره شود. پس از آن می‌توان

¹ Emitter
² Nuzzle

(۱۰)

$$Q_i = CP_i^N$$

که Q_i دبی جریان آبفشان i ام، P_i فشار در محل پخش کننده i ام، C ضریب شدت جریان و N توان فشار است.

با استفاده از این ویژگی می توان قسمت عمده ای از فرایند ذکر شده در بخش قبل را توسط نرم افزار EPANET2.0 انجام داد [۴].

۲-۲- شبکه عصبی (ANN^۱)

همان طور که گفته شد، شدت نشت از شبکه با تغییرات فشار شبکه ارتباط مستقیم دارد و میزان فشار موجود در هر نقطه شبکه نیز خود تابعی از میزان کل آب (مصرفی توسط مصرف کننده و نشت) برداشتی در هر گره، ارتفاع گره مورد نظر و نیز هد موجود در مخزن می باشد. لذا برای اعمال مدیریت صحیح در شبکه، کاربر لازم است تا با در نظر گرفتن حالت های مختلف تغییرات ممکن شبکه، به دفعات مدل تحلیل هیدرولیکی را اجرا کرده و هر بار از نتایج آن در برنامه ریزی استفاده کند. در این مقاله برای جلوگیری از این مشکل سعی شده برای شبکه توزیع آب شهری مورد نظر، مدل شبکه عصبی آموزش داده شود تا پس از تهیه این مدل، دیگر نیازی برای اجرای مدل شبیه سازی هیدرولیکی برای در نظر گرفتن حالات مختلف نباشد؛ و در هر نقطه از شبکه بتوان با وارد کردن اطلاعات مربوط به ارتفاع و میزان مصرف آب گره و نیز هد آب در مخزن، میزان فشار و سپس میزان نشت را تخمین زد. مدل شبکه عصبی با استفاده از نتایج مدل تحلیل هیدرولیکی EPANET2.0 برای تغییرات ارتفاع مخزن و میزان مصرف گره ها در محدوده تغییرات مجاز و نیز ارتفاع نقاط مختلف شبکه آموزش داده شده است. در این مقاله از شبکه عصبی مصنوعی با ساختار پرسپترون^۲ چند لایه استفاده شده است. شبکه های عصبی سیستم های دینامیکی هستند که با پردازش داده های تجربی، دانش و یا قانون نهفته در داده ها را به ساختار شبکه منتقل می کنند. به همین خاطر این سیستم ها را هوشمند می نامند؛ چرا که بر اساس انجام

محاسبات بر روی داده های عددی یا مثال ها، قوانین کلی را فرا می گیرند؛ تا آنجا که این سیستم های مبتنی بر هوش محاسباتی سعی در مدل سازی ساختار نرو - سیناپتیکی مغز بشر دارند.

مدل شبکه عصبی با ساختار پرسپترون، از چندین لایه (معمولاً سه لایه) و هر لایه از تعدادی واحد پردازشگر به نام نرون تشکیل شده است. نرون مصنوعی می تواند یک تابع ریاضی غیرخطی باشد، در نتیجه یک شبکه عصبی که از اجتماع این نرون ها تشکیل می شود، نیز می تواند یک سیستم کاملاً پیچیده و غیرخطی باشد. در یک شبکه عصبی، هر نرون به طور مستقل عمل می کند و رفتار کلی شبکه، برآیند رفتارهای محلی نرون های متعدد است. این ویژگی باعث می شود تا خطاهای محلی اثر قابل توجهی در خروجی نداشته باشند. به عبارت دیگر نرون ها در یک روند همکاری، یکدیگر را تصحیح می کنند که این خصوصیت باعث افزایش دوام سیستم می گردد. یک نرون با استفاده از تابع واکنش، مقدار خروجی خاصی را به ازای ورودی های مختلف تولید می کند.

پارامترهای مرتبط با یک نرون عبارت اند از: p مقدار ورودی به نرون، w وزن مربوط به این ورودی، b ضریب ثابت یک واحد وزن (وزن یک ورودی واحد) که عموماً اریب^۳ نامیده می شود، و اضافه نمودن آن انعطاف پذیری شبکه را افزایش می دهد، f تابع محرک^۴ و a خروجی از نرون است. ارتباط بین خروجی و ورودی های نرون را می توان به صورت رابطه ۱۱ نشان داد

$$a = f(wp + b) \quad (11)$$

ساختار تابع محرک سیگموئیدی که اغلب در شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار می گیرد، به صورت رابطه ۱۲ است

$$y_j = f(s_j) = 1 / (1 + \exp(-s_j)) \quad (12)$$

در رابطه ۱۲ s_j یک عدد حقیقی بوده اما مقدار y_j تنها بین صفر تا یک تغییر می کند.

یادگیری شبکه های عصبی، در واقع همان تنظیم پارامترهای شبکه از قبیل مقادیر وزن های w و b

⁵ Bias

⁶ Activation function

¹ Artificial Neural Network

² Preceptron

تطبیقی^۲ استفاده نماید. در ANFIS، سیستم‌های استنتاج فازی FIS به خوبی تکامل می‌یابد. یک سیستم استنتاج فازی FIS می‌تواند برقراری یک ترسیم غیرخطی از متغیرها را بررسی کند که به صورت f بیان می‌گردد. در واقع f مقدار تخمینی از یک مقدار خاص مشاهده شده می‌باشد و می‌تواند به صورت رابطه ۱۴ محاسبه شود

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^m y^l \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right)}{\sum_{l=1}^m \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right)} \quad (14)$$

در این صورت y^l ، خروجی اولیه در استنتاج مامدنی^۳ یا یک مقدار ثابت در استنتاج سوگنو^۴ می‌باشد. مقدار تابع عضویت $\mu_{A_i^l}(x_i)$ بر روی نقاط فضایی ورودی $x = [x_1, \dots, x_n]$ از قانون فازی ۱ می‌باشد. فرض ارتباط «و» در گزاره‌ها به صورت حاصل ضرب جبر کلاسیک (استنتاج مامدنی) بوده که در این صورت روش چگالی مرکزی^۵ برای دی فازی^۶ استفاده می‌گردد. بنابراین رابطه ۱۴ به صورت رابطه ۱۵ خواهد بود

$$f(x) = \sum_{i=1}^m w_i b_i(x) \quad (15)$$

در اینجا اگر w_i برابر y^l باشد آنگاه مقدار b_i به صورت رابطه ۱۶ خواهد بود

$$b_i(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^m \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right)} \quad (16)$$

تا کنون مقدار f برای یک نقطه از دامنه تغییرات ورودی یا برای یک x از مجموعه متغیرهای ورودی $D = [x_1, \dots, x_n]$ ، $i = 1, 2, \dots, n$ برای متغیرهای ورودی، و $h = 1, 2, \dots, h$ برای داده‌های مشاهده‌ای محاسبه شده است. حال اگر F_S مقادیر محاسبه شده، متناوب نقاط مجموعه متغیر ورودی باشد، در این صورت F_S برابر $f(x)$ برای سایر متغیرهای ورودی خواهد بود. به عبارت دیگر تابع F_S در محدوده $[a, b]$ برای مقدار متغیرهای

است. شبکه‌ای دارای یک قابلیت یادگیری مناسب است که اگر برای یک وضعیت خاص آموزش داده شود، و تغییر کوچکی در شرایط محیطی شبکه رخ دهد، شبکه بتواند با آموزشی مختصر، برای شرایط جدید نیز کارآمد باشد.

رابطه بین خروجی هر نرون (قبل از ورود به تابع محرک) و مقادیر ورودی به صورت رابطه ۱۳ است

$$(13)$$

$$n_i = \sum_{j=1}^R (p_j w_{i,j} + b_i)$$

در رابطه ۱۳، R تعداد کل ورودی‌ها و i تعداد نرون‌های موجود در هر لایه می‌باشد [۱۷].

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، در مدل حاضر ورودی‌های شبکه عصبی، ارتفاع و میزان مصرف هر گره، هد آبی مخزن و خروجی شبکه نیز، فشار موجود در هر گره با احتساب نشت موجود در گره می‌باشد.

۲-۳- ساختار سیستم استنتاج فازی-شبکه عصبی تطابقی (ANFIS)

طی دهه گذشته، تلاش‌های متعددی در زمینه کاربردهای منطق فازی و سیستم‌های شبکه عصبی در تحقیقات محققین مختلف، به انجام رسیده است. در این قسمت از مقاله از منطق فازی برای پیوسته کردن متغیرهای ورودی به شبکه، که شامل اطلاعات مربوط به میزان مصرف آب گره‌ها و نیز مقدار هد آب در مخزن می‌باشد، استفاده شده است. سیستم‌های فازی-عصبی، شبکه‌های تطبیقی چند لایه است که از عناصر اصلی و توابع سیستم‌های منطق فازی حاصل شده‌اند و از کاربرد آن‌ها در مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های پیچیده موفقیت‌های بسیاری به دست آمده است. معروف‌ترین این روش‌ها سیستم استنتاج فازی عصبی تطابقی^۱ (ANFIS) بوده که توسط یانگ در سال ۱۹۹۶ بسط یافته است. این مدل اجازه می‌دهد که سیستم‌های فازی در مباحث آموزش پارامترها، از الگوریتم آموزش انتشار خطا به عقب

^۱ Adaptive Neuro Fuzzy Inference System

^۲ Adaptive Backpropagation Learning Algorithm

^۳ Mamdani inference

^۴ Sogno

^۵ Center of Gravity Method

^۶ Defuzzifying

۳- مطالعه موردی

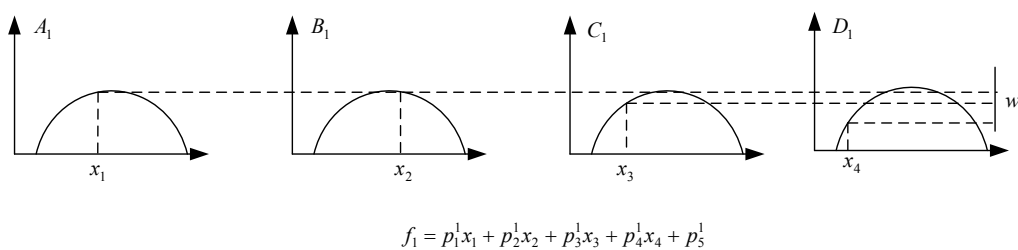
تهران، در سال‌های اخیر رشد فزاینده‌ای یافته و به عنوان بزرگ‌ترین کانون زیستی و شهری کشور در آمده است. تراکم بیش از اندازه جمعیت در تهران بزرگ، و مسائل و مشکلاتی که پاره‌ای از آن‌ها معلول جمعیت زیاد و روند رو به رشد مهاجرت به شهر تهران است، و هم‌چنین محدودیت منابع تامین آب انجام مطالعات کاربردی مستمر در زمینه تامین آب و استفاده بهینه از کلیه امکانات موجود در راستای بهبود کیفیت آب تخصیص داده شده را، ایجاب می‌نماید. با توجه به هزینه‌های بسیار بالایی که برای تامین آب صرف می‌شود، شبکه آب‌رسانی شهر تهران به دلیل فرسودگی و عدم

ورودی $D = \{x^1, \dots, x^h\}$ خواهد بود که این متغیرها در این محدوده قرار دارند.

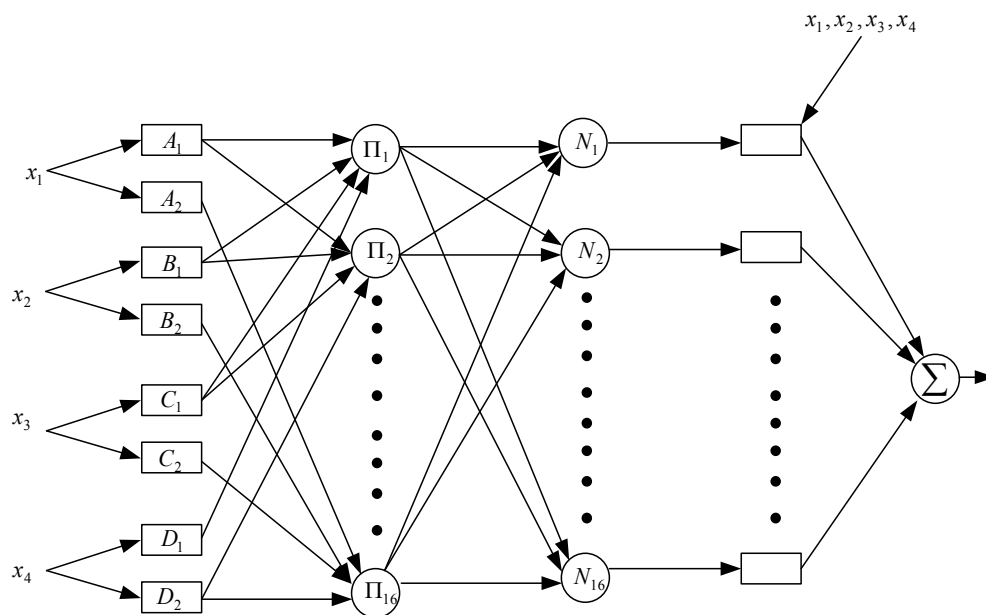
اگر مقدار متغیر خروجی به ازای مقادیر متغیرهای ورودی $D = \{x^1, \dots, x^h\}$ برابر Q^h باشد، در روش ANFIS می‌بایست مجموع مربعات اختلاف بین مقادیر مشاهده شده $Q^h(x)$ با مقدار محاسبه شده $F_S(x)$ حداقل گردد، بنابراین طبق رابطه ۱۷

$$\min : \sum_{j=1}^h |F_S(x^j) - Q(x^j)|^2 \quad (17)$$

ساختار یک سیستم استنتاج فازی شبکه عصبی ۵ لایه دارای چهار متغیر ورودی که هر ورودی دارای دو تابع عضویت است، در شکل ۲ نشان داده شده است. شکل ۲- الف نمایش دهنده مکانیزم استلزام برای مدل TSK (فقط برای یک قانون)، و شکل ۲- ب نمایانگر معماری شبکه عصبی بر اساس روش ANFIS می‌باشد [۱۸].



شکل ۲- الف



شکل ۲- ب

شکل ۲- سیستم استنتاج فازی شبکه عصبی دارای چهار متغیر ورودی و در هر ورودی دو تابع عضویت

معقول مشترکین در بخش مورد مطالعه، برای محاسبه میزان مصرف معقول شبانه مشترکین خانگی از ارقام فوق استفاده شده است. با توجه به این که براساس بررسی‌های انجام شده بخش مورد مطالعه فاقد مصرف کنندگان عمده شبانه غیرخانگی می‌باشد، با کم کردن مصرف معقول شبانه مشترکین خانگی از حداقل جریان شبانه، میزان نشت برابر با $56/05$ لیتر در ثانیه به دست آمده که مقدار آن 70 درصد حداقل جریان شبانه است. با توجه به محاسبات انجام شده، میزان نشت سالانه برابر با $11/23$ درصد کل آب ورودی به شبکه محاسبه شده است.

اطلاعات دقیقی در مورد میزان نشت در این قسمت از سیستم وجود ندارد؛ ولی با توجه به این که شواهد عینی و قضاوت‌های مهندسی میزان کل نشت شبکه توزیع آب تهران را $12/5$ درصد نشان می‌دهد، و نیز با توجه به این که نسبت به عمر متوسط بهره‌برداری از شبکه توزیع آب تهران، این بخش از عمر کوتاه‌تری برخوردار است، عدد مذکور برای نشت این بخش از سیستم کاملاً قابل توجیه است.

پس از محاسبه نشت کلی با استفاده از خاصیت آبفشان‌های نرم‌افزار EPANET2.0 ضریب C شبکه برابر با $5/864 \times 10$ تعیین شده و با توجه به طول لوله‌های ورودی به هر گره، ضریب خاص هر گره نیز تعیین شده و در مدل تحلیل هیدرولیکی قرار داده شده است.

برای ساخت اطلاعات ورودی مدل شبکه عصبی، باثابت در نظر گرفتن ویژگی‌ها و مختصات اجزاء مختلف شبکه، با استفاده از الگوی تغییرات نیاز آبی در طول ساعات مختلف شبانه‌روز و نیز در فصول مختلف سال، مقادیر نیاز آبی مختلفی به گره‌های مورد بررسی اختصاص داده شده است. هم‌چنین برای لحاظ کردن اثرات تغییر ارتفاع آب موجود در مخزن بر روی وضعیت فشاری گره‌های مختلف، ۷ مقدار مختلف برای ارتفاع مخزن بین مقادیر حداقل و حداکثر ذکر شده در نظر گرفته شده و

اعمال مدیریت صحیح کمی و کیفی، از کارایی لازم برخوردار نبوده و با مشکلات بسیاری در ارتباط با توزیع مطلوب آب روبرو است.

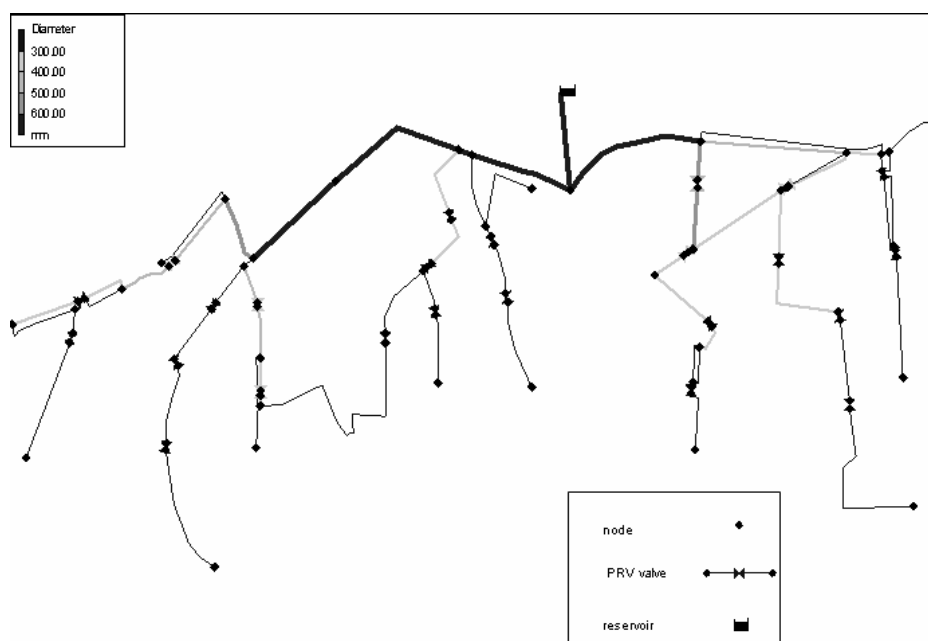
در تهران، راه‌حل مشکل کم‌آبی، صرفاً بهره‌برداری از منابع جدید نمی‌باشد، بلکه در کنار تولید آب باید با مدیریت صحیح و بهره‌برداری بهینه، از تلفات و هدر رفتن آب جلوگیری شود تا هم بازده و عمر سیستم افزایش یابد و هم هزینه‌ها حداقل گردد. بدیهی است که برای مدیریت سیستم و تصمیم‌گیری، نیاز به اطلاعات و ابزارهایی می‌باشد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها میزان فشار و نشت در نقاط مختلف سیستم است.

با توجه به نکات مذکور، در ارتباط با وضعیت شبکه توزیع آب تهران، در مطالعه حاضر، شبکه توزیع آب شهری تحت پوشش یکی از مخازن شمالی تهران مورد بررسی قرار گرفته است. پس از تهیه نقشه جانمایی، با حذف لوله‌های با قطر زیر 200 میلی‌متر، شبکه ساده‌سازی شده و در نهایت به صورت شکل ۳ در آمده است. محدوده تغییرات تراز آب در مخزن مورد بررسی بین $1598/7$ تا 1605 متر می‌باشد. نیاز آبی هر یک از گره‌ها با توجه به سطح تحت پوشش هر گره، فرض تراکم یک‌نواخت جمعیت 288 نفر در هکتار و میزان مصرف سرانه آب ارائه شده در مطالعات شرکت آب و فاضلاب، برابر 300 لیتر در روز، تعیین شده است. محدوده تغییرات مصرف آب در ساعات مختلف شبانه‌روز و فصول مختلف سال نیز با استفاده از اطلاعات تله‌متری مخازن شرکت آب و فاضلاب در سال 1383 محاسبه شده است.

با توجه به اطلاعات موجود، حداقل جریان شبانه $80/05$ لیتر در ثانیه تعیین شده است. تحقیقات نشان می‌دهند که جمعیت فعال در شب معمولاً بیش از 6 درصد کل جمعیت نبوده و مصرف آب آنها در حدود 10 لیتر در ثانیه می‌باشد [۱۹]. با توجه به عدم وجود اطلاعات کافی در ارتباط با میزان مصرف

محرك و تعداد نرون‌های مختلف و نیز سیستم نوروفازی استفاده شده است. تعداد گام‌های آموزش شبکه عصبی چند لایه ۲۰۰۰ گام و تغییرات تعداد نرون‌های لایه‌های مختلف بین ۲ تا ۱۳ نرون در نظر گرفته شده است. این تعداد نرون با توجه به کاربرد بیشتر آن‌ها در شبکه‌های عصبی انتخاب شده است. همچنین تعداد نرون‌های لایه آخر برابر یک و تابع محرك آن همواره خطی در نظر گرفته شده است.

اطلاعات ورودی مدل شبکه عصبی ایجاد شده‌اند. با در نظر گرفتن این حالات مختلف در نهایت ۵۷۱۴ سری اطلاعات برای ایجاد شبکه عصبی، آماده شده‌اند. برای ایجاد انواع مختلف مدل‌های شبکه عصبی، در این مطالعه از نرم‌افزار MATLAB7.0 استفاده شده است. از مجموع ۵۷۱۴ سری اطلاعات، ۴۳۱۴ سری برای آموزش و ۱۴۰۰ سری برای کنترل شبکه عصبی استفاده شده است. برای پیش‌بینی فشار، از شبکه عصبی دو و سه لایه با توابع



شکل ۳- ساختار شبکه مورد بررسی

که در رابطه ۱۸ for مقدار پیش‌بینی شده، obs مقدار مشاهده شده و n تعداد مشاهدات می‌باشد. در شکل ۴، بهترین نتیجه حاصل از پیش‌بینی فشار با استفاده از مدل شبکه عصبی چند لایه با حالات مختلف توابع محرك و تعداد نرون‌ها در لایه اول و دوم ارائه شده است (از آن‌جا که ارائه نتایج حاصل از ۸۰۰ سری اطلاعات مورد استفاده برای آموزش شبکه در یک نمودار ممکن نیست، به نمایش نتایج حاصل از مقایسه نتایج سری اطلاعات بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ اکتفا شده است). مدل منتخبی که دارای کمترین میزان خطا ($RMSE^1 = 0/109$) است، مدل سه لایه بوده که به ترتیب دارای ۱۲، ۵ و ۱ نرون است و

در این مطالعه ۶۰۰ مدل مختلف شبکه عصبی با تعداد لایه‌ها، نرون‌ها و توابع محرك مختلف که شامل تمام حالات ممکن با خصوصیات فوق می‌باشند، ایجاد شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

نتایج به کارگیری شبکه‌های عصبی معرفی شده در پیش‌بینی فشار شبکه آبرسانی، با استفاده از متوسط مربعات خطا مطابق رابطه ارائه شده در رابطه ۱۸، محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند.

(۱۸)

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (obs_i - for_i)^2}}{n}$$

¹ Root minimum squared error

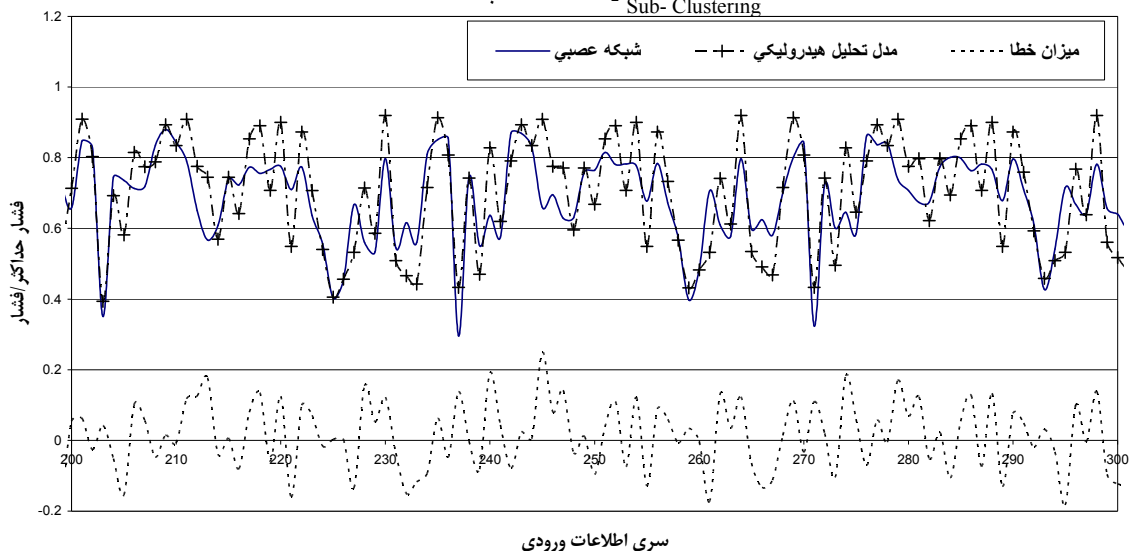
موجود در آنها توسط خود مدل تعیین می‌گردد. در روش خوشه‌بندی جزئی محدوده نفوذ بین صفر تا یک متغیر است که در این بررسی با توجه به خصوصیات اطلاعات ورودی تمام این محدوده مورد آزمون قرار گرفته و با توجه به محدودیت‌های روش، محدوده تغییرات بین ۰/۳ تا ۰/۸۵ قابل استفاده بوده است. از میان حالات مختلف مدل نوروفازی، همان‌طور که در شکل ۵ نمایش داده شده است، در مدل منتخب از روش خوشه‌بندی جزئی با محدوده نفوذ ۰/۰۶۵ استفاده شده است که دارای کمترین میزان خطا (RMSE=۰/۰۰۵۴) می‌باشد. در ضمن نتایج استفاده از روش جداسازی شبکه‌ای نیز در حالات مطلوب تفاوت چندانی با مدل منتخب نداشته و خطای آنها در حدود ۰/۰۰۵۷ می‌باشد که بسیار نزدیک به نتیجه مدل منتخب است.

توابع محرک آن تانژانت سیگموئید، لوگ سیگموئید و خطی می‌باشند.

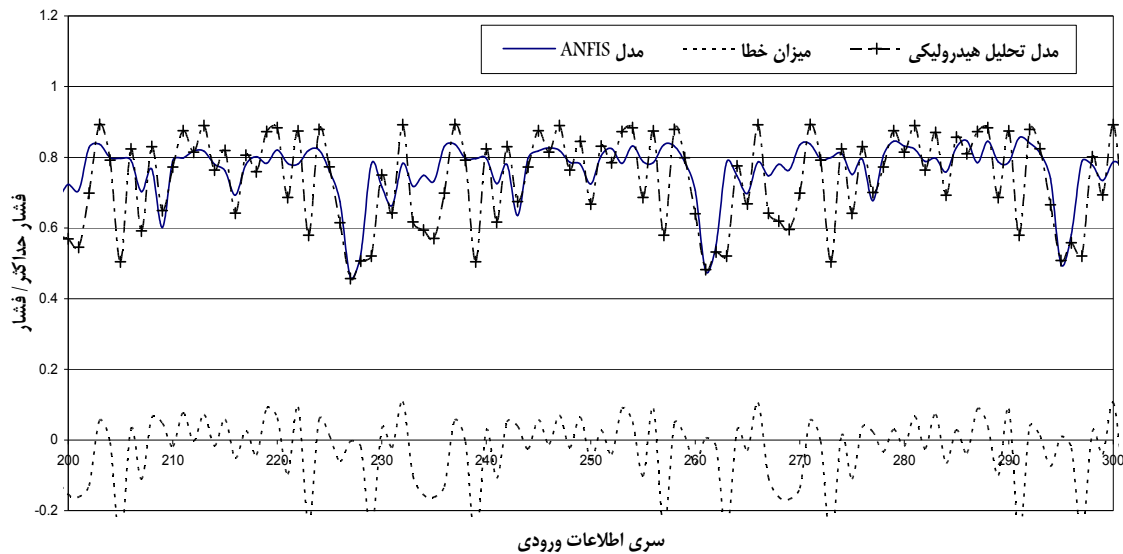
در نرم افزار MATLAB7.0، برای استفاده از سیستم نوروفازی، دو روش منقطع‌سازی شبکه‌ای^۱ و خوشه‌بندی جزئی^۲ در نظر گرفته شده که در این جا هر دو این روش‌ها مورد آزمون قرار گرفته است. تفاوت عمده این دو روش، در چگونگی تعیین تابع عضویت فازی می‌باشد؛ به این ترتیب که در روش، جداسازی شبکه‌ای، نوع تابع عضویت مربوط به اطلاعات ورودی توسط کاربر تعیین می‌شود،

اما در روش خوشه‌بندی جزئی نوع تابع عضویت با توجه به خصوصیات اطلاعات ورودی و دسته‌بندی‌های

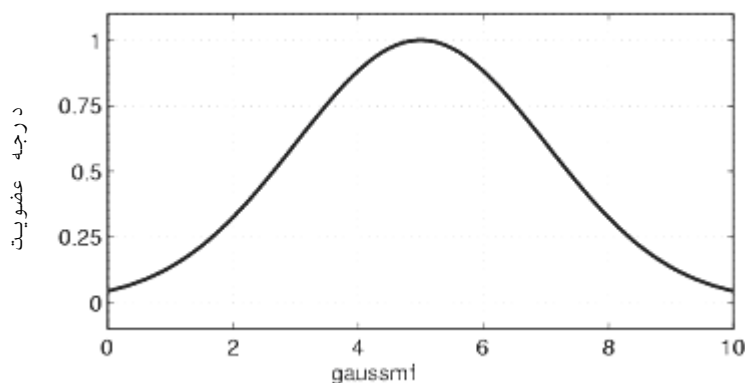
¹ Grid partition
² Sub-Clustering



شکل ۴- نتایج تغییرات فشار با استفاده از مدل شبکه عصبی ۳ لایه با تابع محرک tansig در لایه اول و logsig در لایه دوم



شکل ۵- نتایج تغییرات فشار با استفاده از مدل ANFIS از نوع Sub-Clustering



شکل ۶- شکل تابع عضویت gaussmf مورد استفاده در مدل ANFIS

علاوه بر شاخص RMSE، برای ارزیابی و مقایسه کارایی و دقت پیش‌بینی مدل‌ها، شاخص قدرمطلق خطای نسبی (قدرمطلق تفاضل مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده‌ای تقسیم بر مقدار مشاهده‌ای) نیز مورد بررسی قرار گرفته است. سپس در هر مدل، درصد داده‌های پیش‌بینی که در محدوده خطاهای ± 10 ، ± 20 ، ± 30 قرار دارند، تعیین شده است. در جدول ۱ مقادیر شاخص RMSE و نیز درصد داده‌های با قدر مطلق خطای کمتر از ± 10 ، ± 20 ، ± 30 درصد، مربوط به دو مدل شبکه عصبی دو و سه لایه منتخب با مشخصات آنها و در جدول ۲ نیز مشابه اطلاعات مذکور برای دو مدل منتخب نوروفازی ذکر شده است. برای مثال، با توجه به جدول ۱ در شبکه عصبی دو لایه با تابع محرک لوگ سیگموئید، شاخص RMSE برابر

۰/۱۲۲ و قدرمطلق خطای پیش‌بینی در ۷۵/۹ درصد موارد کمتر از ۳۰ درصد بوده است. در مدل منتخب نوروفازی از نوع جداسازی شبکه‌ای، از تابع عضویت Gaussmf^۱ استفاده شده است (شکل ۶). تابع عضویت مذکور بر مبنای منحنی توزیع گوسی متقارن به دست می‌آید. با توجه به نتایج موجود در جدول‌های ۱ و ۲، همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ترکیب شبکه عصبی با منطق فازی باعث افزایش دقت در پیش‌بینی فشار در شبکه خواهد شد.

^۱ Gaussian Membership Function

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، پس از ساده‌سازی و مدل‌سازی شبکه تحت پوشش یکی از مخازن توزیع آب شهر تهران، میزان نشت سالانه این بخش از سیستم، شبیه‌سازی شد؛ و عددی در حدود ۱/۲ درصد به دست آمد. همان‌طور که قبلاً گفته شد با توجه به این که نشت سالانه کل شهر تهران در حدود ۱۲/۵ درصد تعیین شده و نیز طول دوره بهره‌برداری از این بخش کمتر از سایر بخش‌های مرکزی است عدد به دست آمده قابل قبول به نظر می‌رسد.

هم‌چنین، مدل‌هایی بر مبنای شبکه‌های عصبی چند لایه و نیز سیستم نوروفازی برای پیش‌بینی فشار با لحاظ کردن نشت، در شبکه‌های آب شهری توسعه داده شده است. در این راستا در شبکه‌های عصبی چند لایه، تعداد متعددی شبکه با لایه‌های مختلف و هم‌چنین توابع محرک و نرون‌های متفاوت در نظر گرفته شده و مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج بررسی‌ها نشان داده است مدل شبکه عصبی سه لایه با توابع محرک تانژانت سیگموئید، لوگ سیگموئید و خطی، در لایه‌های اول، دوم و سوم و به ترتیب ۱۲، ۵ و ۱ نرون بهترین عملکرد را داشته است.

در جهت بهبود نتایج پیش‌بینی با شبکه عصبی مصنوعی، برای ایجاد پیوستگی بین متغیرهای ورودی از منطق توری فازی استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نشان دهنده آن است که استفاده از منطق فازی در کنار شبکه عصبی مصنوعی باعث کاهش خطاهای پیش‌بینی فشار به میزان قابل ملاحظه‌ای می‌شود؛ به

طوری‌که با استفاده از مدل نوروفازی تعداد پیش‌بینی‌های فشار با خطای کمتر از ۱۰ درصد به میزان دو برابر افزایش یافته است. اما این مدل در پیش‌بینی فشار با خطای کمتر از ۲۰ درصد تفاوت چندانی با شبکه عصبی چند لایه نداشته و حتی در بعضی موارد خطای بیشتری را نشان داده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مدل نوروفازی در پیش‌بینی فشار در شبکه از قابلیت خوبی برخوردار است.

البته باید توجه داشت که همان‌طور که از طبیعت منطق فازی انتظار می‌رود، با توجه به نتایج به دست آمده، نمودار تغییرات فشار در مدل نوروفازی نتوانسته است حداکثر تغییرات فشار به دست آمده از تحلیل هیدرولیکی را دقیقاً پیش‌بینی نماید؛ اما روند تغییرات فشار در شبکه عصبی چند لایه تطابق بیشتری با نتایج حاصل از مدل هیدرولیکی دارد. لذا با توجه به نوع کاربرد مورد انتظار و دامنه تغییراتی که در نظر گرفته می‌شوند، می‌توان هر یک از مدل‌های فوق را در پیش‌بینی تغییرات فشار به کار برد.

با توجه به انعطاف‌پذیری و امکان اتصال مدل‌های شبکه عصبی، و هم‌چنین دقت آنها در پیش‌بینی فشار در شبکه، می‌توان از نتایج این مقاله برای استفاده در طراحی بهینه شبکه‌های آبرسانی و یا اصلاح شبکه آبرسانی در جهت تأمین آب مطمئن استفاده نمود. از این قابلیت هم‌چنین می‌توان در بهینه‌سازی فشار آب در شبکه در راستای کاهش نشت و یا افزایش اطمینان در تامین نیاز آبی در برابر حوادث غیر منتظره‌ای همچون شکست لوله‌های اصلی در شبکه آبرسانی استفاده نمود.

جدول ۱- مقایسه بین نتایج حالات مختلف شبکه عصبی چند لایه

شماره حالت	تعداد لایه	نوع تابع	بهترین تعداد نرون		RMSE	داده‌های با قدر مطلق خطای نسبی کمتر از :			
			لایه اول	لایه دوم		±۱۰	±۲۰	±۳۰	
۱	۳	tansig	logsig	۱۲	۵	۰/۱۰۹	۲۳/۸	۶۱/۴	۷۷/۹
۲	۲	logsig	-	۱۰	-	۰/۱۲۲	۲۵/۹	۵۸/۹	۷۵/۹

جدول ۲- مقایسه بین نتایج حالات مختلف مدل ANFIS

شماره حالت	نوع روش	تابع عضویت		محدوده نفوذ	RMSE	داده‌های با قدر مطلق خطای نسبی کمتر از: (درصد)		
		نوع	تعداد			±۱۰	±۲۰	±۳۰
۱	جداسازی شبکه‌ای	Gaussmf	۲	-	۰/۰۰۵۷	۵۳/۰	۷۲/۴	۷۸/۹
۲	خوشه‌بندی جزیی	-	-	۰/۶۵	۰/۰۰۵۴	۵۳/۶	۷۳/۱	۸۰/۱

۵- مراجع

- 1-Tabesh, M. Zia, A. (2003). "Dynamic Management of Water Distribution System Networks Based on Hydraulic Performance Analysis of System." *Water Science and Technology*, 3 (1-2), 5-102.
- ۲- تابی، ا. (۱۳۷۸). "ارتباط بین فشار و میزان نشت در شبکه توزیع آب." دومین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۲۵۲-۲۵۵.
- 3- Lambert, A.O., McKenzie, R.D. (2002). "Practical Experience in Using The Infrastructure Index." International Water Data Comparisions Ltd, UK, Global water resources Ltd, Republic of south Africa.
- ۴- اسدیانی یکتا، ا.ح. (۱۳۸۳). "تهیه بسته نرم‌افزاری محاسبه آب به حساب نیامده با استفاده از مدل تحلیل هیدرولیکی و GIS." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- 5- Araujo, L.S., Coelho, S.T., and Ramos, H.M. (2003). "Estimation of Distributed Pressure-Dependent Leakage and Consumer Demand in Water Supply Networks." *advances in water supply management-maksimovic, Butler & Memon (eds), Swets & Zeitlinger, Lisses, ISBN 9058096084.*
- 6- Burrows, R., Mulried, G. and Hayuti, M. (2003). "Introduction of a Fully Dynamic Representation of leakage into Network Modeling Studies EPANET." *advances in water supply management-maksimovic, Butler & Memon, eds., Swets & Zeitlinger, Lisses, ISBN 9058096084.*
- ۷- تابش، م.، گوشه، س.، یزدان‌پناه، م.ج. (۱۳۸۳). "تخمین تقاضای کوتاه مدت آب شهری با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی." چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، شیراز، ۹۹۸-۹۹۱.
- 8-Damas, M.; Salmeron, M.; Ortega, J. (2000). "ANNs and GAs for Predictive Controlling of Water Supply Networks", *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 365-370.
- 9- Geem, Z.W. (2003). "Window-Based Decision Support System for the Water Pipe Condition Assessment using Artificial Neural Network." *World Water and Environmental Resources Congress*, 2027-2032.
- 10- Gibbs, M.S., Morgan, N., Maier, H.R., Dandy, G.C., Holmes, M., and J.B. Nixon. (2002). "Use of Artificial Neural Networks for Modelling Chlorine Residuals in Water Distribution Systems".
- 11-Mounce, S.R.; Day, A.J.; Wood, A.S.; Khan, A.; Widdop, P.D.; Machell, J. (2002). "A neural network approach to burst detection." *Water Science and Technology*, 45 (4-5), 237-246.
- ۱۲- کارآموز، م.، طبری، م.ر.، کراچیان، ر. (۱۳۸۲). "بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در جنوب تهران: کاربرد مدل‌های الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی." اولین کنفرانس سالانه مدیریت منابع آب ایران، تهران.
- 13- Karamouz, M., M.Tabari, M.R., Karachian, R. (2004). "Conjunctive use of surface and ground water resources: Application of genetic algorithms and neural networks." *Conference on Critical transition in water and environmental resource management, Salt Lake city.*
- 14- Karamouz, M., Razavi, S., Araghinejad, SH. (2004). "Application of artificial neural networks in flood estimation." *Proceeding of 4th international conference on decision making in urban & civil engineering, Porto, Portugal.*
- ۱۵- یراقی، پ.، تابش، م. (۱۳۸۰). "آنالیز پویای آب به حساب نیامده در شبکه‌های توزیع آب شهری." سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۴۹۳-۵۰۰.
- ۱۶- تابش، م.، بستانیان، م.ب.، دلاور، م.ر. (۱۳۸۳). "کاربرد مدل تلفیقی GIS و تحلیل هیدرولیکی در محاسبه نشت شبکه‌های توزیع آب شهری." *مجله بین‌المللی علوم مهندسی، دانشگاه علم و صنعت ایران*، ج ۱۵، شماره ۲، ۱۳۳-۱۴۵.
- ۱۷- کارآموز، م.، کراچیان، ر. (۱۳۸۲). "برنامه‌ریزی و مدیریت کیفی سیستم‌های منابع آب." انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- ۱۸- راهنمای نرم‌افزار MATLAB7.0
- 19- McKensie, R.D. (1999). "SANFLOW, User Guide." *south Africa water research commission, WRC report TT 109/99.*