

ارزیابی مقایسه‌ای مدل عددی و شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی کمی و کیفی آبخوان دشت نجف آباد

معصومه زارع^{۱*}، حمیدرضا غفوری^۲، حمیدرضا صفوی^۳

تاریخ دریافت: ۹۸/۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۹/۸/۲۰

۱- دانشجوی دکترای مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استاد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استاد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: masomeh-zare@phdstu.scu.ac.ir

چکیده

هدف از انجام این مطالعه، بررسی کارایی مدل شبکه عصبی (ANN) در مدل‌سازی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی می‌باشد. بدین منظور، با استفاده از گزینه‌های MODFLOW و MT3DMS نرم افزار GMS v.10، از نظر کمی و کیفی، آب موجود در آبخوان دشت نجف آباد، واقع در حوضه آبریز گاوخونی در فلات مرکزی ایران، مدل‌سازی شد. بعد از واسنجی و صحت‌سنجی مدل در یک دوره مطالعه ۱۱ ساله، محدوده تغییر ضریب هدایت هیدرولیکی بین ۰/۵ تا ۱۶ (متر در روز)، آبدهی ویژه بین ۰/۰۲۳ تا ۰/۱۱۳ و ضریب پخشیدگی طولی بین ۷/۵ تا ۱۸/۲ (متر) بدست آمد. سپس، منطقه مورد مطالعه به دو ناحیه مجزا تقسیم و برای هر کدام یک مدل شبکه عصبی، طراحی شد. در ادامه، با استفاده از آمار ۲۰ سال آبی و به کمک بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک، پارامترهای بهینه شبکه عصبی تعیین گردید. نهایتاً، مقادیر مشاهده‌ای تراز متوسط سطح ایستابی و میانگین غلظت TDS با مقادیر محاسباتی توسط مدل عددی و شبکه عصبی، برای دو سال آبی متوالی ۹۴-۱۳۹۳ و ۹۵-۱۳۹۴، با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که شبکه عصبی به خوبی قادر است رفتار کمی و کیفی سیستم آب زیرزمینی را شبیه‌سازی کند و می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای مدل عددی در اتصال به مدل‌های مدیریتی، استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی، شبکه عصبی، MODFLOW، MT3DMS.

Comparative Evaluation of Numerical Model and Artificial Neural Network for Quantity and Quality Simulation of Najafabad Aquifer

Masume Zare^{1*}, Hamid Reza Ghafouri², Hamid Reza Safavi³

Received: May 12, 2019

Accepted: November 10, 2020

¹PhD Student of Water Resource Management, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

²Professor of Water Resource Management, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

³Prof. of Water Resource Management, Dept. of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

*Corresponding Author-Email: masomeh-zare@phdstu.scu.ac.ir

Abstract

The aim of this study was to investigate the efficiency of the neural network model in quantitative and qualitative modeling of groundwater resources. For this purpose, the groundwater of the Najafabad aquifer located in Gavkhoni basin at the central plateau of Iran, was modeled using MODFLOW and MT3DMS modules of GMS v. 10 software. After calibrating and validating the model for a 11 years time period, the ranges of hydraulic conductivity, specific yield and longitudinal dispersivity coefficient were found to be 0.5-16 (m day⁻¹), 0.023-0.113 and 7.5-18.2 (m), respectively. Then the study area divided into two sub-regions and the ANN model was designed for each of the sub-regions. Afterwards, the optimal parameters of the ANN models were determined using the 20-year dataset of water year and the genetic algorithm optimization model. Finally, calculated values relevant to the average level of groundwater and the mean concentration of TDS, which were acquired by the ANN model and the numerical model, were compared with the observed values from 2014 to 2016. Results showed that the neural network model is capable in simulating the quantitative and qualitative treatment of the groundwater system and can be used as a suitable alternative for the numerical model linking the management models.

Keywords: Artificial neural network, Genetic algorithm, MODFLOW, MT3DMS, Simulation.

مقدمه

صادق‌فام و همکاران (۲۰۱۹). لاله‌زاری و عباسلو (۲۰۱۶) جهت تخصیص بهینه آب با هدف افزایش بهره‌وری در دشت باغملک، از روش عددی تفاضل محدود با استفاده از نرم افزار MODFLOW برای شبیه‌سازی رفتار جریان آب زیرزمینی استفاده کردند. به این ترتیب که سال‌های مطالعه به ۳۶ دوره تنش فصلی تقسیم شد و هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و مقدار تغذیه در این دوره‌ها مورد واسنجی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل جریان با واریانس خطای ۳/۰۵ و ۳/۹۲ بترتیب، برای فرآیندهای واسنجی و صحت‌سنجی، دقت شبیه‌سازی قابل قبولی دارد. لزوم استفاده از یک مدل شبیه‌سازی غیرخطی در یک مدل مدیریتی و تکرار آن به دفعات زیاد، موجب بالا رفتن زمان محاسباتی لازم برای رسیدن به پاسخ بهینه و بعضاً نتایج ضعیف می‌

با توجه به قرارگیری قسمت عمده‌ای از کشور ایران در مناطقی با اقلیم خشک و نیمه خشک، دسترسی به منابع آب زیرزمینی به عنوان اصلی‌ترین منبع تامین کننده نیازهای آبی، با کمیت و کیفیت پایدار، با عوامل مختلفی از جمله بالازدگی آب شور، تهدید می‌شود. اعمال مدیریت صحیح بر این منابع با هدف استفاده بهینه و جلوگیری از آلودگی آن، جز از طریق مدل‌سازی دقیق رفتار آن‌ها میسر نمی‌باشد. امروزه محققین زیادی جهت مدل‌سازی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی، از مدل‌های ریاضی استفاده می‌کنند (واحد-دوست و همکاران ۲۰۱۶، لاله‌زاری و کراچیان ۲۰۱۷، علویانی و همکاران ۲۰۱۸،

الگوریتم تصمیم‌سازی OCAI^۱ استفاده نمودند. مراحل الگوریتم مذکور شامل ۱- استفاده از مدل‌های عددی MODFLOW و MT3DMS جهت شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و غلظت آلودگی در آبخوان ۲- استفاده از دو مدل فازی ساگنو بعنوان جایگزینی برای مدل‌های عددی مورد استفاده در مرحله اول به منظور افزایش سرعت اجرای برنامه و ۳- استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی GA جهت بهینه‌سازی الگوی پمپاژ و تزریق بود. نتایج این تحقیق حاکی از کاهش میزان کل ماده حل شده از دامنه ۳۵۰۰-۸۰۰۰ به ۳۴۵۰-۱۴۹۰ (میلی گرم بر لیتر) بود. با اینکه مباحث کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی کاملاً با یکدیگر در ارتباط هستند، در اکثر مطالعات صورت گرفته، بیشتر به مبحث کمی آن پرداخته شده است و مدل‌های جایگزین نیز به منظور شبیه‌سازی کمی این منابع توسعه یافته‌اند. از سوی دیگر، در آن دسته مسائل مدیریتی که هر دو جنبه کمی و کیفی در نظر گرفته شده، از دو مدل مجزا به عنوان جایگزین مدل‌های عددی شبیه‌ساز کمی-کیفی جهت اتصال به توابع هدف و قیودات استفاده شده است که این نیز به نوبه خود سبب افزایش حجم محاسبات می‌گردد. بنابراین، هدف اصلی این مطالعه، توسعه مدل ANN با دو خروجی کمی و کیفی می‌باشد به گونه‌ای که تنها با استفاده از یک مدل، پاسخ کمی و کیفی استراتژی‌های مدیریتی مختلف، حاصل گردد. به منظور ارزیابی کارایی مدل مذکور، مقادیر پیش‌بینی شده تراز سطح ایستابی و غلظت TDS در آبخوان دشت نجف‌آباد توسط این مدل، با نتایج مدل عددی MODFLOW و MT3DMS و مقادیر مشاهده‌ای، مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

گردد. بنابراین، باید به دنبال راهکارهایی بود تا با حفظ ساختار محاسبات، دقت و سرعت دسترسی به نتایج افزایش یابد.

در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌های جایگزین در فرآیند بهینه‌سازی، دقت و سرعت محاسبات را در یافتن پاسخ‌های بهینه (استراتژی‌های بهینه مدیریتی) افزایش داده است. ندیری و همکاران (۲۰۱۵) از مدل منطق فازی مرکب برای پیش‌بینی و بررسی مقادیر غلظت آرسنیک کل، در محدوده مطالعاتی سد سهند استفاده کردند. آن‌ها در این روش از ترکیب سه مدل فازی ممدانی^۱، لارسن^۲ و ساگنو^۳ بصورت خطی و وزنی بهره جستند. نتایج نشان داد که مدل جدید ارائه شده توانایی و کارایی بالایی در ترکیب مدل‌های فازی دارد. در تحقیقی دیگر از ندیری و همکاران (۲۰۱۳) جهت تخمین غلظت فلوراید در آب زیرزمینی منطقه غیر همگن باکو، ابتدا از ۴ مدل فازی ساگنو، فازی ممدانی، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و نروفازی بصورت مجزا استفاده شد. سپس مدل هوش مصنوعی مرکب نظارت شده که ترکیبی از ۴ مدل مورد استفاده در مرحله اول می‌باشد، به کار گرفته شد. نتایج این تحقیق حاکی از کارایی مشابه و عدم توانایی هر کدام از ۴ مدل مذکور در پیش‌بینی غلظت فلوراید بود. در حالیکه، انطباق دقیق‌تر نتایج حاصل از مدل ترکیبی معرفی شده بر داده‌های مشاهده‌ای غلظت فلوراید، بیانگر عملکرد بهتر این مدل در تخمین غلظت فلوراید به خصوص در نواحی غیر همگن بود. کوپولا و همکاران (۲۰۰۵)، پراتا و همکاران (۲۰۱۴)، صفوی و انتشاری (۲۰۱۶) نیز در مطالعات خود از مدل ANN، جهت تخمین تراز آب زیرزمینی استفاده کردند. صادق‌فام و همکاران (۲۰۱۹) جهت بهبود یک آبخوان آلوده، از روش PTI^۴ در قالب

¹ Mamdani fuzzy logic

² Larsen fuzzy logic

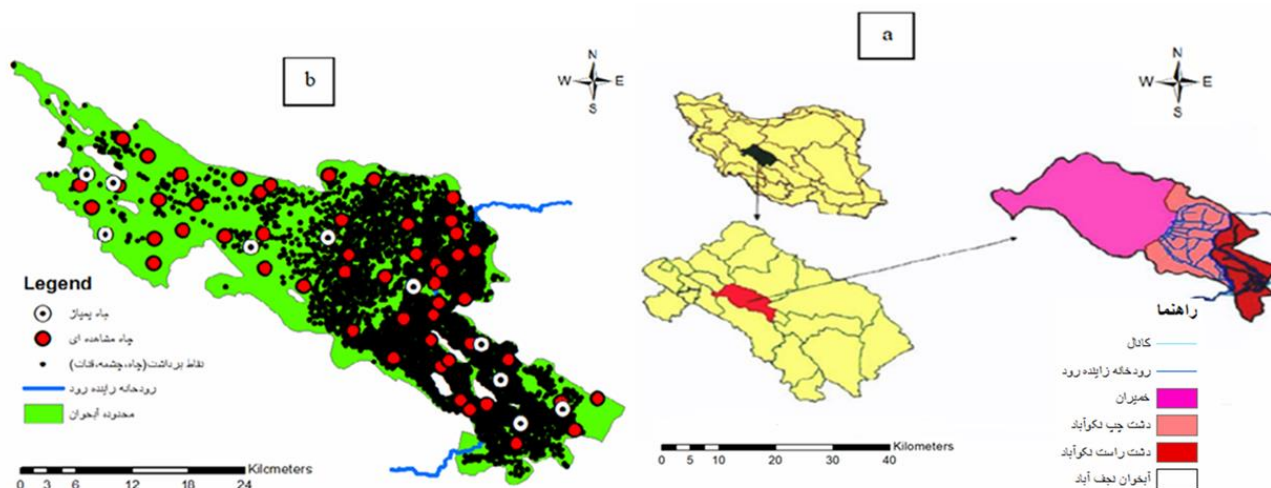
³ Sugeno fuzzy logic

⁴ Pump-treat-inject

⁵ Optimal control by artificial intelligence

کاربری این منطقه کشاورزی بوده و به منظور آبیاری اراضی، علاوه بر آب انتقال یافته توسط شبکه مدرن آبیاری و زهکشی نکوآباد از محل بند انحرافی نکوآباد واقع در ورودی رودخانه زاینده رود، تعداد ۱۵۷۱۰ حلقه چاه و ۹۰ رشته قنات نیز در سطح دشت حفر گردیده است. همچنین تعداد ۵۲ حلقه چاه مشاهده‌ای و ۱۰ حلقه چاه پمپاژ نیز در این محدوده گزارش شده است (بی نام ۲۰۱۰). موقعیت زیرحوضه نجف‌آباد به همراه شبکه آبیاری و زهکشی نکوآباد و نقشه منابع آب دشت، در شکل ۱ نشان داده شده است.

محدوده مطالعاتی نجف‌آباد در حوضه آبریز گاوخونی واقع در فلات مرکزی ایران، قرار گرفته و با متوسط بارندگی سالانه ۱۷۴ (میلی‌متر)، میانگین دمای سالانه ۱۴ (درجه سانتی‌گراد) و تبخیر و تعرق سالانه ۲۳۴۰ (میلی‌متر)، دارای اقلیمی خشک می‌باشد. از نظر منابع آب زیرزمینی، زیرحوضه مذکور شامل یک دشت اصلی به وسعت ۱۰۷۵/۷ (کیلومتر مربع) می‌باشد که حدود ۹۵ درصد مساحت آن (۹۴۱ کیلومتر مربع) را آبخوانی آزاد با ضخامت متوسط ۶۰ (متر)، پوشش داده است. رودخانه زاینده رود با طول ۳۶ (کیلومتر)، از جنوب حوضه وارد و از شمال شرق آن خارج می‌شود.

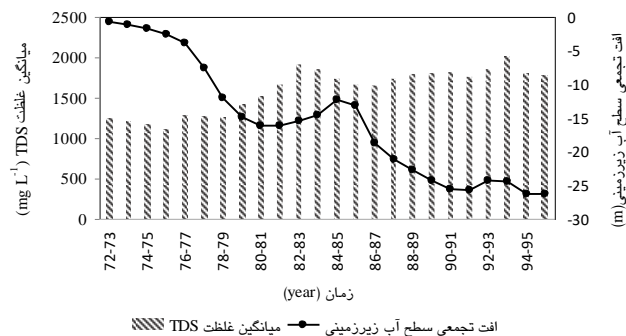


شکل ۱- موقعیت زیرحوضه نجف‌آباد به همراه شبکه‌های آبیاری (a) (کلانتری ۲۰۱۶)، نقشه منابع آب دشت (b).

محدوده، عدم آبدی شبکه‌های آبیاری سطحی و افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی، است (بی نام ۲۰۱۰). در تحقیقی از کلاهدوزان و همکاران (۲۰۱۵)، روند تراز آب زیرزمینی دشت نجف‌آباد در دوره آماری ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۱، با استفاده از آزمون ناپایداری من- کندال، مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها، افت متوسط تراز آب زیرزمینی در این دشت را حدود ۳۲ (سانتی‌متر) در سال، ذکر کردند و خشک شدن رودخانه زاینده‌رود را مهم‌ترین علت آن دانستند. به منظور تحلیل این افت و تاثیر آن بر روی کیفیت آب زیرزمینی، نمودار متوسط غلظت کل مواد جامد (TDS) به همراه تغییرات سطح آب زیرزمینی طی سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۵، در

بر اساس مطالعات بیلان آب زیرزمینی، کل برداشت از آبخوان ۸۸۶/۶ (میلیون متر مکعب در سال) می‌باشد، در حالیکه مجموع کل مولفه‌های تغذیه کننده آبخوان ۷۴۸/۳۰ (میلیون متر مکعب) و در نتیجه نرخ متوسط کاهش حجم ذخیره ثابت آبخوان معادل ۱۳۸/۳۰ (میلیون متر مکعب در سال) است (بی نام ۲۰۱۰). براساس هیدروگراف واحد آبخوان، متوسط افت بلند مدت در آبخوان برابر ۱/۳- (متر) است. در حالی که افت متوسط ۵ سال انتهایی مختوم به سال ۹۰ برابر با ۲/۱۱- (متر) و افت سال ۹۰ نیز برابر با ۲/۹۶- (متر) می‌باشد. دلیل اصلی افزایش میزان افت در محدوده نجف‌آباد، عدم آبدی رودخانه زاینده رود در این

شکل ۲ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، در طول دوره آماری مورد مطالعه، متوسط شوری آب زیرزمینی در آبخوان، از یک روند افزایشی برخوردار است که این افزایش همسو و با افت متوسط سطح آب زیرزمینی می باشد.



شکل ۲- تغییرات متوسط غلظت TDS در مقابل افت متوسط سطح آب زیرزمینی.

داده های مربوط به تراز سطح ایستابی و غلظت TDS نیز، حدود ۲۰ درصد از داده ها مفقود بودند که از روش درون یابی برای بازسازی آن ها استفاده گردید.

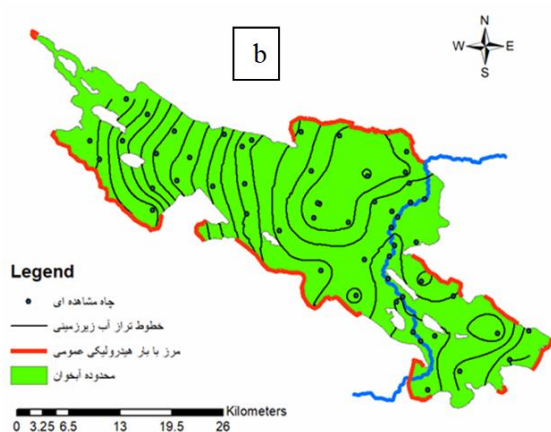
تهیه مدل مفهومی

هدف از شبیه سازی آبخوان دشت نجف آباد، بررسی بیلان آب زیرزمینی و تغییرات کیفی آن است. این آبخوان آزاد ناهمگن، از یک لایه تشکیل یافته و فضای بین سنگ کف و توپوگرافی سطح به همراه مرزها، شکل هندسی آن را تشکیل می دهند. جهت تهیه لایه سنگ کف، از اطلاعات مربوط به لوگ چاه های موجود در سطح دشت و جهت تعیین حدود جانبی منطقه، از نقشه های زمین شناسی، توپوگرافی و عکس های هوایی استفاده گردید (بحرینی و صفوی ۲۰۰۹). با استفاده از خطوط تراز پیژومترها و نقشه های موجود، قسمت هایی از دشت که فاقد جریان است، به عنوان مرز نفوذناپذیر و سایر قسمت ها به صورت مرز با بار هیدرولیکی عمومی (GHB) در نظر گرفته شدند (شکل

داده های مورد استفاده

مهم ترین گام در این تحقیق، جمع آوری و تهیه اطلاعات مورد نیاز، شامل داده های زمین شناسی، کاربری اراضی، سطح زیر کشت و الگوی کشت در منطقه، داده های آزمایش پمپاژ انجام شده در سطح منطقه، نقشه توپوگرافی سطح زمین و کف آبخوان و دبی برداشت چاه های موجود در منطقه می باشد. داده های هواشناسی مربوط به ایستگاه هواشناسی موجود در منطقه (زفره- فلاورجان)، داده های هیدرومتری ثبت شده در ایستگاه های آب سنجی (لنج و موسیان)، مقادیر آب تحویلی به شبکه های آبیاری منطقه (شبکه سمت راست و چپ نکوآباد)، داده های سطح ایستابی ثبت شده در ۵۲ حلقه چاه مشاهده ای و داده های مربوط به غلظت TDS در ۱۶ منبع آب زیرزمینی نیز بصورت ماهانه، از مهر ۱۳۷۲ تا شهریور ۱۳۹۵، از اداره آب منطقه ای استان اصفهان اخذ گردید. همچنین بمنظور اطمینان از صحت و کیفیت سری های زمانی، از آزمون های همگنی و بررسی داده های پرت استفاده شد. در خصوص

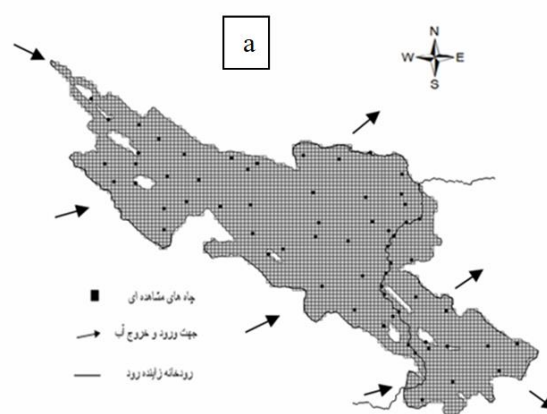
برگشتی ناشی از آبیاری به وسیله آب چاه و جریان زیرزمینی ورودی از آبخوان‌های مجاور و پارامترهای خروجی از جمله تخلیه از چاه‌ها و آب خروجی زیرزمینی، در قالب بسته‌های مربوطه، به مدل وارد شد. فرض اولیه برای ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان نیز از طریق نتایج آزمون پمپاژ، مقاطع زمین‌شناسی و مطالعات پیشین، تعیین و در بسته مربوطه وارد گردید. پس از ایجاد مدل مفهومی آبخوان با استفاده از داده‌ها و اطلاعات موجود در سطح منطقه، مدل عددی آبخوان به صورت شبکه‌ای متشکل از ۱۵۲۲۵ سلول فعال با ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ متر مربع ایجاد گردید. مدل مفهومی تهیه شده از آبخوان در شکل ۳ دیده می‌شود.



شکل ۳- مدل مفهومی آبخوان نجف‌آباد (a)، نقشه خطوط تراز آب زیرزمینی و مرز با بار هیدرولیکی عمومی (b).

خروجی‌های شبکه، به ترتیب ۷ و ۲ نرون، تعیین شدند. متوسط سطح ایستابی و میانگین غلظت TDS در آبخوان در ابتدای ماه، متوسط بارش و دمای ماهانه ثبت شده در ایستگاه زفره فلاورجان، تخلیه ماهانه از آبخوان از طریق چاه‌های بهره‌برداری، میزان مصرف ماهانه آب توسط شبکه‌های آبیاری مدرن و تفاوت حجم آب ورودی و خروجی به رودخانه، پارامترهای ورودی و متوسط سطح ایستابی و میانگین غلظت TDS در انتهای ماه، پارامترهای خروجی شبکه را تشکیل می‌دهند. برای انتخاب تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون در هر لایه و

علت استفاده از این نوع شرط مرزی، این است که اولاً سطح آب در این نوع مرز، برخلاف مرز با بار هیدرولیکی ثابت، متغیر است و بنابراین جریان ورودی و خروجی، متناسب با رسانایی سلول مرزی و گرادیان هیدرولیکی در مرز، تغییر می‌کند. ثانیاً، از آنجا که حساسیت بارهای هیدرولیکی محاسباتی به مرز با بار هیدرولیکی عمومی، نسبت به انواع دیگر شرایط مرزی کمتر است، در صورت بکار بردن فرضیات ناصحیح در مرز و یا رسیدن اثر تنش‌های داخلی به آن، نتایج مدل کمتر تحت تاثیر رفتار غیر واقعی مرزها قرار خواهد گرفت (چیت‌سازان و صدقی ۲۰۰۵). پارامترهای ورودی به مدل شامل نفوذ ناشی از بارندگی، آب برگشتی حاصل از آبیاری به وسیله آب سطحی، آب



طراحی ساختار شبکه عصبی مصنوعی

با توجه به اینکه توپوگرافی منطقه و ساختار آبخوان در دو منطقه چپ و راست نکوآباد یکسان نمی‌باشند و رودخانه زاینده رود نیز عملکرد این دو بخش را نسبتاً متفاوت از یکدیگر نموده است، دو شبکه عصبی مختلف از نوع چند لایه پرسپترون^۱، جهت شبیه‌سازی تراز متوسط سطح آب و غلظت TDS در این مناطق طراحی شد. تعداد نرون‌های لایه ورودی و خروجی در هر شبکه، با توجه به تعداد ورودی و

¹ Multilayer perceptron

در صورت در اختیار داشتن اطلاعات واقعی از سیستم، به صورت داده ورودی-خروجی، می‌توان با آموزش شبکه، خروجی شبکه عصبی را که متناظر با داده‌های ورودی است، محاسبه نمود. اختلاف بین خروجی مدل شبکه عصبی و خروجی سیستم، خطای مدل نامیده می‌شود. الگوریتم‌های یادگیری در تلاش‌اند که با تغییر در پارامترهای شبکه عصبی (وزن-ها و بایاس‌ها)، مجموع مربعات خطای شبکه را برای داده‌های مختلف به حداقل برسانند.

همچنین انتخاب نوع توابع انتقال، از روش سعی و خطا استفاده شد و از بین گزینه‌های مختلف، شبکه ساده‌تر با میزان خطای کمتر انتخاب گردید. در جدول ۱ تعدادی از گزینه‌های آزمون شده به عنوان نمونه آورده شده و ساختار نهایی شبکه‌های طراحی شده برای دو منطقه راست و چپ نکوآباد، مشخص شده است.

آموزش شبکه عصبی مصنوعی

جدول ۱- تعدادی از گزینه‌های آزمون شده جهت تعیین ساختار بهینه شبکه‌های عصبی.

RMSE مرحله آموزش		توابع انتقال	تعداد نرون‌ها در لایه‌ها	منطقه
غلظت TDS	سطح ایستابی			
۰/۰۶۱	۰/۰۵۹	logsig-tansig-tansig-purelin	۷-۵-۵-۲	نکوآباد راست
۰/۲۴۸	۰/۲۴۲	tansig-logsig-logsig-purelin	۷-۵-۳-۲	نکوآباد راست
۰/۰۱۷	۰/۰۱۶	logsig-logsig-tansig-purelin	۷-۵-۳-۲	نکوآباد راست
۰/۳۱۱	۰/۳۰۹	logsig-logsig-logsig-purelin	۷-۵-۲	نکوآباد راست
۰/۴۲	۰/۳۹۷	tansig-tansig-tansig-purelin	۷-۳-۲	نکوآباد راست
۰/۰۶۷	۰/۰۶۲	logsig-tansig-tansig-purelin	۷-۵-۵-۲	نکوآباد چپ
۰/۱۱۳	۰/۱۰۸	logsig-tansig-logsig-purelin	۷-۵-۳-۲	نکوآباد چپ
۰/۰۲۱	۰/۰۱۶	tansig-logsig-tansig-purelin	۷-۵-۳-۲	نکوآباد چپ
۰/۵۴۲	۰/۵۳۶	tansig-tansig-tansig-purelin	۷-۵-۲	نکوآباد چپ
۰/۳۵۱	۰/۳۴۵	logsig-tansig-logsig-purelin	۷-۳-۲	نکوآباد چپ

فرآیند تولید فرزند انجام می‌شود به طوری که جمعیت به تعداد اولیه خود باز می‌گردد. در نهایت، فرآیند جهش بر روی برخی از ژن‌های جمعیت جدید اتفاق افتاده و همین مراحل تا رسیدن به همگرایی و پاسخ بهینه (وزن‌ها و بایاس‌ها)، ادامه می‌یابد.

نتایج و بحث

واسنجی و صحت سنجی مدل کمی و کیفی

مهر سال آبی ۸۵-۱۳۸۴ به دلیل نوسانات اندک آب زیرزمینی و سطح اطمینان داده‌های ورودی، اولین گام زمانی مدل‌سازی در نظر گرفته شد. بار هیدرولیکی

در این مطالعه به منظور آموزش شبکه عصبی، از بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک استفاده گردید. به این ترتیب که ابتدا یک جمعیت اولیه شامل کروموزوم‌های متشکل از وزن‌ها و بایاس‌های شبکه عصبی، تولید می‌گردد. سپس به ازاء هر کدام از کروموزوم‌های جمعیت، شبکه عصبی آموزش دیده و مجموع مربعات خطای شبکه، محاسبه می‌شود. در ادامه، جمعیت بر اساس مقادیر بدست آمده در مرحله قبل بصورت صعودی مرتب شده و نیمه بالایی جمعیت، جهت انجام فرآیند تزویج انتخاب می‌گردند. در گام بعد با استفاده از روش تورنومنت، والدین دو به دو گزینش شده و با استفاده از متد پیشنهادی توسط اشلمن و شفه (۱۹۹۳)، $(BLX-\alpha)$ ،

عنوان مدل پایه در شرایط ناماندگار استفاده شد. در این حالت نیز مدل برای یک دوره ۸ ساله از سال آبی ۱۳۸۴-۸۵ تا ۱۳۹۱-۹۲ با دوره تنش ماهانه، واسنجی شد. مقادیر اولیه و کالیبره شده پارامترها بعد از واسنجی مدل جریان، در جدول ۲ ارائه شده است.

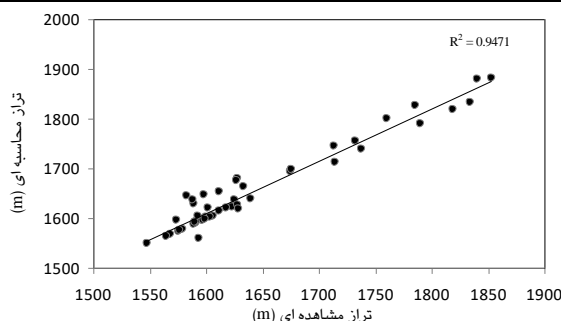
در نهایت به منظور بررسی تطبیق مدل با واقعیت و حصول اطمینان از توانایی مدل در شبیه-سازی جریان آب زیرزمینی، مرحله صحت سنجی نیز برای یک دوره ۳۶ ماهه، از مهر ۹۳-۱۳۹۲ تا شهریور ۱۳۹۴-۹۵ اجرا شد. دقت مدل‌سازی و صحت سنجی با استفاده از شاخص جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) سنجیده شد. این شاخص برای دوره واسنجی برابر با ۱/۴۶ (متر) و برای دوره صحت‌سنجی ۲/۰۷ (متر) بدست آمد. نتایج صحت سنجی مدل در اولین گام از دوره صحت سنجی نیز، در شکل ۴ نشان داده شده است که مبین همبستگی بالا بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی می‌باشد.

اولیه در گره‌ها با استفاده از داده‌های سطح ایستابی در ۵۲ چاه مشاهده‌ای تعیین و بعنوان شرط اولیه لحاظ و مدل به اجرا درآمد. بدیهی است که دلیل استفاده از آمار و اطلاعات غیردقیق، فرضیات اولیه و عدم وجود دسترسی به اطلاعات حقیقی از ساختار آبخوان، نتایج به دست آمده در این مرحله، نامطلوب است.

بنابراین در مرحله واسنجی، اصلاحاتی به شکل سعی و خطا بر روی پارامترهای تغذیه از جمله آب برگشتی آبیاری سنگین، آب برگشتی آبیاری از طریق آب چاه، بارندگی و ضریب قابلیت انتقال بستر، انجام شد. همچنین، تصحیحاتی هم به صورت خودکار و هم از روش سعی و خطا، بر روی مقادیر اولیه ضریب هدایت هیدرولیکی، صورت پذیرفت. این تغییرات، تا دستیابی به مقادیر منطقی و بهینه و مناسب‌ترین تطابق بین تراز آب مشاهداتی و محاسباتی و جریان تبدالی در مرزها، ادامه یافت. دامنه خطای قابل قبول نیز با توجه به هدف مدل‌سازی، ۱ (متر) در نظر گرفته شد. در مرحله بعد، از مدل واسنجی شده در حالت ماندگار، به

جدول ۲- پارامترهای مدل عددی جریان قبل و بعد از واسنجی.

پارامتر	واحد	محدوده تغییرات مقادیر اولیه	محدوده تغییرات مقادیر واسنجی شده
هدایت هیدرولیکی (k)	$m\ day^{-1}$	۰/۰۱-۸/۸	۰/۵-۱۶
قابلیت آبگذری بستر	$(m^2\ day^{-1})\ day^{-1}$	۶۰	۱۲/۶-۲۴/۹
تغذیه	$m\ day^{-1}$	۰/۰۰۲۰۵-۰/۰۰۲۱۸	۰/۰۰۰۵۶۶-۰/۰۰۱۷
آبدهی ویژه (S_y)	-	۰/۰۳۳-۰/۰۹۸	۰/۰۲۳-۰/۱۱۳



شکل ۴- نتایج صحت‌سنجی مدل عددی برای اولین گام از دوره صحت سنجی.

گردد. نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق این محققان نیز همخوانی دارد.

آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز مدل ANN

پس از آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز، از مهر ۱۳۷۲ تا شهریور ۱۳۹۵، محدوده آبخوان با استفاده از روش تیسسن^۱ در نرم افزار ARC GIS 10.2، پلی‌گون بندی شد و میانگین تراز سطح آب زیرزمینی و همچنین متوسط غلظت TDS با استفاده از اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای کمی و کیفی هر منطقه، محاسبه شد. در نهایت، داده‌های ورودی و خروجی هر شبکه، در نرم افزار EXCELL مرتب گردیدند و جهت افزایش سرعت و دقت شبکه، نرمال‌سازی شده و به بازه [۱، -۱] تغییر یافتند.

آموزش و صحت سنجی مدل ANN

در این مرحله، ابتدا داده‌ها (از مهر ۱۳۷۲ تا شهریور ۱۳۹۳) به صورت تصادفی به سه دسته، شامل ۷۰ درصد برای آموزش، ۱۵ درصد برای صحت سنجی و ۱۵ درصد برای آزمون، تفکیک شدند. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک با یک جمعیت اولیه ۱۵۰ کروموزومی، وزن‌ها و بایاس‌های بهینه شبکه عصبی به گونه‌ای تعیین شدند که میانگین مربعات خطای داده‌های محاسباتی و مشاهده‌ای (داده‌های آموزشی) کمینه گردند. برای جلوگیری از مشکل ورا آموزی و توقف به موقع روند آموزش به منظور تعمیم دهی مناسب شبکه نیز از داده‌های صحت‌سنجی استفاده گردید. لازم به ذکر است که کلیه کدهای مربوطه، در محیط نرم افزار MATLAB تهیه شدند. جهت ارزیابی عملکرد شبکه از شاخص‌های ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R²)، استفاده شد. مقادیر ارائه شده این پارامترها در جدول ۳، حاکی از عملکرد مناسب شبکه

در تهیه مدل کیفی، برخی از شرایط اولیه از جمله محدوده مدل‌سازی، توپوگرافی، رقوم سنگ کف، مرزهای آبخوان، شبکه‌بندی و طول دوره مدل‌سازی، کاملاً منطبق بر مدل کمی در نظر گرفته شد. جهت اعمال شرایط اولیه نیز از مقادیر حاصل از درون‌یابی TDS در مکان‌های نمونه برداری در شروع دوره مدل‌سازی، استفاده گردید. همچنین به دلیل محدودیت چاه‌های انتخابی، جهت واسنجی پارامتر ضریب پخشیدگی طولی، روش مستقیم (سعی و خطا) به کار گرفته شد و مقدار این پارامتر بین ۷/۵ تا ۱۸/۲ (متر) بدست آمد. نقشه خطوط هم غلظت TDS برای اولین گام از دوره صحت سنجی، در شکل ۵ نمایش داده شده است. همان طور که واضح است، با حرکت از سمت شمال غرب به طرف مرکز آبخوان، بر غلظت املاح افزوده می‌گردد. بررسی مقادیر واسنجی شده ضریب هدایت هیدرولیکی نیز، حاکی از سبک‌تر بودن خاک این محدوده نسبت به سایر نواحی دشت است. بنابراین می‌توان اینطور نتیجه‌گیری کرد که سبک بودن خاک، دلیلی بر قابلیت بالاتر آبخوان جهت انتقال آب در این ناحیه می‌باشد. آمادگی آبخوان جهت تامین آب مورد نیاز، موجب گسترش زمین‌های کشاورزی و حفر چاه‌های بیشتر و به تبع آن، بالا آمدگی آب شور و افزایش غلظت TDS در این قسمت شده است. لاله‌زاری و کراچیان (۲۰۱۷) به شبیه‌سازی کمی و کیفی آبخوان دشت شهرکرد پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها مبنی بر بالا بودن مقادیر هدایت هیدرولیکی در قسمت میانی دشت و در نتیجه حفر بخش عمده چاه‌های برداشت در این قسمت، نیز موید نتایج فوق می‌باشد. همچنین در تحقیقی از کردان‌مقدم و بنی‌حیب (۲۰۱۷) که هجوم جبهه‌های آب شور به آبخوان‌های کویری مورد بررسی قرار گرفت، ایشان به این نتیجه رسیدند که برداشت بی‌رویه و کاهش حجم آبخوان موجب پیشروی جبهه‌های آب شور به سمت آبخوان و در نتیجه افزایش غلظت TDS می-

¹ Thiessen method

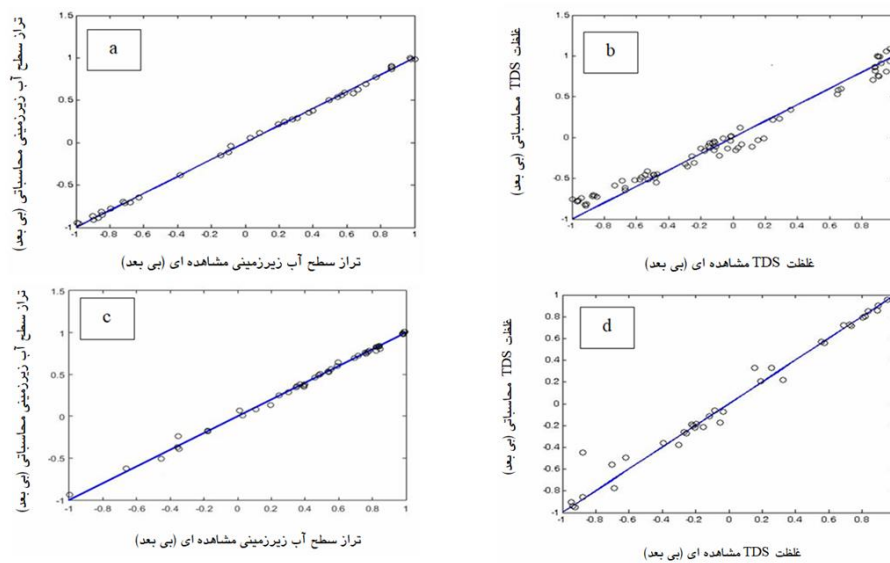
عصبی هم در مرحله آموزش و هم در مرحله صحت-سنجی می‌باشد.

مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی تراز متوسط سطح آب زیرزمینی و میانگین غلظت TDS در مرحله آزمون نیز، برای دو منطقه راست و چپ نکوآباد، در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵- تغییرات غلظت TDS برای اولین گام از دوره صحت سنجی مدل عددی. جدول ۳- نتایج ارزیابی مدل ANN در مرحله آموزش و صحت سنجی.

مرحله صحت‌سنجی		مرحله آموزش		پارامترها در هر ناحیه
R ²	RMSE	R ²	RMSE	
۰/۹۶۱۰	۰/۰۵۷۱	۰/۹۹۸۹	۰/۰۱۶۳	سطح ایستابی در نکوآباد چپ
۰/۹۸۸۷	۰/۱۲۴۵	۰/۹۹۹۱	۰/۰۲۱۳	غلظت TDS در نکوآباد چپ
۰/۹۶۲۴	۰/۰۴۰۴	۰/۹۹۹۱	۰/۰۱۶۴	سطح ایستابی در نکوآباد راست
۰/۹۹۶۱	۰/۱۰۸۴	۰/۹۹۹۳	۰/۰۱۷۲	غلظت TDS در نکوآباد راست



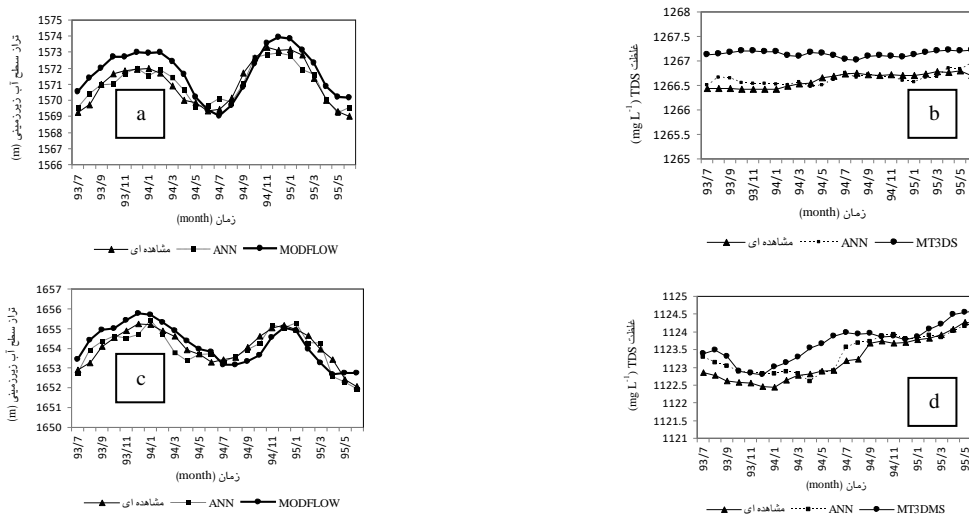
شکل ۶- نتایج حاصل از شبکه عصبی آموزش یافته در مرحله آزمون برای مقادیر متوسط تراز سطح آب در منطقه چپ نکوآباد (a)، نتایج حاصل از شبکه عصبی آموزش یافته در مرحله آزمون برای مقادیر متوسط غلظت TDS در منطقه چپ نکوآباد (b)، نتایج حاصل از شبکه عصبی آموزش یافته در مرحله آزمون برای مقادیر متوسط تراز سطح آب در منطقه راست نکوآباد (c)، نتایج حاصل از شبکه عصبی آموزش یافته در مرحله آزمون برای مقادیر متوسط غلظت TDS در منطقه راست نکوآباد (d).

این امر نشان از دقت بالای مدل ANN در تقلید از رفتار سیستم آب زیرزمینی می‌باشد. در همین راستا، نایاک و همکاران (۲۰۰۶) یک مدل شبکه عصبی مصنوعی را برای تخمین و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در یک آبخوان کم عمق در هند، ایجاد کردند. اسریکانت و همکاران (۲۰۰۹) نیز سطح آب زیرزمینی را با استفاده از مدل ANN پیش‌رو و الگوریتم آموزش لوبنبرگ-مارکوات شبیه‌سازی کردند. همچنین محققان دیگری از جمله اسریکانت و همکاران (۲۰۰۹)، پراتا و همکاران (۲۰۱۴) و صفوی و انتشاری (۲۰۱۶) نیز در مطالعات خود از مدل ANN جهت تخمین تراز آب زیرزمینی بهره جستند. نتایج مطالعات این محققین نشان داد که شبکه عصبی، ابزار مناسبی جهت پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی می‌باشد که این امر نیز موید نتایج تحقیق حاضر می‌باشد.

همان طور که واضح است، اگر چه ضریب R^2 در هر دو مرحله آموزش و صحت‌سنجی برای مقادیر متوسط سطح ایستابی و میانگین غلظت TDS در هر دو ناحیه دارای مقادیری بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشد اما با مقایسه نمودارها می‌توان دریافت که مدل ANN مقادیر تراز سطح ایستابی را با دقت بیشتری نسبت به غلظت TDS شبیه‌سازی می‌کند. این امر با مقایسه مقادیر RMSE در جدول ۳ نیز اندکی مشخص است.

مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی و ANN

جهت مقایسه کارایی مدل ANN نسبت به مدل‌های عددی MODFLOW و MT3DMS در شبیه‌سازی رفتار آب زیرزمینی، از داده‌های مربوط به سال‌های آبی ۹۳-۱۳۹۲ و ۹۵-۱۳۹۴ استفاده گردید و خروجی‌ها برای دو منطقه راست و چپ نکوآباد، در شکل ۷ به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی هم‌پوشانی خوبی با مقادیر مشاهده‌ای دارند که



شکل ۷- مقایسه مقادیر تراز سطح ایستابی با نتایج مدل ANN و MODFLOW در مرحله صحت سنجی در منطقه چپ نکوآباد (a)، مقایسه مقادیر غلظت TDS با نتایج مدل ANN و MT3DMS در مرحله صحت سنجی در منطقه چپ نکوآباد (b)، مقایسه مقادیر تراز سطح ایستابی با نتایج مدل ANN و MODFLOW در مرحله صحت سنجی در منطقه راست نکوآباد (c)، مقایسه مقادیر غلظت TDS با نتایج مدل ANN و مدل MT3DMS در مرحله صحت سنجی در منطقه راست نکوآباد (d).

ANN مانند یک جعبه سیاه عمل می‌کنند که هیچ اطلاعی از تبادلات صورت گرفته در سیستم، ارائه نمی‌دهند. مدل‌های عددی با ایجاد یک دید کلی نسبت به خصوصیات و چهارچوب هیدرولوژیکی آبخوان نیز می‌توانند در شبیه‌سازی شرایط آینده، مورد استفاده قرار گیرند (کوپولا و همکاران ۲۰۰۵).

نتیجه گیری کلی

در اکثر تحقیقات صورت گرفته، فرامدل‌ها تنها به منظور شبیه‌سازی جریان توسعه یافته‌اند و در آن تعداد محدود مسائل مدیریتی که به هر دو جنبه کمی و کیفی پرداخته شده است، از دو فرامدل مجزا به عنوان جایگزین مدل‌های عددی شبیه‌ساز کمی-کیفی، استفاده شده است که این نیز به نوبه خود سبب پیچیدگی و افزایش حجم محاسبات می‌گردد. در همین راستا، در این تحقیق یک مدل ANN با دو خروجی که قادر به

مقایسه مقادیر مشاهده‌ای نسبت به مقادیر محاسبه شده توسط مدل ANN و مدل عددی در هر چهار نمودار نیز، حاکی از عملکرد بهتر شبکه عصبی در پیش‌بینی سطح ایستابی و غلظت TDS نسبت به مدل عددی می‌باشد. این دقت در کنار نیاز به زمان کمتر برای ساخت و آموزش، سهولت در جمع آوری داده‌های مورد نیاز و عدم لزوم شناخت خصوصیات فیزیکی و شرایط آبخوان مورد مطالعه، مدل ANN را به جایگزینی مناسب برای مدل‌های عددی در مسائل مدیریت منابع آب، تبدیل کرده است (کوپولا و همکاران ۲۰۰۵). در کنار همه این مزیت‌ها، باید به این نکته نیز اشاره کرد که با ایجاد هر تغییری در پارامترهای ورودی و خروجی شبکه عصبی، فرآیند مدل‌سازی باید از ابتدا صورت گیرد در صورتی که در مورد مدل‌های عددی اینطور نیست. همچنین بر خلاف مدل‌های عددی که یک بیلان کلی از آبخوان مورد مطالعه به دست می‌دهند، مدل

دلیل برخورداری از سرعت پردازش بالا در کنار دقت مناسب و توانایی در شبیه‌سازی کمی و کیفی بصورت همزمان، می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای مدل‌های عددی به ویژه هنگام اتصال به مدل‌های بهینه‌ساز جهت دستیابی به سناریوهای مدیریتی بهینه، مورد استفاده قرار گیرد.

پیش‌بینی همزمان تراز سطح آب زیرزمینی و غلظت TDS می‌باشد، برای آبخوان دشت نجف‌آباد، توسعه داده شد و کارایی آن در مقایسه با مدل عددی، ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که اولاً مدل ANN با دقت بیش‌تری نسبت به مدل‌های عددی، قادر به شبیه‌سازی رفتار کمی و کیفی سیستم آب زیرزمینی می‌باشد. ثانیاً به

منابع مورد استفاده

- Alaviani F, Sedghi H, Moghaddam AA and Babazadeh H, 2018. Adopting GMS-PSO model to reduce groundwater withdrawal by integrated water resources management. *International Journal of Environmental Research* 12(5): 619-629.
- Anonymous, 2010. Zayandehrood River Basin Report. Isfahan, Iran. (In Persian with English abstract)
- Bahreini GR and Safavi HR, 2009. Water resources interaction modeling using satellite images and GIS techniques. *Iran Water Resources Research* 4(3):14-26. (In Persian with English abstract)
- Chitzasan M and Sedghi MM, 2005. Physical modelling study of free and submerged flow on the obstructions in rivers with ten modes of transverse waves. 23th Earth Science Gathering. Tehran, Iran. (In Persian with English abstract)
- Coppola EA, Rana AJ, Poulton MM, Szidarovszky F and Uhl VW, 2005. A neural network model for predicting aquifer water level elevations. *Groundwater* 43(2): 231-241.
- Eshelman LJ and Shaffer DJ, 1993. Real-coded genetic algorithms and interval schemata. *Foundations of Genetic Algorithms 2*: 187-202.
- Kalantari M, 2016. Conjunctive management of groundwater and surface water using Honey-Bee mating algorithm. MSc Thesis, Isfahan University of Technology, Iran. (In Persian with English abstract)
- Kardan Moghadam H and Banihabib ME, 2017. Investigation of interference of salt water in desert aquifers (case study: South Khorasan, Saryan aquifer). *Water and Soil* 31(3): 673-688. (In Persian with English abstract)
- Kolahdoozan A, Dinpajooh Y, Mirabbasi Najafabadi R, Asadi E and Darbandi S, 2015. Effect of Zayandehrood river dry becoming on Najafabad aquifer oscillations. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 46(1): 81-93. (In Persian with English abstract)
- Lalehzari R and Abbaslou H, 2016. Simulating the effect of optimal water allocation on groundwater in monthly stress periods (Baghmalek plain, Khuzestan province). *Water and Soil Science-University of Tabriz*, 26(4.1): 307-320. (In Persian with English abstract)
- Lalehzari R and Kerachian R, 2017. Quantity and quality modeling of groundwater flow in Shahrekord aquifer. *Aquifer and Ganat* 1(1): 26-37. (In Persian with English abstract)
- Nadiri AA, Fijani E, Tsai FTC and Asghari Moghaddam A, 2013. Supervised committee machine with artificial intelligence for prediction of fluoride concentration. *Journal of Hydroinformatics* 15(4): 1474-1490.
- Nadiri AA, Sadeghi Aghdam F and Asghari Moghaddam A, 2015. Using intelligence committee fuzzy logic model to estimate arsenic in water resources of Sahand dam basin. *Geosciences Scientific Quarterly Journal* 25(97): 397-406. (In Persian with English abstract)
- Nayak PC, Rao YS and Sudheer KP, 2006. Groundwater level forecasting in a shallow aquifer using artificial neural network approach. *Water Resources Management* 20(1): 77-90.
- Peralta RC, Forghani A and Fayad H, 2014. Multiobjective genetic algorithm conjunctive use optimization for production, cost, and energy with dynamic return flow. *Journal of Hydrology* 511: 776-785.
- Sadeghfam S, Hassanzadeh Y, Khatibi R, Nadiri AA and Moazamnia M, 2019. Groundwater remediation through pump-treat-inject technology using optimum control by artificial intelligence (OCAI). *Water Resources Management* 33(3):1123-1145.
- Safavi HR and Enteshari S, 2016. Conjunctive use of surface and ground water resources using the ant system optimization. *Agricultural Water Management* 173: 23-34.

- Srekanth PD, Geethanjali N, Sreedevi PD, Ahmed S, Kumar NR and Jayanthi PK, 2009. Forecasting groundwater level using artificial neural networks. *Current Science* 933-939.
- Vaheddoost B, Rezaie H and Behmanesh J, 2016. Effect of underground dam construction on discharge of qanats, using Modflow model (case study: Soofi-Makoo). *Water and Soil Science-University of Tabriz*, 26(4.1): 295-305. (In Persian with English abstract)