

مقاله پژوهشی

پیش بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند با کاربرد روش های سامانه استنتاج فازی - عصبی، سری های زمانی و رگرسیونی

ابوالفضل ناصری^{۱*}، آینور ناصری^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۴

چکیده

برداشت و بهره برداری مداوم و بی رویه از منابع آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند از سال ۱۳۶۲ موجب افت بیش از ۱۴ متر از سطح آب گردیده است. بنابراین بهره برداری بهینه و پایدار از منابع آب زیرزمینی در این آبخوان یک ضرورت مدیریتی است و لازمه آن الگوبندی کمی مصرف، تحلیل روند بهره برداری و آینده پژوهی وضعیت آن است. این پژوهش با هدف تحلیل و آینده پژوهی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند در دوره آماری ۵۰ ساله با کاربرد روش های سری های زمانی، رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی - عصبی انجام گردید. برای الگوبندی، آزمون و آینده پژوهی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند از روش های متعدد سری های زمانی، دو روش رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی - عصبی استفاده گردید. الگوبندی، آزمون و آینده پژوهی افت سطح آب زیرزمینی برای ۵۰ سال صورت گرفت که ۳۵ سال (از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۷) برای مراحل الگوبندی و آزمون و ۱۵ سال (از ۱۳۹۸ تا ۱۴۱۲) برای آینده پژوهی استفاده گردید. نتایج نشان داد دقیق ترین روش برای تحلیل و آینده پژوهی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند، روش سامانه استنتاج فازی - عصبی بود. در طول ۳۵ سال گذشته سطح آب زیرزمینی بیش از ۱۴ متر و به طور میانگین هر سال حدود ۴۰ سانتی متر افت داشته است. با فرض ادامه یافتن شرایط موجود بهره برداری از منابع آب زیرزمینی، میانگین افت تجمعی سطح آب زیرزمینی، در سال ۱۴۱۲ برابر ۲۰/۰۳ متر خواهد بود. برای صیانت از منابع آب زیرزمینی در منطقه، سناریو و شرایط مختلف صرفه جویی در مصرف آب پیش بینی و پیشنهاد گردید.

واژه های کلیدی: آب های زیرزمینی، آینده پژوهی، استنتاج فازی - عصبی، شبکه عصبی مصنوعی، شمال سهند، منطق فازی

مقدمه

در شمال سهند می باشد. منابع آب زیرزمینی در استان شامل ۳۴۸۰۹ حلقه چاه با تخلیه ۹۰۲ میلیون متر مکعب، ۱۸۹۹ رشته قنات با تخلیه ۲۷۳ میلیون متر مکعب و ۱۹۸۰ دهنه چشمه با تخلیه ۱۳۹ میلیون متر مکعب و در مجموع تخلیه کل سالانه از منابع آب زیرزمینی استان برابر ۱/۳ میلیارد متر مکعب است (بی نام، ۱۳۹۸). بهره برداری بهینه و پایدار از منابع آب زیرزمینی در شمال سهند از اولویت ها و ضروریات مدیریت و برنامه ریزی منابع آب زیرزمینی به شمار می رود. اولین گام برای صیانت از این منابع زیرزمینی، با الگوبندی کمی مصرف، تحلیل روند استفاده و آینده پژوهی وضعیت آب زیرزمینی امکان پذیر است. روش های الگوبندی و آینده پژوهی شامل روش های سری های زمانی، رگرسیون و سامانه استنتاج فازی - عصبی است.

الگوهای داده محور مانند روش های سری های زمانی، رگرسیون و سامانه استنتاج فازی - عصبی در واقع الگوی شبیه سازی شده کمی از تغییرات الگوی واقعی آب های زیرزمینی است. به طور کلی، مدل (الگو) ابزاری برای توجیه و معرفی واقعیت با بیان و تفسیری ساده است. مدل های آب زیرزمینی توجیهی از واقعیت است و اگر به صورت

منابع آب زیرزمینی، یکی از مهم ترین منابع آب در تولید محصولات کشاورزی در کشور به شمار می رود. برداشت بیش از حد مجاز و در برخی مواقع بی رویه، موجب کاهش سطح آب زیرزمینی در بسیاری از نقاط کشور گردیده است (Siadat, 2000). آمار نشان می دهد میزان تخلیه از منابع آب زیرزمینی سطح کشور در ۵۰ سال اخیر از ۱۸/۷ میلیارد متر مکعب (از سال ۱۳۴۸) به بیش از ۶۲ میلیارد متر مکعب افزایش یافته است. منابع آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند یکی از منابع مهم برای تامین آب شهری و آبیاری اراضی کشاورزی

۱- دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران
(* نویسنده مسئول: Email: nasseri_ab@yahoo.com)

روش‌های نوین تحلیل و آینده‌پژوهی پدیده‌های مهندسی توسعه یافته‌اند. یکی از مهم‌ترین انواع این محاسبات نرم، سامانه استنتاج فازی-عصبی است که در سال ۱۹۹۳ توسط یانگ (Yang) بسط یافته است. بررسی‌ها نشان داد گستره تحلیل تغییرات مکانی و یا زمانی سطح آب زیرزمینی و یا آینده‌پژوهی آن با سامانه استنتاج فازی-عصبی وسیع نبوده و مطالعات محدودی در این مورد وجود دارد که در ادامه به چند یافته مرتبط و با اهمیت اشاره می‌گردد. دهقانی و همکاران (Dehghani et al., 2009) با استفاده از سه روش شبکه عصبی مصنوعی، سامانه استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی و زمین آمار، برای درون‌یابی سطح آب زیرزمینی دشت قزوین و خلقی و حسینی (Kholghi and Hosseini, 2009) برای درون‌یابی ضریب انتقال سفره را تحلیل نموده و سامانه استنتاج فازی عصبی را دقیق‌ترین روش اعلام نموده‌اند. خاشعی سیوکی (Khashei-Siuki et al., 2013) الگوهای شبکه عصبی مصنوعی، سامانه استنتاج فازی-عصبی و رگرسیونی را برای برآورد سطح ایستابی آبخوان مورد استفاده قرار داده و اعلام نموده‌اند الگوی شبکه عصبی برای ماه آذر و سامانه فازی-عصبی برای ماه شهریور دقیق‌ترین نتیجه را تولید نموده و نتایج الگوی رگرسیونی در برآورد سطح ایستابی آبخوان همواره کم‌ترین دقت را داشته است.

با توجه به ضرورت الگوبندی کمی مصرف و آینده‌پژوهی روند بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در حاشیه شرقی دریاچه ارومیه و با عنایت به اهمیت صیانت و بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند (در استان آذربایجان شرقی) و نیز بنا به توانمندی و شایستگی روش‌های آینده‌پژوهی رفتار پدیده‌های مهندسی آب از جمله سری‌های زمانی، رگرسیون و سامانه استنتاج فازی-عصبی، اهداف این پژوهش عبارت از الف) تحلیل تغییرات زمانی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند، ب) آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از الگوی مناسب و ج) پیش‌بینی سناریوهای اجرایی برای صرفه جویی در مصرف آب زیرزمینی در منطقه بود.

برتری مشخص پژوهش نسبت به پژوهش‌های مشابه عبارت است از الف) تحلیل زمانی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند، که برای اولین بار صورت می‌گیرد، ب) کاربرد روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیون و سامانه استنتاج فازی-عصبی در الگوبندی و آینده‌پژوهی رفتار سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند و ج) پیشنهاد سناریوهای اجرایی برای صرفه جویی در مصرف آب زیرزمینی در منطقه. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در صیانت از منابع آب زیرزمینی و مدیریت پایدار آن به ویژه در حاشیه دریاچه ارومیه بسیار مفید باشد.

مناسبتی تنظیم شده باشد، می‌تواند به عنوان ابزاری جهت پیش‌بینی‌های لازم برای مدیریت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در نظر گرفته شود (ناصری و ناصری، ۱۳۹۸). برای مطالعه سیستم‌های جریان آب زیرزمینی مدل‌های مختلفی استفاده می‌شود. مجموعه آنها را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم‌بندی نمود. این مدل‌ها شامل مدل مخازن ماسه‌ای، مدل‌های آنالوگ که شامل مدل‌های جریان مایعات لزج و مدل‌های الکتریکی بوده و مدل‌های ریاضی که شامل مدل‌های عددی و تحلیلی می‌باشند. اخیراً انصاری فر و همکاران (۲۰۲۰) برای ارزیابی تغییرات سطح آب زیرزمینی بندر گز در خلیج گرگان از مدل ریاضی در حالت دائمی و غیردائمی استفاده نموده‌اند (Ansarifar et al., 2020). همچنین لاله‌زاری و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از روش عددی تفاضلات محدود سطح آب زیرزمینی در دشت باغ ملک در استان خوزستان را برای یک دوره ۱۲ ساله شبیه‌سازی نموده‌اند (Lalezari et al., 2020).

در سال‌های اخیر روش‌های مختلف سری زمانی برای تحلیل، بررسی روند و آینده‌پژوهی سطح و کیفیت آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته، کارایی و توانمندی آن تا حدود قابل پذیرش مورد تأیید قرار گرفته است (Choubin et al., 2017; Gibrilla et al., 2018; Taweessin et al., 2018; Yang et al., 2017). از سوی دیگر، در سال‌های اخیر پژوهشگران متعدد (Irvine et al., 2015; Vandersteen et al., 2015; Johnson et al., 2012; Adhikary et al., 2012; Rau et al., 2012; Rakhshandehroo and Amiri, 2012; Peterson et al., 2010; Hatch et al., 2010)، مطالعات آب‌های زیرزمینی را با استفاده از سری‌های زمانی تحلیل نموده و یافته‌های موفقیت‌آمیز را گزارش نموده‌اند. بررسی منابع نشان داد کاربرد نسبتاً قدیمی روش‌های سری‌های زمانی برای تحلیل مولفه‌های تغذیه، ذخیره و تخلیه بیلان آب زیرزمینی توسط چاو و کیرلیوتس (Chow and Kareliotis, 1970) صورت گرفته است. سامانی و همکاران (Samani et al., 1994) با تحلیل سری‌های زمانی تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت بهشهر، توانمندی این روش را برای الگوبندی تأیید نموده‌اند. فانگیر (Vangeer, 1996) برای درون‌یابی مکانی تغییرات سطح آب زیرزمینی از الگوهای انتقال باکس جینکس استفاده نموده است. رحمانی و سدهی (۱۳۸۳) برای الگوبندی و پیش‌بینی وضعیت سطح آب زیرزمینی دشت بهار و چیت‌سازان و همکاران (۱۳۸۶) برای دشت شهرکرد و زاهدی و قویدل (۱۳۸۱) برای حوضه آبریز ارومیه از تحلیل سری زمانی استفاده نموده‌اند. سالاس و همکاران (Salas et al., 1980) و سن (Sen, 1998) برای تحلیل مطالعات هیدرولوژی و اقلیمی، مناسبترین الگو را ARIMA معرفی نموده‌اند.

محاسبات نرم و هوشمند با ترکیب روش‌هایی همانند منطق فازی، محاسبات تکاملی و شبکه عصبی در دهه‌های اخیر به عنوان

که در آن: p و q به ترتیب مراتب الگوی اتورگرسیو و میانگین متحرک و n تعداد مشاهدات سری است. ضرایب الگو یعنی ρ و θ با روش حداکثر درستنمایی با استفاده از نرم‌افزار MINITAB به دست آمد. برای انتخاب بهترین الگو از بین الگوهای مختلف، از شاخص‌های خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، خطای میانگین (ME)، خطای خالص میانگین (MAE)، معیارهای آگاهی آکائیک (AIC) و معیار BIC استفاده گردید. هریک از این معیارها به صورت برآورد گردید:

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (GWL1 - GWL2)^2 \right]} \quad (5)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (GWL1 - GWL2). \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |GWL1 - GWL2|. \quad (7)$$

$$AIC = \ln \sigma^2 + \frac{2}{T} (p+q) \quad (8)$$

$$BIC = \ln \sigma^2 + \frac{\ln T}{T} (p+q) \quad (9)$$

$$SBIC = \ln (\hat{\sigma}^2) + k \ln(T)/T \quad (10)$$

که در آن 1 و 2 GWL به ترتیب افت سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده و برآورد شده با الگوی موردنظر است. در این بررسی، σ^2 واریانس داده‌ها است.

ب) روش رگرسیون

برای الگوبندی، آزمون و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی، علاوه بر روش‌های سری‌های زمانی از روش رگرسیون خطی و درجه دوم نیز استفاده گردید. الگوهای خطی و درجه دوم به صورت زیر تعریف گردید:

$$GWL = \alpha + \beta \text{ Year} \quad (11)$$

$$GWL = \alpha + \beta \text{ Year} + \gamma \text{ Year}^2 \quad (12)$$

که در آن GWL سطح آب زیرزمینی و Year سال آبی مورد بررسی است. ضرایب این دو معادله از طریق حل چندین معادله با دو مجهول در معادله خطی و سه مجهول در معادله درجه دوم با استفاده از نرم‌افزار MINITAB به دست آمد. برای تعیین دقت این الگوها در برازش و آینده‌پژوهی داده‌های افت سطح آب زیرزمینی، علاوه بر برخی آماره‌های دقت که در رابطه (۴) تا (۹) یاد شد، از ضریب تبیین (یا تعیین) و به صورت زیر استفاده گردید.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{GWL} - GWL)^2}{\sum_{i=1}^n \hat{GWL}^2} \quad (13)$$

ج) سامانه استنتاج فازی - عصبی

سامانه استنتاج فازی - عصبی از یک سامانه مبتنی بر قاعده‌های منطقی (فازی) و یک شبکه مبتنی بر قابلیت استخراج دانش از

(PACF) استفاده گردید (Brockwell and Davis, 1996; Chatfield, 1996).

تابع خودهمبستگی نمونه در سری‌های افت سطح آب زیرزمینی عبارت از همبستگی بین سری افت سطح آب زیرزمینی با همان سری در تأخیر سال k است. مقدار AC_k از رابطه زیر برآورد گردید (Chatfield, 1996):

$$AC_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (GWL_t - \overline{GWL})(GWL_{t+k} - \overline{GWL})}{\sum_{t=1}^n (GWL_t - \overline{GWL})^2} \quad (1)$$

که در آن AC_k ضریب خودهمبستگی سری افت سطح آب زیرزمینی در تأخیر k ، \overline{GWL} میانگین سری سطح آب زیرزمینی و GWL_t مقدار سری در زمان t و n تعداد مشاهدات سری (برحسب سال آبی) می‌باشد. برای تابع خودهمبستگی جزء، دامنه بحرانی برابر $\pm \frac{1.96}{\sqrt{n}}$ پیشنهاد شده است (Chatfield, 1996). تابع خودهمبستگی جزء (PAC_k یا $PACF$) عبارت است از همبستگی بین سری افت سطح آب زیرزمینی در زمان‌های t و $t+k$ وقتی که وابستگی خطی سری افت سطح آب زیرزمینی در $t+1$ و $t+2$ و $t+k-1$ حذف شده باشد، تابع خودهمبستگی جزء برای تغییرات سطح آب زیرزمینی از رابطه زیر برآورد گردید (نیرومند، ۱۳۷۶):

$$PAC_{kk} = \begin{vmatrix} 1 & AC_1 & \dots & AC_k \\ AC_1 & 1 & \dots & AC_{k-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ AC_{k-1} & AC_{k-2} & \dots & AC_1 \end{vmatrix} \quad (2)$$

به صورت ویژه، ضرایب خودهمبستگی جزء برای تأخیرهای ۱ و ۲ به صورت زیر برآورد می‌گردد.

$$PAC_1 = AC_1 \quad (3)$$

$$PAC_2 = (AC_2 - AC_1^2) / (1 - AC_1^2)$$

نمودار تغییرات ضرایب خودهمبستگی و خودهمبستگی جزء تا تأخیرهای به تعداد یک‌سوم کل مشاهدات با خودهمبستگی نگار و خودهمبستگی جزء نگار نشان داده می‌شود و در آن دامنه بحرانی به صورت خطوط موازی رسم می‌گردد. با عنایت به الگوی نهایی و مناسب این پژوهش، الگوی اتورگرسیو تلفیقی میانگین متحرک $ARIMA(p,d,q)$ به صورت زیر تشریح می‌شود. در ادامه ملاحظه خواهد شد که سایر الگوهای سری زمانی از نظر دقت دارای اولویت نبوده و به همین دلیل در این بخش تشریح نگردید. اطلاعات دقیق در مورد سایر روش‌ها در (Brockwell and Davis, 1996) می‌توان یافت.

$$GWL_t = \rho_1 GWL_{t-1} + \rho_2 GWL_{t-2} + \dots + \rho_p GWL_{t-p} + \theta_1 \text{et} + \theta_2 \text{et} + \dots + \theta_q \text{et} - q \quad (4)$$

$$\mu_{Ai}(x) = \exp \left[- \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right] \right] \quad (18)$$

و در آن: x مقادیر ورودی به گره i و c_i و a_i به ترتیب مراکز و واریانس‌های قابل تنظیم است. لایه گره‌های قاعده: هر گره در این لایه درجه فعالیت یک قانون را از رابطه زیر مشخص می‌کند.

$$O_{2,i} = w_i = \prod_{j=1}^n (\mu_{Aj}(x))_j \quad (19)$$

لایه نورمال شده یا گره استاندارد: خروجی این لایه نورمال شده مقادیر لایه قبلی از رابطه زیر است.

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (20)$$

که در آن: \bar{w}_i درجه فعالیت نورمال شده قانون نام است. لایه نتایج: در این لایه، خروجی هر گره از رابطه زیر برآورد می‌شود.

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i \left(\sum_{j=1}^n p_{ij} x_j \right) \quad \text{for } i=1,2 \quad (21)$$

لایه گره‌های خروجی: در این لایه هر گره، مقدار خروجی نهایی را به صورت زیر محاسبه می‌نماید.

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i \quad \text{for } i=1,2 \quad (22)$$

ترتیب لایه‌ها و معماری کلی الگوی فازی-عصبی برای تحلیل سطح آب زیرزمینی در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مطالعه، با استفاده از رابطه زیر داده‌های ورودی به سامانه استنتاج فازی-عصبی به صورت نورمال درآمدند:

$$X_i = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (23)$$

که در آن x مقدار واقعی، x_{\min} و x_{\max} به ترتیب استاندارد شده مقدار واقعی، مقادیر حداقل و حداکثر داده‌ها می‌باشند. برای تحلیل افت سطح

ایستایی با سامانه استنتاج فازی-عصبی یک مجموعه ورودی و خروجی مناسب در نظر گرفته شدند. متغیرهای ورودی شامل دوره زمانی سنجش سطح آب زیرزمینی از سال آبی ۶۳-۱۳۶۲ تا ۹۷-۱۳۹۶ و متغیرهای خروجی شامل افت سطح آب زیرزمینی هرکدام به تعداد ۳۵ زوج مرتب بودند. داده‌ها با رابطه (۲۰) به صورت نورمال درآمده و وارد سامانه گردید. پس از تصادفی نمودن داده‌های اندازه‌گیری شده، درصد داده‌های لازم برای آموزش، اعتبارسنجی و آزمون به ترتیب برابر ۶۰، ۱۵ و ۲۵ درصد، در نظر گرفته شدند. از توابع مختلف انتقال (تحریک) با قاعده مانتوم و با گام یک و ضریب ۰/۷ استفاده گردید. حداکثر تعداد اپوک برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شدند.

اطلاعات عددی (شبکه عصبی) ترکیب یافته است. در این سامانه، ایجاد رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی به عهده بخش فازی سامانه، و بهینه‌سازی پارامترهای تابع عضویت به عهده بخش عصبی سامانه است. این سامانه از چهار جزء الف) فازی نمودن با توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی، ب) پایگاه قواعد با قوانین فازی، ج) ترکیب قواعد برای استنتاج سازوکارها، و د) غیرفازی نمودن نتایج خروجی سامانه، تشکیل یافته است (Krueger et al., 2011). استنتاج فازی انواع مختلف از جمله ممدانی (Mamdani)، لارسن (Larsen)، تسوکاماتو (Tsukamoto) و تاکاگی-سوگنو-کانگ (Takagi-Sugeno-Kang; TSK) را شامل می‌شود. نوع اخیر پرکاربردترین نوع در سامانه استنتاج فازی-عصبی است (Takagi and Sugeno, 1985). این نوع شامل مجموعه‌ای از قواعد "اگر-آنگاه" است و مرتبه اول این نوع با متغیر ورودی سنجه زمانی اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی x و متغیر خروجی سطح آب زیرزمینی f ، دو قانون شرطی زیر را شامل است: قانون شرطی اول: اگر متغیر ورودی سنجه زمانی اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی (x) برابر A_1 باشد، آنگاه:

$$f_1 = p_1 A_1 + r_1 \quad (14)$$

قانون شرطی دوم: اگر متغیر ورودی سنجه زمانی اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی (x) برابر A_2 باشد، آنگاه:

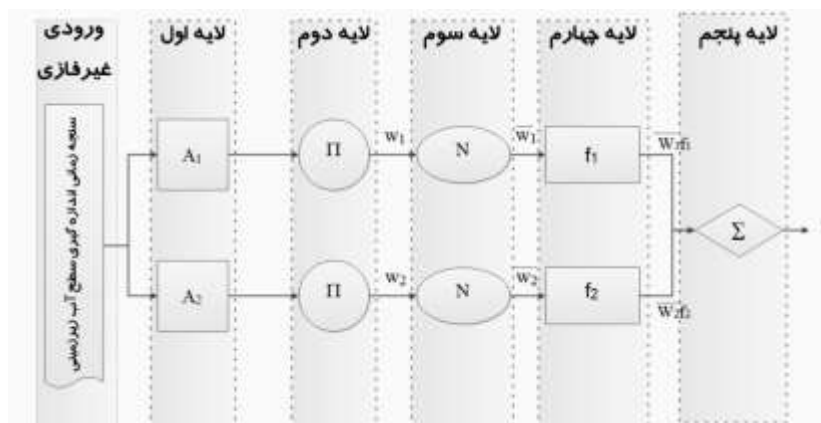
$$f_2 = p_2 A_2 + r_2 \quad (15)$$

که در آن p_1 و p_2 و r_1 و r_2 پارامترهای تابع خروجی هستند. بدون احتساب متغیر ورودی غیرفازی، معماری سامانه استنتاج فازی-عصبی دارای پنج لایه است. در این سامانه با بهره‌گیری از داده‌های آموزشی، پارامترهای توابع عضویت در لایه اول و لایه چهارم به گونه‌ای مشخص می‌شوند که به ازای ورودی دلخواه، خروجی مناسب و شایسته‌ای حاصل گردند. پارامترهای لایه اول و چهارم به ترتیب غیر خطی و خطی هستند. مطابق توصیه پژوهشگران برای آموزش لایه اول از روش پس‌انتشار و در لایه چهارم از روش کمترین مربعات استفاده می‌شود (Jang and Sun, 1997). لایه گره‌های ورودی: در این لایه درجه عضویت گره‌های ورودی به بازه‌های مختلف فازی با استفاده از تابع عضویت مشخص می‌گردد. یعنی:

$$O_{1,i} = \mu_{Ai}(x) \quad \text{for } i=1,2 \quad (16)$$

که در آن: $\mu_{Ai}(x)$ تابع عضویت گوسین بوده و از یکی از رابطه‌های زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mu_{Ai}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad (17)$$



شکل ۲- معماری کلی الگوی فازی-عصبی برای تحلیل سطح آب زیرزمینی

بررسی، سطح تجمعی آب زیرزمینی به جز در پنج مورد از ۳۵ مورد روند کاهشی داشته است. در پنج مورد از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۳ خیزهایی به اندازه ۶۵ سانتی‌متر در سطح آب زیرزمینی اتفاق افتاده است. در طول ۳۵ سال گذشته بیش از ۱۴ متر (حدود ۱۷۰ میلیون مترمکعب) سطح آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند افت داشته است. می‌توان گفت به طور میانگین هر سال حدود ۴۰ سانتی‌متر (معادل پنج میلیون مترمکعب) از سطح آب زیرزمینی در این دشت کاسته می‌شود.

تحلیل تغییرات سطح آب زیرزمینی با الگوهای سری‌های زمانی، رگرسیونی و استنتاج فازی-عصبی

بر اساس سری افت سطح آب زیرزمینی، نمودار تابع خودهمبستگی (ACF) و تابع خودهمبستگی جزء (PACF) تا نه سال تاخیر در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل ضرایب خودهمبستگی و خودهمبستگی جزء به صورت خط‌های عمودی و حدود بالا و پایین همبستگی‌ها به صورت دو خط در راستای محور افقی رسم شده است. روند کاهشی در هر دو ضریب همبستگی به طور واضح قابل مشاهده است. میرایی سریع در نمودار خودهمبستگی جزء مشخص است. تغییرات فصلی در هیچ کدام از نمودارها مشاهده نگردید. نتایج نشان داد توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزء به ترتیب تا سال‌های دوم و اول به ترتیب با ضرایب ۰/۸۱ و ۰/۹۰ معنی‌دار بوده‌اند. بنابراین به عنوان تشخیص اولیه هر دو الگوی اتورگرسیو و میانگین متحرک می‌تواند در الگوبندی افت سطح آب زیرزمینی سهیم باشند. ارزیابی اولیه نشان داد سری افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در طول ۳۵ سال روند ناپیوسته داشت. برای تفکیک روند و ایستاسازی سری داده‌ها از عمل یک‌بار تفاضلی استفاده گردید.

بعد از ارزیابی ضرایب خودهمبستگی و خودهمبستگی جزء، الگوی

ارزیابی عملکرد روش‌های سری‌های زمانی و سامانه استنتاج فازی-عصبی

برای ارزیابی عملکرد الگوهای پیش‌بینی، معیارها و فراسنج‌های مختلفی وجود دارد. این فراسنج‌ها به طور عمده بر مبنای تفاوت بین مقادیر خروجی و پیش‌بینی شده و مقادیر خروجی‌های مطلوب و مقادیر واقعی استوار است. در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد سامانه‌ها از فراسنج‌های میانگین مربعات خطا (MSE) و میانگین قدر مطلق درصد خطا (MAE) و ضریب تبیین (R^2) به صورت‌های زیر استفاده گردید.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{H} - H)^2}{n} \quad (24)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{H} - H)}{n} \quad (25)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{H} - H)^2}{\sum_{i=1}^n \hat{H}^2} \quad (26)$$

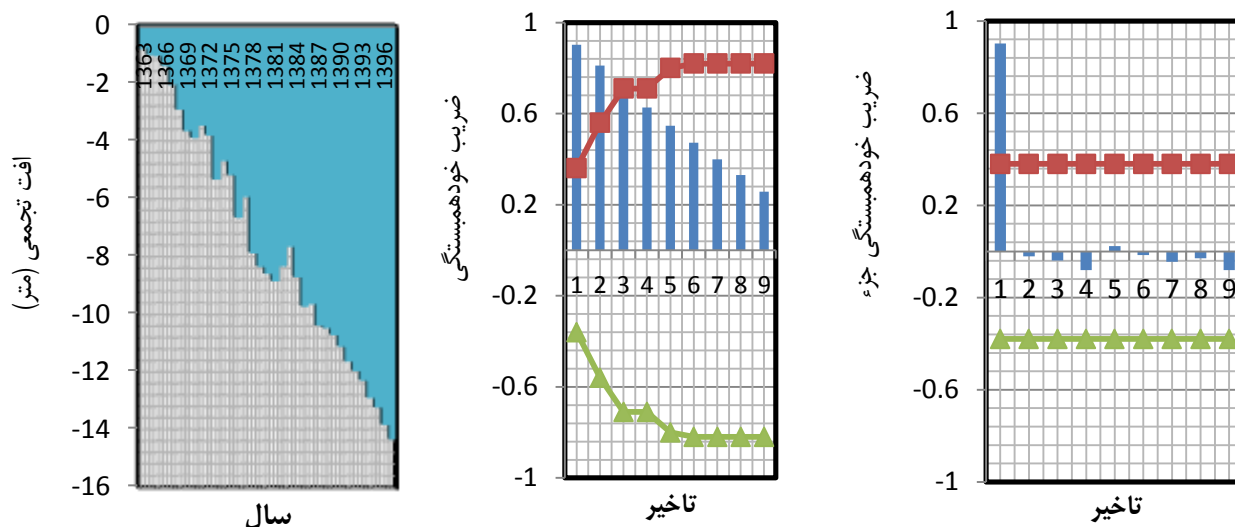
که در آن: \hat{H} ، H و n به ترتیب مقادیر خروجی و ورودی الگوی پیش‌بینی و n تعداد مشاهدات است. برای تحلیل سری‌های زمانی و رگرسیون از نرم افزار MINITAB و برای تحلیل سامانه استنتاج فازی-عصبی از نرم افزار NEUROSOLUTIONS استفاده گردید.

نتایج و بحث

میانگین افت تجمعی سطح آب زیرزمینی از سال آبی ۶۲-۱۳۶۱ تا ۹۷-۱۳۹۶ نسبت به مقادیر سال پایه (سال آبی ۶۲-۱۳۶۱) در شکل ۳ رسم شده است. نتایج نشان داد در طول ۳۵ سال مورد

۱ ارائه شده است. شاخص‌های مختلف برای انتخاب مناسب‌ترین الگو در این جدول ارائه شده است. با در نظر گرفتن همه این شاخص‌ها، الگوی $ARIMA(1,1,1)$ مناسب‌ترین الگو برای تبیین افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند تشخیص داده شد. مقدار معیار آگاهی این الگو برابر $1/20$ بود.

مناسب سری زمانی بر مبنای کمینه بودن آماره‌های خطاسنجی تشخیص و انتخاب می‌گردد. تشخیص اولیه نشان داد سهم هر دو الگوی اتورگرسیو و میانگین متحرک افت تجمعی سطح آب زیرزمینی محرز است. مشخصات الگوهای مختلف سری زمانی قابل انتخاب برای تحلیل تغییرات زمانی افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در جدول



شکل ۳- سری زمانی افت تجمعی (سمت چپ)، ضرایب خودهمبستگی (وسط) و خودهمبستگی جزء (سمت راست) افت تجمعی سطح آب زیرزمینی

جدول ۲- الگوهای ممکن سری زمانی و رگرسیونی برای انتخاب مناسب‌ترین الگوی افت سطح آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند

SBIC	AIC	ME	MAE	RMSE	روش‌های الگوبندی	ردیف
الگوهای سری‌های زمانی						
-۰/۵۴	-۰/۵۸	-۰/۴۰	۰/۵۹	۰/۷۳	گام تصادفی	۱
-۰/۷۸	-۰/۸۷	۰/۰۰	۰/۴۴	۰/۶۱	گام تصادفی با ضریب $-۰/۴۰$	۲
۳/۰۳	۲/۹۴	۰/۰۰	۳/۴۶	۴/۱۱	میانگین ثابت برابر $-۷/۴۵$	۳
-۰/۰۸	-۰/۱۷	-۰/۶۰	۰/۷۰	۰/۸۷	میانگین متحرک ساده دوجزئی	۴
-۰/۴۴	-۰/۵۳	-۰/۳۹	۰/۵۷	۰/۷۳	هموارسازی نمایی ساده	۵
-۰/۵۹	-۰/۶۸	-۰/۱۰	۰/۵۲	۰/۶۷	هموارسازی نمایی خطی براون	۶
-۰/۷۷	-۰/۹۰	۰/۰۸	۰/۴۴	۰/۵۹	هموارسازی نمایی خطی حالت	۷
-۰/۵۰	-۰/۵۹	۰/۰۰	۰/۵۴	۰/۷۰	هموارسازی نمایی کوادراتیک براون	۸
-۰/۴۹	-۰/۶۲	-۰/۱۳	۰/۴۷	۰/۶۷	هموارسازی نمایی وینتر	۹
-۱/۰۶	-۱/۲۰	-۰/۰۳	۰/۳۷	۰/۵۰	$ARIMA(1,1,1)$	۱۰
-۱/۰۶	-۱/۱۵	-۰/۰۲	۰/۳۶	۰/۵۰	$ARIMA(0,1,2)$	۱۱
-۰/۹۵	-۱/۱۲	-۰/۰۳	۰/۳۵	۰/۵۱	$ARIMA(1,1,2)$	۱۲
-۰/۸۷	-۱/۰۹	-۰/۰۳	۰/۳۴	۰/۵۰	$ARIMA(2,1,2)$	۱۳
-۰/۹۰	-۱/۱۸	-۰/۰۷	۰/۳۷	۰/۵۲	$ARIMA(2,1,1)$	۱۴
الگوهای رگرسیونی						
-۰/۸۸	-۱/۰۲	۰/۰۰	۰/۴۲	۰/۵۵	برازش خطی	۱۵
-۰/۸۳	-۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۴۲	۰/۵۴	برازش درجه دوم	۱۶

۱ فرآیند اغتشاش در دو زمان متوالی می‌باشد. آماره ارزیابی و آزمون ضرایب الگوی حاصل در جدول ۳ نشان داده شده است. ضریب اتورگرسیو و میانگین متحرک الگو در سطح کمتر از پنج درصد معنی‌دار بود.

بنابراین الگوی انتخاب شده $ARIMA(1,1,1)$ برای تبیین سری زمانی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند از نوع اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق شده و به صورت زیر به دست آمد:

$$GWL_t = 0.225 + 0.446 GWL_{t-1} + a_t - 1.05 a_{t-1} \quad (24)$$

که در آن GWL_t افت سطح آب زیرزمینی در زمان مشخص t و GWL_{t-1} افت سطح آب زیرزمینی در زمان ماقبل است. متغیر a_t و a_{t-1}

جدول ۳- مقادیر و سطح احتمال معنی‌داری ضریب الگوی سری زمانی اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق شده $ARIMA$

نوع الگو	ضریب	خطای استاندارد	نسبت آماره t	مقدار p
AR1	۰/۴۴۶	۰/۱۸	۲/۵	۰/۰۲
MA1	۱/۰۵۴	۰/۰۳	۳۹/۱	۰/۰۰
ثابت الگو	-۰/۲۲۵			

تغذیه سطح آب زیرزمینی باشد (رحیمی و غیره، ۱۳۸۹). دلیل این تشابه از آنجا ناشی می‌شود که داده‌های سری افت سطح آب زیرزمینی دارای ضریب خودهمبستگی معنی‌داری بوده و مقادیر سری در یک سال مشخص به مقادیر سری در سال ماقبل خود وابسته و همبسته بود. همین ویژگی است که سهم الگوی اتورگرسیو را برجسته می‌نماید. همچنین همبستگی جزئی سری دارای مقادیری معنی‌دار بود و سهم میانگین متحرک الگو نیز برجسته بود. بنابراین الگوی زمانی برازش شده به افت سطح آب زیرزمینی نیز با این یافته سازگار تشخیص داده شد. بنابراین الگوی انتخاب شده برای بیان سری زمانی افت سطح آب زیرزمینی از نوع اتورگرسیو میانگین متحرک $ARIMA(1,1,1)$ و به صورت $ARIMA(1,1,1)$ با مشخصات جدول ۳ تنظیم شد.

برای الگوبندی تغییرات سطح آب زیرزمینی با سامانه استنتاج فازی-عصبی، متغیرها به صورت فازی وارد شبکه شدند. برای فازی نمودن متغیرهای ورودی از هر دو تابع عضویت گوسی و زنگوله‌ای استفاده گردید. نتایج استفاده از این توابع در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد در شرایط استفاده هم‌زمان از تابع عضویت، الگوی فازی و تابع انتقال و با نظر داشت فراسنج‌های ارزیابی عملکرد الگوها، ردیف شماره ۲ از جدول ۴ با تابع عضویت گوسی، الگوی فازی تاکاگی-سوگونو، تابع انتقال آکسون، میانگین مربعات خطا (MAE) برابر با ۰/۰۰۱، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) برابر با ۰/۰۰۳ و ضریب تبیین (R^2) برابر ۰/۹۹ به عنوان مناسب‌ترین الگوی سامانه استنتاج فازی-عصبی انتخاب گردید. مقادیر اندازه‌گیری شده سطح آب زیرزمینی و برآورد شده با سامانه استنتاج فازی-عصبی در شکل ۴ نشان داده شده است.

برای تحلیل تغییرات زمانی سطح آب زیرزمینی از الگوهای رگرسیونی نیز استفاده گردید. نتایج دو الگوی منتخب بر مبنای آماره‌های خطاسنجی در جدول ۲ ارائه شده است. از بین دو الگوی منتخب، الگوی برازش خطی به دلیل داشتن کم‌ترین مقدار معیار آگاهی آکائیک و نیز سهولت کاربرد برای تحلیل افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند انتخاب گردید. الگوی خطی حاصل به صورت زیر بود:

$$GWL = -0.386 - 0.392 \text{ Year} \quad (25)$$

که در آن GWL افت سطح آب زیرزمینی و Year سال مورد ارزیابی می‌باشد. یادآوری می‌نماید از مجموع ۵۰ سال دوره آماری افت سطح آب زیرزمینی، بخشی از داده‌ها برای الگوبندی، بخشی برای آزمون و بخشی نیز برای آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی استفاده گردید. مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده افت تجمعی سطح آب زیرزمینی با الگوی اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق شده، با الگوی رگرسیونی و استنتاج فازی-عصبی در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود بیش از ۹۶ درصد از تغییرات افت تجمعی سطح آب زیرزمینی با الگوهای یاد شده قابل تبیین است. بنابراین الگوهای به‌دست‌آمده به‌طور رضایت‌بخشی داده‌های افت سطح آب زیرزمینی در این دامنه شمالی سهند را برازش نموده است. از بین روش‌های منتخب، ترتیب دقت هر یک از روش‌ها در الگوبندی افت تجمعی سطح آب زیرزمینی به صورت استنتاج فازی-عصبی، الگوی رگرسیونی و با الگوی اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق شده بود. در پژوهش‌های پیشین، سن (Sen, 1988) و سالاس (Salas et al., 1980) روش الگوبندی $ARIMA$ را معتبرترین روش برای الگوبندی زمانی رفتارهای پدیده‌های هیدرولوژیک و پدیده‌های وابسته به اقلیم معرفی نموده‌اند. به نظر می‌رسد رفتار سری‌های افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در دامنه شمال سهند مشابه رفتار مولفه‌های تخلیه و

جدول ۴- تابع عضویت، الگوی فازی، تابع انتقال و دقت سناریوهای مختلف الگوبندی تغییرات سطح آب زیرزمینی

ردیف	تابع عضویت	الگوی فازی	تابع انتقال	میانگین مربعات خطا (MSE)	میانگین قدرمطلق درصد خطا (MAE)	ضریب تبیین (R ²)
۱	زنگوله‌ای	ناکاگی - سوگنو	آکسون	۰/۰۰۶	۰/۰۶۳	۰/۹۵
۲	گوسی	ناکاگی - سوگنو	آکسون	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۹۹
۳	گوسی	تسوکاموتو	آکسون	۰/۰۸۳	۰/۱۷۵	۰/۳۸
۴	زنگوله‌ای	تسوکاموتو	آکسون	۰/۰۵۷	۰/۱۷۰	۰/۹۰
۵	گوسی	ناکاگی - سوگنو	سیگموئید	۰/۰۱۹	۰/۱۱۰	۰/۸۷
۶	گوسی	ناکاگی - سوگنو	تانژانت هیپربولیک آکسون	۰/۰۱۲	۰/۰۹۲	۰/۸۹
۷	گوسی	ناکاگی - سوگنو	آکسون	۰/۰۰۳	۰/۰۴۰	۰/۹۷
۸	گوسی	ناکاگی - سوگنو	آکسون	۰/۰۰۹	۰/۰۷۸	۰/۹۳
۹	گوسی	ناکاگی - سوگنو	آکسون	۰/۰۰۲	۰/۰۳۱	۰/۹۶
۱۰	گوسی	ناکاگی - سوگنو	آکسون	۰/۱۶۷	۰/۳۳۰	۰/۸۴

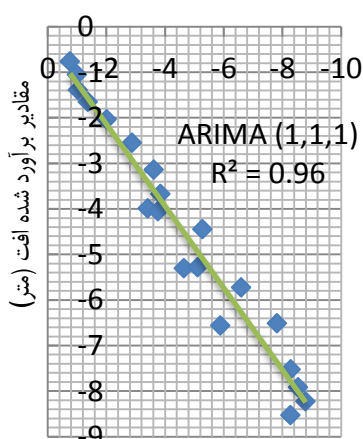
عصبی معنی‌دار نبود.

آزمون الگوهای سری‌های زمانی، رگرسیونی و استنتاج فازی-عصبی

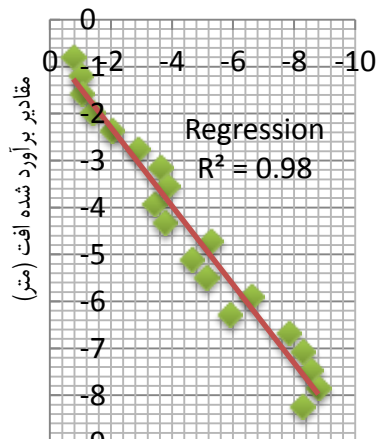
عصبی

پس از مرحله الگوبندی داده‌ها بر مبنای آمار ۲۰ سال، آزمون الگوهای سری‌های زمانی، رگرسیونی و استنتاج فازی-عصبی با داده‌های واقعی ۱۵ سال دیگر صورت گرفت. نتایج مقایسه افت سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده و برآورد شده نشان داد الگوی حاصل از برازش، نتایج رضایت‌بخش و قابل قبولی دارد (شکل ۵).

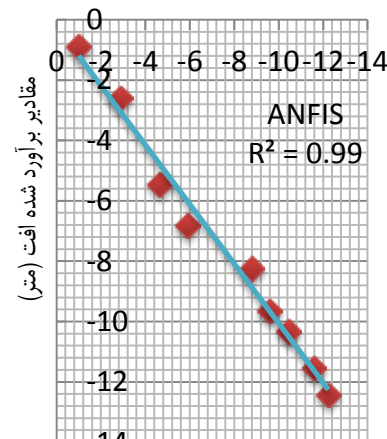
پس از شناسائی الگوها و برآورد پارامترها، لازم است درستی تشخیص الگوها بررسی شود. با توجه به این که سری باقیمانده‌ها نتیجه برآورد پارامترهای الگو است. بنابراین بررسی درستی تشخیص الگو با تحلیل سری باقیمانده‌ها صورت گرفت. تغییرات باقیمانده‌ها روند خاصی نداشت. بنابراین می‌توان گفت تغییرات باقیمانده‌ها تصادفی بوده و الگوی استنتاج فازی-عصبی با کمترین ضریب تعیین (۰/۰۱)، نسبت به الگوهای اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق شده (با ضریب تعیین برابر با ۰/۱۱) و الگوی رگرسیونی (با ضریب تعیین برابر با ۰/۳۱) دقیق‌تر بود. چون روند باقیمانده الگوی استنتاج فازی-



مقادیر اندازه‌گیری شده افت (متر)

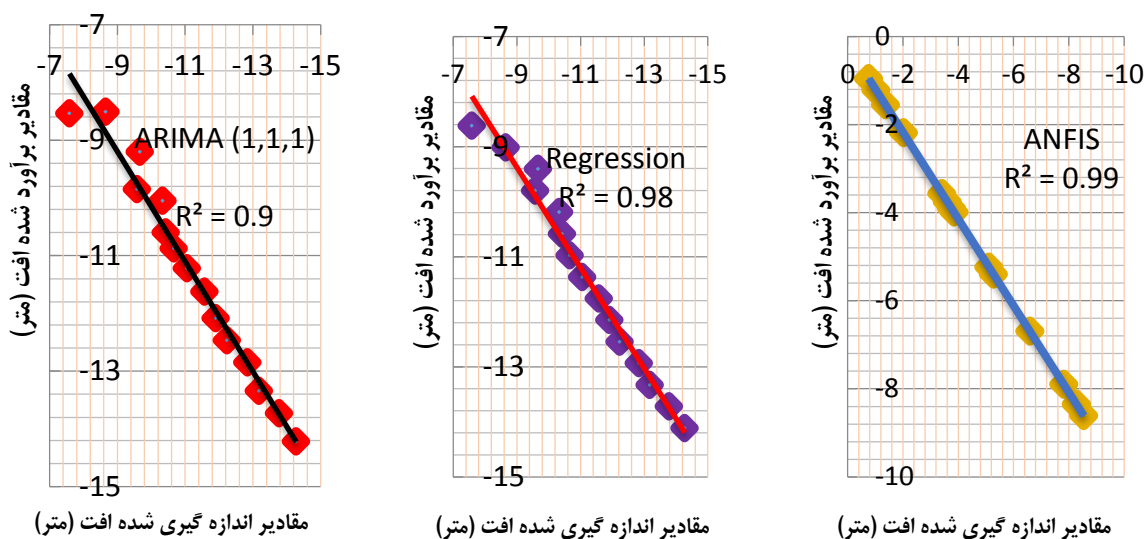


مقادیر اندازه‌گیری شده افت (متر)



مقادیر اندازه‌گیری شده افت (متر)

شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در مرحله الگوبندی با الگوی اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق شده (سمت چپ)، الگوی رگرسیونی (وسط) و استنتاج فازی-عصبی (سمت راست)



شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در مرحله آزمون با الگوی اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق شده (سمت چپ)، الگوی رگرسیونی (وسط) و استنتاج فازی-عصبی (سمت راست)

آب زیرزمینی در این منطقه کاسته می‌شود. مشاهده می‌شود نتایج آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی روش‌های سری‌های زمانی و رگرسیونی بسیار شبیه هم هستند. با توجه به فرآیند الگوسازی، آزمون و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی می‌توان گفت یافته‌های حاصل از روش استنتاج فازی-عصبی نسبتاً دقیق‌تر از سایر روش‌ها بود.

آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی با روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی-عصبی

مرحله آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی برای ۱۵ سال از سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ تا سال آبی ۱۲-۱۴۱۱ صورت گرفت (شکل ۶). این مرحله پس از مرحله الگوبندی داده‌ها و آزمون الگوها بود. مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی-عصبی نشان داد برای سال‌های آینده، روند افت سالانه سطح آب زیرزمینی به صورت افزایشی خواهد بود (شکل ۶).

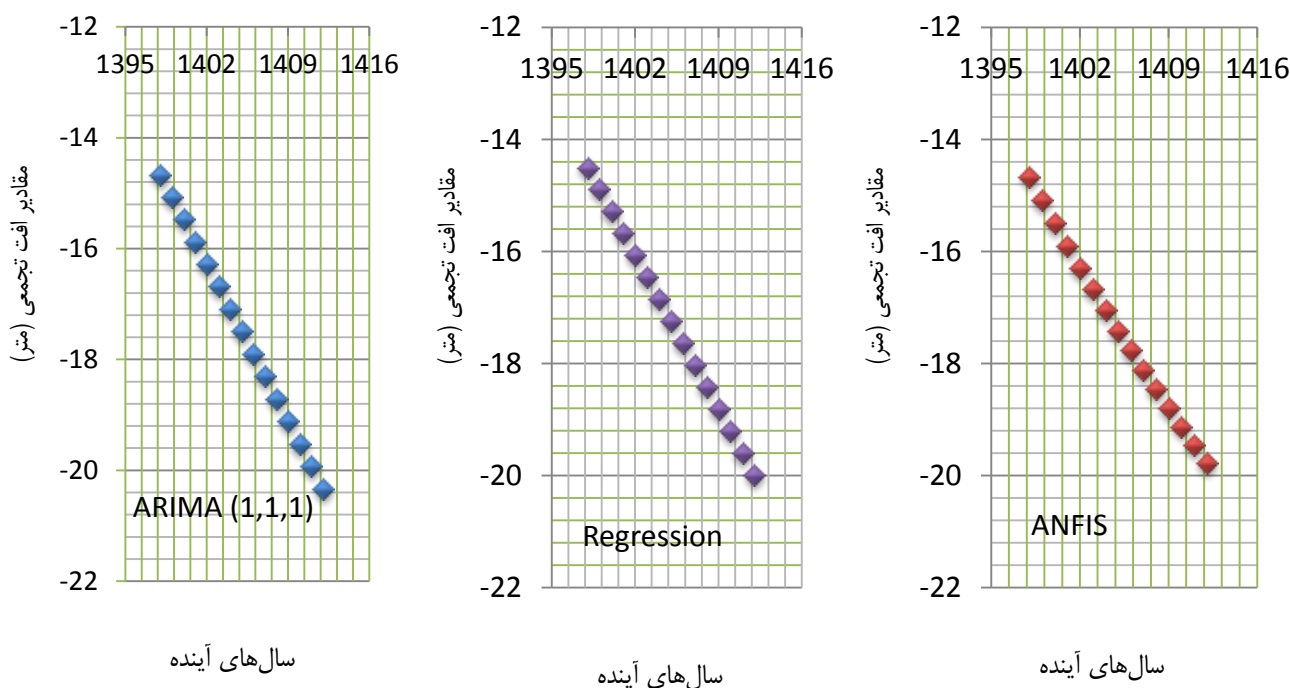
با فرض ادامه یافتن شرایط موجود بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند، برای انتهای سال پیش‌بینی ۱۴۱۲، میانگین افت سطح آب زیرزمینی با روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی-عصبی به ترتیب برابر ۲۰/۳۳، ۱۹/۷۸ و ۱۹/۹۹ متر و به طور میانگین برابر ۲۰/۰۳ متر معادل ۲۴۲/۸ میلیون متر مکعب خواهد بود.

تحلیل تفاوت روش‌ها در آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی

برای بررسی تفاوت روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی-عصبی در آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی، از تحلیل واریانس استفاده گردید. نتایج نشان داد تفاوت روش‌ها در آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی در سطح احتمال کمتر از یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین افت سالانه سطح آب زمینی در دامنه شمالی سهند نشان داد با روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی-عصبی به ترتیب ۴۱ (معادل ۴/۹۷ میلیون متر مکعب)، ۳۹ (معادل ۴/۷۳ میلیون متر مکعب) و ۳۶ (معادل ۴/۳۶ میلیون متر مکعب) سانتی‌متر از سطح

جدول ۵- تحلیل واریانس روش‌ها در آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	نسبت F	مقدار P
بین روش‌ها	۰/۰۱۱	۲	۰/۰۰۵۵	۱۵/۹۴	نزدیک صفر
درون روش‌ها	۰/۰۱۳	۳۹	۰/۰۰۰۳		
کل	۰/۰۲۴	۴۱			



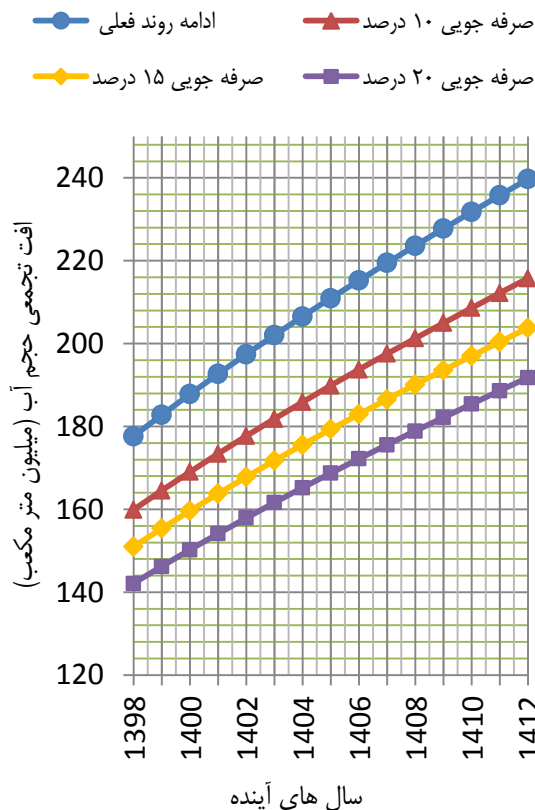
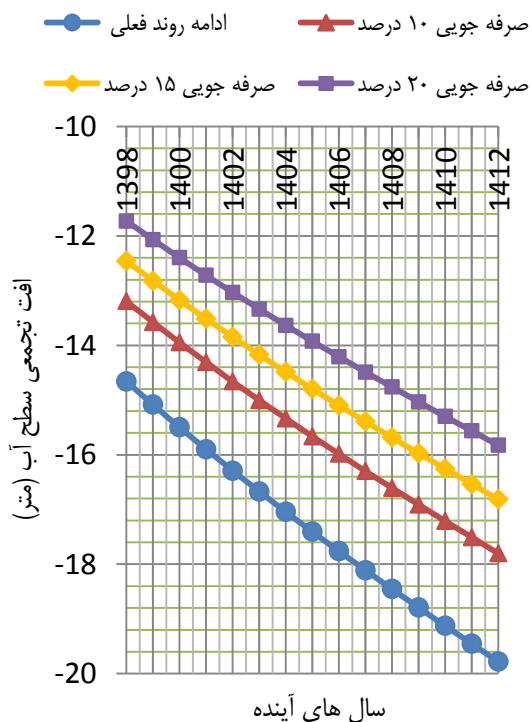
شکل ۶- مقادیر افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در مرحله آینده پژوهی با الگوی اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق شده (سمت چپ)، الگوی رگرسیونی (وسط) و استنتاج فازی- عصبی (سمت راست) برای دوره ۹۸-۱۳۹۷ تا ۱۲-۱۴۱۱

از منابع آب زیرزمینی در دامنه شمال سهند، افت تجمعی سطح آب در انتهای سال آینده پژوهی (۱۴۱۲) برابر ۱۹/۷۸- متر خواهد بود. تغییرات کاهش حجم آب زیرزمینی در سناریوی ادامه روند بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی (بدون برنامه صرفه‌جویی) از سال ۱۳۹۸ تا سال ۱۴۱۲ از ۱۷۸ تا ۲۴۰ میلیون مترمکعب، تغییرات در سناریوی اعمال برنامه صرفه‌جویی به اندازه ۱۰ درصد، از ۱۶۰ تا ۲۱۶ میلیون مترمکعب، تغییرات در سناریوی اعمال برنامه صرفه‌جویی به اندازه ۱۵ درصد، از ۱۵۱ تا ۲۰۴ میلیون مترمکعب و تغییرات در سناریوی اعمال برنامه صرفه‌جویی به اندازه ۲۰ درصد، از ۱۴۲ تا ۱۹۲ میلیون مترمکعب خواهد بود (شکل ۷). برای استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند راهکارهای اساسی شامل افزایش میزان تغذیه یا کاهش میزان تخلیه از منابع آب زیرزمینی است. راهکارهایی عمومی ذیل برای صیانت از آب‌های زیرزمینی در این منطقه پیشنهاد می‌شود. بدیهی است جزییات و ویژگی‌های هریک از این راهکارها، نیازمند بررسی‌های امکان‌سنجی و کارشناسی دقیق است. الف) صرفه‌جویی در مصرف آب برای تولید بهینه محصولات کشاورزی، ب) استفاده از روش‌های بهبود کارایی آبیاری، ج) افزایش نفوذ از بارش یا جریان‌های سطحی یا آب آبیاری، د) استفاده از فناوری‌های نوین برای بهبود شاخص بهره‌وری مصرف آب آبیاری، ه)

در پژوهش‌های پیشین دهقانی و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از سه روش شبکه عصبی مصنوعی، سامانه استنتاجی فازی- عصبی و زمین آمار، درون‌یابی سطح آب زیرزمینی دشت قزوین را مقایسه نموده و سامانه استنتاج فازی عصبی با حداکثر ضریب همبستگی و حداقل میانگین مربعات خطا، دقیق‌تر از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و زمین آمار گزارش نموده‌اند. این سه روش را خلقی و حسینی (۲۰۰۹) برای درون‌یابی ضریب انتقال سفره به کار برده و سامانه استنتاج فازی عصبی را دقیق‌ترین روش اعلام نموده‌اند. برای صیانت از منابع آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند، سناریو و شرایط مختلف صرفه‌جویی در مصرف آب از این منابع برمبنای روش استنتاج فازی- عصبی (به عنوان دقیق‌ترین روش) پیش‌بینی گردید. سناریوها شامل ادامه روند بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی (بدون برنامه صرفه‌جویی)، برنامه صرفه‌جویی در مصرف آب از منابع آب زیرزمینی با سه شرایط ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد صرفه‌جویی با شروع از سال ۱۳۹۸ خواهد بود که در آن صورت تغییرات سطح آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند به صورت شکل ۷ است. در صورت اعمال برنامه صرفه‌جویی به اندازه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد، افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در سال ۱۴۱۲ به ترتیب برابر ۱۷/۸۰-، ۱۶/۸۱-، ۱۵/۸۲- متر خواهد بود. در صورتی که با ادامه روند کنونی بهره‌برداری

دانش بومی، شرایط اقلیمی، اقتصاد کشاورزی و استعداد اراضی کشاورزی و ملاحظات پایداری کشاورزی، ک) شناسایی چاه‌های کم بازده و برنامه‌ریزی برای استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی، ل) مطالعه، بررسی و اجرای طرح‌های مناسب آب‌خیزداری، م) مطالعه، بررسی و اجرای طرح‌های مناسب پخش سیلاب و تغذیه مصنوعی، ن) امکان‌سنجی تلفیق یا تجمیع چاه‌ها و انتقال آب آن‌ها با لوله‌های مناسب

توسعه و ارتقاء مشارکت کشاورزان و بهره‌برداران در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، و) یکپارچه‌سازی اراضی کشاورزی با هدف کاهش قطعات کوچک زراعی و افزایش شاخص‌های عملکرد آبیاری، ز) تسطیح اراضی زراعی به ویژه در اراضی بزرگ و یک‌پارچه، ح) اطلاع‌رسانی عمومی و فرهنگ‌سازی لازم برای استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی، ط) آگاه‌سازی عمومی از شرایط بحرانی منابع آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند، ی) اصلاح الگوی کشت متناسب با



شکل ۷- تغییرات سطح و حجم آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند در سال‌های آینده و تأثیر سناریوهای صرفه‌جویی در بهره‌برداری از منابع آب

نتیجه‌گیری

به صورت افزایشی خواهد بود. با فرض ادامه یافتن شرایط موجود بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند، میانگین افت سطح آب زیرزمینی، در سال ۱۴۱۲ به طور میانگین برابر ۲۰/۰۳ متر و معادل ۲۴۲/۸ میلیون متر مکعب خواهد بود. برای صیانت از منابع آب زیرزمینی در منطقه، سناریو و شرایط مختلف صرفه‌جویی در مصرف آب پیش‌بینی گردید. به عنوان مثال در سناریوی اعمال برنامه صرفه‌جویی به اندازه ۱۰ درصد، تغییرات کاهش حجم آب زیرزمینی از سال ۱۳۹۸ تا سال ۱۴۱۲ از ۱۶۰ تا ۲۱۶ میلیون مترمکعب خواهد بود. با توجه به وسعت آبخوان، اعمال سناریوهای پیشنهادی برای صرفه‌جویی در مصرف آب زیرزمینی می‌تواند در صیانت از منابع آب

این پژوهش با هدف تحلیل و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند در دوره آماری ۵۰ ساله با کاربرد روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی-عصبی انجام گردید. دقیق‌ترین روش برای تحلیل و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند، روش سامانه استنتاج فازی-عصبی بود. نتایج نشان داد در طول ۳۵ سال گذشته سطح آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند بیش از ۱۴ متر (حدود ۱۷۰ میلیون مترمکعب) و به طور میانگین هر سال حدود ۴۰ سانتی‌متر افت داشته است. برای ۱۵ سال آینده، روند افت سالانه سطح آب زیرزمینی

analysis. *International Journal of Applied Science and Engineering Research* 1(2): 238-249

Ansarifar, M.M., Salarijazi, M., Ghorbani, K., and Kaboli, A.R. 2020. Simulation of groundwater level in a coastal aquifer. *Marine Georesources & Geotechnology* 38(3): 257-265.

Brockwell, P.J., and Davis, R.A. 1996. Introduction to time series and forecasting. Springer-Verlag, New York, Inc. p.449

Chatfield, C. 1996. The analysis of time series: an introduction. CRC press; p.205.

Choubin, B., and Malekian, A. 2017. Combined gamma and M-test-based ANN and ARIMA models for groundwater fluctuation forecasting in semiarid regions. *Environmental Earth Sciences* 76(15), p.538.

Chow, V.T., and Karelitis, S.J. 1970. Analysis of stochastic hydrologic systems. *Water Resources Research* 16: 1569-1582.

Dehghani, A.A., Asgari, M., and Mosaedi, A. 2009. Comparison of geostatistics, artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system approaches in groundwater level interpolation (case study: Ghazvin aquifer). *J. Agric. Sci. Natur.* 16: 517-536

Gibrilla, A.G., Anornu, G., and Adomako, D. 2018. Trend analysis and ARIMA modeling of recent groundwater levels in the White Volta River basin of Ghana. *Groundwater for Sustainable Development* 6:150-163.

Hatch, C.E., Fisher, A.T., Ruehl, C.R., and Stemler, G. 2010. Spatial and temporal variations in streambed hydraulic conductivity quantified with time-series thermal methods. *Journal of Hydrology* 389(3-4):276-288.

Irvine, D.J., Cranswick, R.H., Simmons, C.T., Shanafield, M.A., and Lautz, L.K. 2015. The effect of streambed heterogeneity on groundwater-surface water exchange fluxes inferred from temperature time series. *Water Resources Research* 51(1): 198-212.

Jang, J.S.R., and Sun, C.T. 1997. Neuro-fuzzy modeling and control, proceeding of the IEEE. 83(3):378-406.

Johnson, T.C., Slater, L.D., Ntarlagiannis, D., Day-Lewis, F.D., and Elwaseif, M. 2012. Monitoring groundwater-surface water interaction using time-series and time-frequency analysis of transient three-dimensional electrical resistivity changes. *Water Resources Research* 48(7).

Khashei-Siuki, A., Ghahraman, B., and Kouchakzadeh, M. 2013. Comparison of ANN, Anfis and regression models to estimate groundwater level of Neyshaboor aquifer. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 1(7):10-22

منطقه، بسیار مفید باشد. برای استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند راهکارهای اساسی شامل افزایش میزان تغذیه یا کاهش میزان تخلیه از منابع آب زیرزمینی است. راهکارهایی عمومی با قابلیت اجرایی برای صیانت از آب‌های زیرزمینی در این منطقه پیشنهاد گردید. ادامه پژوهش با تحلیل تغییرات کیفی و آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند برای تکمیل پژوهش حاضر مفید به نظر می‌رسد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی به خاطر تهیه امکانات و اعتبارات لازم برای اجرای این پژوهش، سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

بی‌نام، ۱۳۹۸. بررسی وضعیت منابع آب زیرزمینی کشور تا پایان سال آبی ۹۷-۱۳۹۶. شرکت مدیریت منابع آب ایران، معاونت مطالعات پایه و مدیریت حوضه‌های آبریز، وزارت نیرو. ایران

چیت‌سازان، م.، میرزائی، س.ی. و چینی‌پرداز، ر. ۱۳۸۶. منطقه‌بندی آبخوان شهرکرد با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی. *مجله علوم. دانشگاه شهید چمران اهواز. قسمت ب.* ۱ - ۱۵.

رحمانی، ع. ر.، و سدهی، م. ۱۳۸۳. پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت همدان - بهار با الگو سری‌های زمانی. *مجله آب و فاضلاب.* جلد ۱۵ شماره ۳: ۴۲ - ۴۹.

رحیمی، د.، و غیور، ح. ۱۳۸۹. تحلیل دبی رودخانه کارون با تبدیل باکس-کاکس و سری‌های زمانی. *مجله تحقیقات جغرافیایی، جلد ۲۵، شماره ۴.* ۱۳۵ - ۱۵۱.

زاهدی، م.، و قویدل رحیمی، ی. ۱۳۸۱. شناخت، طبقه‌بندی و پیش‌بینی خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از مدل سری زمانی هالت-وینترز. *فضای جغرافیایی.* جلد ۶، ۱۹ - ۴۸.

ناصری، ا.، و ناصری، آ. ۱۳۹۸. مصرف بهینه منابع آب زیرزمینی در حاشیه شمالی دریاچه ارومیه. انتشارات آرنا. ۶۴ ص.

نیرومند، ح. ۱۳۷۶. تحلیل سری‌های زمانی، روش‌های یک متغیری و چند متغیری (ترجمه). دانشگاه فردوسی مشهد.

Adhikary, S.K., Rahman, M., and Gupta, A.D. 2012. A stochastic modeling technique for predicting groundwater table fluctuations with time series

- Science 1994; IRI. 5 (1& 2): 49-58.
- Sen, Z. 1998. Small sample estimation of the time average in climate time series. *International Journal of Climatology* 18: 1725-1732.
- Siadat, H. 2000. Iranian agriculture and salinity. Soil and Water Research Institute of Iran, Tehran, Iran, p.103.
- Takagi, T., and Sugeno, M. 1985. Fuzzy identification of system and its applications to modeling and control *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern* 15(1):116-132.
- Taweessin, K., Seeboonruang, U., and Saraphirom, P. 2018. The Influence of Climate Variability Effects on Groundwater Time Series in the Lower Central Plains of Thailand. *Water* 10(3), p.290.
- Vandersteen, G., Schneidewind, U., Anibas, C., Schmidt, C., Seuntjens, P., and Batelaan, O. 2015. Determining groundwater-surface water exchange from temperature-time series: Combining a local polynomial method with a maximum likelihood estimator. *Water Resources Research* 51(2): 922-939.
- Vangeer, F.C. 1996. An estimation of Box Jenkins transfer noise models for spatial interpolation of ground water head series: *Journal of Hydrology* 192: 65-80.
- Yang, Q., Wang, Y., Zhang, J., and Delgado, J. 2017. A comparative study of shallow groundwater level simulation with three time series models in a coastal aquifer of South China. *Applied Water Science* 7(2): 689-698.
- Kholghi, M., and Hosseini, S.M. 2009. Comparison of groundwater level estimation using neuro-fuzzy and ordinary kriging. *Journal of Environmental Modeling and Assessment* 14(6):729-753.
- Krueger, E., Prior, S.A., Kurtener, D., Rogers, H.H., and Runion, G.B. 2011. Characterizing root distribution with adaptive neuro-fuzzy analysis. *International Agrophysics* 25: 93-96.
- Lalehzari, R., Boroomand Nasab, S., Moazed, H., Haghghi, A., and Yaghoobzadeh, M. 2020. Simulation-optimization modeling for water resources management using NSGAI-OIP and MODFLOW. *Irrigation and Drainage* 69(3): 317-332.
- Peterson, R.N., Santos, I.R., and Burnett, W.C. 2010. Evaluating groundwater discharge to tidal rivers based on a Rn-222 time-series approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 86(2):165-178.
- Rakhshandehroo, G.R., and Amiri, S.M. 2012. Evaluating fractal behavior in groundwater level fluctuations time series. *Journal of hydrology* 464:550-556.
- Rau, G.C., Andersen, M.S., and Acworth, R.I. 2012. Experimental investigation of the thermal time-series method for surface water-groundwater interactions. *Water Resources Research* 48(3).
- Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V.M., and Lane, W.L. 1980. Applied modeling of hydrologic time series. *Water Resources publications*. Littleton. Colorado, p.484.
- Samani, N., Raeissi, E., and Soltani, A. 1994. Modeling the stochastic behavior of the Fars River. *J.*

Prediction of Variations of Groundwater Levels for the North of Sahand with Neural-Fuzzy Inference System, Time Series and Regression

A. Nasseri^{1*}, A. Nasseri²

Received: Jul.21, 2020

Accepted: Oct.25, 2020

Abstract

Unsustainable application of groundwater in the north of Sahand (East Azarbaijan, Iran) caused a decline more than 14m in water level from 1983 (1362) by now. Therefore, the optimum and sustainable utilization of this resource is a management necessity which is depending on modeling, trend analysis and future study of its how application. The present study was conducted with the aim of groundwater level analysis in the north of Sahand with time series, regression and neural-fuzzy inference system methods. The modeling, test and future studying were made for 50 years which 35 years (from 1983 to 2018) were applied to model and test; and 15 years (from 2019 to 2033) were applied to future study. Results showed that based on indices of performance evaluations, neural-fuzzy inference system produced more precise than other methods to analyze groundwater levels. The groundwater level declined more than 14m with an annually of 40cm and its will be 20.03m in 2034 with current conditions of applications of groundwater. Some conservational scenarios are recommended to improve consumption patterns for groundwater resource in this plain.

Keywords: Groundwater, Future study, Fuzzy logic, Neural-fuzzy inference system, Neural network, Time series.

1- Associate Professor, Agricultural Engineering Research Department, East Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Tabriz, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

(*- Corresponding Author Email: nasseri_ab@yahoo.com)