

مدل‌بندی پاسخ سیستم آب‌زیرزمینی به تغییرات مصرف و رواناب سطحی

سامان معروف پور^{۱*}، احمد فاخری فرد^۲، جلال شیری^۳

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۲۵

۱- دانشجوی دکتری مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب دانشگاه تهران

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه تبریز

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: S.Maroufpoor@ut.ac.ir

چکیده

بررسی تغییرات سطح آب‌زیرزمینی در برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب هر منطقه از اهمیت فراوانی برخوردار است. در تحقیق حاضر از عکس‌العمل سیستم آب‌زیرزمینی نسبت به مصارف و دبی جریان سطحی به‌عنوان ورودی‌های مدل‌های رگرسیون غیرخطی و برنامه‌ریزی بیان ژن جهت برآورد سطح آب‌زیرزمینی استفاده شد. بدین‌منظور از داده‌های ماهانه مصارف، دبی جریان سطحی و سطح آب‌زیرزمینی در طول دوره آماری ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۰ در دشت بمرماشیر (استان کرمان) استفاده گردید. با تحلیل همبستگی متقاطع مشخص شد که دبی جریان سطحی با تأخیر ۴ ماهه و مصارف به‌صورت هم‌زمان بیشترین تأثیر را بر سطح آب‌زیرزمینی داشتند. سپس رابطه کلی بین این سه متغیر از طریق دو معادله مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و رگرسیون غیرخطی به‌دست آمد. برای برآورد مقادیر سطح آب‌زیرزمینی در آینده، نخست مصارف و دبی جریان سطحی به‌ترتیب با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و توماس - فیرینگ پیش‌بینی شدند، سپس با قرار دادن در معادلات پیشنهادی، مقادیر سطح آب‌زیرزمینی پیش‌بینی گردید. نتایج نشان داد در حالت استفاده از داده‌های مشاهداتی با اختلاف اندک (RMSE و MAE به ترتیب ۰/۷۹۳ و ۰/۶۳۶ متر)، مدل GEP بهتر از مدل رگرسیونی عمل کرده اما در حالت استفاده از داده‌های پیش‌بینی شده توسط توماس فیرینگ و شبکه عصبی مدل رگرسیونی با داشتن RMSE و MAE به ترتیب ۱/۴۳۷ و ۱/۱۱۸ متر برآوردی دقیق‌تر از سطح آب‌زیرزمینی در دشت مورد مطالعه داشته‌است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی بیان ژن، رگرسیون غیرخطی، روش توماس فیرینگ، سطح آب زیرزمینی، شبکه عصبی مصنوعی

Modeling the Groundwater System Response to Variations of the Consumption and Surface Discharge

S Maroufpoor^{1*}, A Fakheri-Fard², J Shiri³

Received: 15 September 2015 Accepted: 21 May 2016

1- Ph.D. Student, Water Resources Management and Planning, University of Tehran, Iran

2- Professor, Water science and Engineering, University of Tabriz, Iran

3- Assistant Professor, Water science and Engineering, University of Tabriz, Iran

*Corresponding Author, Email: S.Maroufpoor@ut.ac.ir

Abstract

Investigating groundwater level variations is very important for sustainable management and planning of water resources. In the present study, groundwater system response to the consumptions and surface water discharge were utilized as input variations of nonlinear regression and gene expression programming models to estimate groundwater table. The used data consisted of monthly consumption amounts, surface discharge rates and groundwater levels of Bam Normashir plain (Kerman province) during the period of 2002 to 2011. The cross-correlation analysis indicated that 12 lagged monthly surface discharge as well as the current monthly consumption values had the highest impact on groundwater level fluctuations. The global relationship between these three variables was obtained using the two equations produced by ordinary nonlinear regression and gene expression programming (GEP) model. For estimating the groundwater level fluctuations, the consumption magnitudes and surface discharge values were predicted using artificial neural network (ANN) and Thomas-Firing methods, respectively. Then, the values were putted in the regression-based equations to predict the groundwater level. The obtained result revealed that in the case of using observational data, the performance of GEP was slightly better than regression models (RMSE and MAE values were 0.793, 0.636 meter respectively), while by use of the data produced by employing Thomas-Firing and ANN, the regression models gave a promising result with RMSE and MAE values of 1.437 and 1.118 meter, respectively.

Keywords: Artificial neural network, Gene expression programming, Groundwater level, Nonlinear regression, Thomas-Firing method

مقدمه

در طی دهه‌های اخیر به دلیل افزایش تقاضای آب و کاهش سرانه منابع آب تجدید شونده، نگرانی‌های زیادی ایجاد شده و چگونگی استفاده از این منابع به شکل مطلوب، موثر و کارآمد برای تضمین توسعه پایدار، یکی از مهم‌ترین موضوعات مطرح در محافل

بین‌المللی است. منابع آب زیرزمینی همواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و مطمئن‌ترین منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار رفته و استحصال آب از این منابع نسبت به اقلیم‌های دیگر حائز اهمیت ویژه‌ای است. مدیریت و بهره‌برداری بهینه این منابع بدون شناخت آنها امکان‌پذیر نیست. بررسی نوسانات

رسیدند که شبکه عصبی بهتر عمل کرده اگرچه مدل رگرسیونی را نیز به‌عنوان مدلی مقرون به‌صرفه معرفی کردند. پژوهش سوریاناریانا و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد، آنالیز موجک می‌تواند دقت نتایج ماشین بردار پشتیبان را در برآورد سطح آب‌زیرزمینی افزایش دهد. همچنین دریافتند که متغیرهای دما و بارش نیز باعث بهبود نتایج ماشین بردار پشتیبان خواهد شد. افندی و وتانابه (۲۰۰۷) با استفاده از داده‌های روزانه سطح آب به کنترل افت سطح آب‌زیرزمینی پرداختند. آنها با استفاده از مدل‌های پایه شعاعی، فازی-عصبی و شبکه عصبی مصنوعی سطح آب را بر اساس تاخیر زمانی از یک تا ۷ روز مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش گام زمانی از دقت مدل‌ها کاسته می‌شود. آنها در تحقیقات‌شان اثرات پارامترهای تاثیرگذار بر تغییرات سطح آب را در نظر گرفتند و تنها از اطلاعات سطح آب در روزهای قبل جهت پیش‌بینی سطح آب استفاده نمودند. همچنین ابراهیمی و رجایی (۲۰۱۶) از آنالیز موجک برای آموزش در مدل‌های شبکه عصبی، رگرسیون چند خطی و ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای پیش‌بینی سطح آب‌زیرزمینی در دشت قم استفاده کردند و نتایج نشان داد که شبکه عصبی با بهره‌گیری از آنالیز موجک بهتر از دیگر مدل‌ها عمل می‌کند. کاوه‌کار و همکاران (۱۳۹۲) به‌منظور پیش‌بینی روزانه سطح آب دریاچه ارومیه از مدل GEP (مدل برنامه‌ریزی بیان ژن) استفاده نمودند، نتایج حاکی از توانایی بالای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن بود. از دیگر مطالعات انجام گرفته با مدل GEP جهت برآورد سطح آب‌زیرزمینی می‌توان به دو پژوهش قربانی و همکاران (۲۰۱۰) و همچنین پژوهش ماکارینسکی و همکاران (۲۰۰۴) که مدل برنامه‌ریزی بیان ژن را برای برآورد سطح آب‌زیرزمینی با دقت

سطح آب‌زیرزمینی ابزاری مفید در تعیین اندازه تغییرات کوتاه‌مدت و بلندمدت سفره در اقلیم‌های متفاوت به‌واسطه برداشت و تغذیه می‌باشد. مدل‌سازی نوسانات سطح آب‌زیرزمینی به‌دلیل ماهیت و عدم قطعیت در مؤلفه‌های آن پیچیده است (نایاک و همکاران ۲۰۰۶). تشخیص رفتار آبخوان به‌ازای تغییر در پارامترهای موثر بر آن مانند بارندگی، دما، جریان آب سطحی، تبخیر-تعرق و برداشت آب به مدیران این امکان را می‌دهد تا بتوانند در شرایط خاص تصمیمات موثری را اتخاذ کنند. مطالعات متعددی به منظور بررسی وضعیت منابع آب‌زیرزمینی انجام شده است. یکی از روش‌های پیش‌بینی و کنترل سطح ایستابی، استفاده از معادلات رگرسیونی است. کارآموز و همکاران (۲۰۰۴) به‌منظور تهیه مدل بهینه استفاده تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی برای اراضی کشاورزی جنوب تهران، مدل ریاضی آب‌زیرزمینی منطقه را به‌منظور شبیه‌سازی تغییرات سطح آب‌زیرزمینی تهیه نمودند. آنها رابطه آماری بین پارامترهای متاثر بر نوسانات سطح ایستابی را به‌صورت ماهانه تعیین و براساس آن مدل بهینه‌سازی اجرا نمودند. به‌منظور تعیین معادلات رگرسیونی، مدل ریاضی به‌صورت مکرر اجرا شده و براساس میزان ورودی و خروجی برای هر مدل، معادله رگرسیونی بین آنها استخراج گردید. پارامترهای مورد استفاده در این معادلات رگرسیونی غیرخطی شامل دبی استحصال از چاه‌ها به‌صورت سالانه و بارندگی ماهانه بوده است. ساهو و جها (۲۰۱۳) به بررسی برآورد سطح آب‌زیرزمینی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون چند خطی پرداختند و با لحاظ کردن همه پارامترهای مهمی که در سطح آب‌زیرزمینی تأثیر دارد به این نتیجه

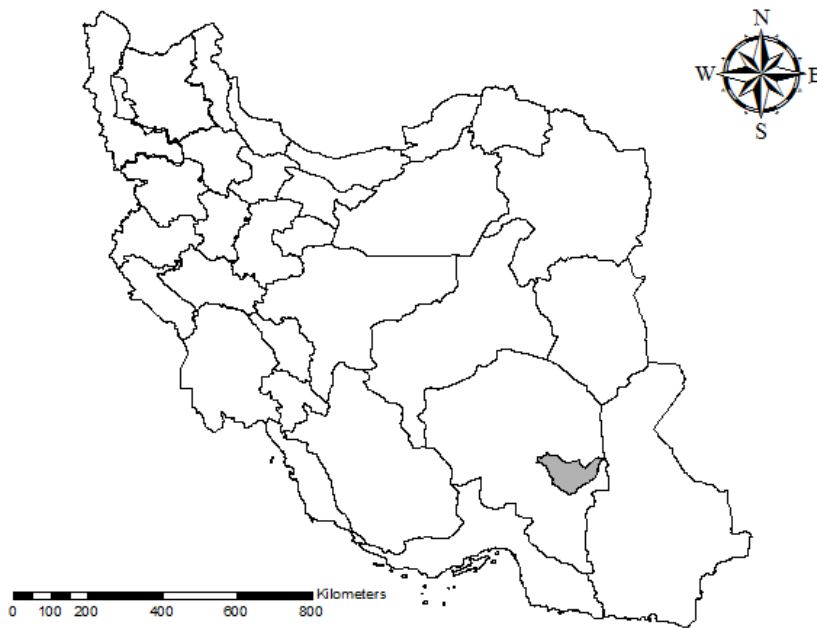
مناسب پیشنهاد نمودند، می‌توان اشاره کرد. هدف تحقیق حاضر مدل‌بندی سطح آب‌زیرزمینی بارویکرد رفع مشکلات تحقیقات انجام شده قبلی می‌باشد که به‌طور خلاصه عبارتند از: در بیشتر تحقیقات انجام شده در ارتباط با مدل‌سازی سطح آب‌زیرزمینی با استفاده از متغیرهای مؤثر، مدت زمان عکس‌العمل محیط متخلخل به این متغیرها در نظر گرفته نشده است و به‌صورت هم‌زمان مقابل هم قرار گرفته‌اند. این مسئله منجر به عدم ارتباط منطقی محیط‌ها می‌گردد. همچنین در تعدادی از مطالعات انجام شده داده‌های مورد استفاده در مقیاس روزانه و یا سالانه بود در حالی که تغییرات سطح آب به‌صورت ماهانه جدی بوده به‌طوری که در ماه‌های زمستان روند صعودی و در ماه‌های تابستان روند نزولی دارد (کورتولوس و رازاک ۲۰۱۰، افندی و وتانابه ۲۰۰۷، کاوه‌کار و همکاران ۱۳۹۲). استفاده از پیش‌بینی‌های ماهانه به مدیران کمک می‌کند به‌منظور کنترل میزان برداشت آب از سفره تصمیمات مؤثرتری اتخاذ نمایند. از آنجا که امکان کاهش برداشت آب در تعدادی از ماه‌های سال امکان‌پذیر است لذا عکس‌العمل آبخوان در تغییر سطح آب به‌صورت ماهانه مؤثرتر از سالانه و یا روزانه می‌باشد. با توجه به سوابق مطالعات انجام شده می‌توان دریافت که شبکه‌های عصبی مصنوعی تاکنون به‌طور گسترده‌ای در حل مسائل مختلف از جمله شبیه‌سازی و پیش‌بینی‌های رفتار آبخوان به‌کار برده شده‌اند (محتشم و همکاران ۱۳۸۹، لونیس و همکاران ۲۰۰۵، کولیالی و همکاران ۲۰۰۱). بنابراین شبکه‌های عصبی گزینه‌ای کارا در مدل‌سازی متغیرهای کیفی و کمی منابع آب به‌شمار می‌آیند. اما این نکته که این

شبکه‌ها رابطه خاصی برای پیش‌بینی در اختیار مدیران قرار نمی‌دهند، فراموش شده است و این امر با توجه به این که همیشه مدیریت آبخوان‌ها به روابط معلوم نیاز دارد، اهمیت می‌یابد. لذا در این تحقیق، از رواناب سطحی و مصارف چاه‌ها در مقیاس زمانی ماهانه استفاده، زمان‌های عکس‌العمل محیط‌ها در نظر گرفته‌شده و روابط مستخرج حاوی تأخیرهای لازم خواهد بود و پیش‌بینی سطح آب‌زیرزمینی از طریق مدل رگرسیونی و رابطه به‌دست آمده از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن انجام می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

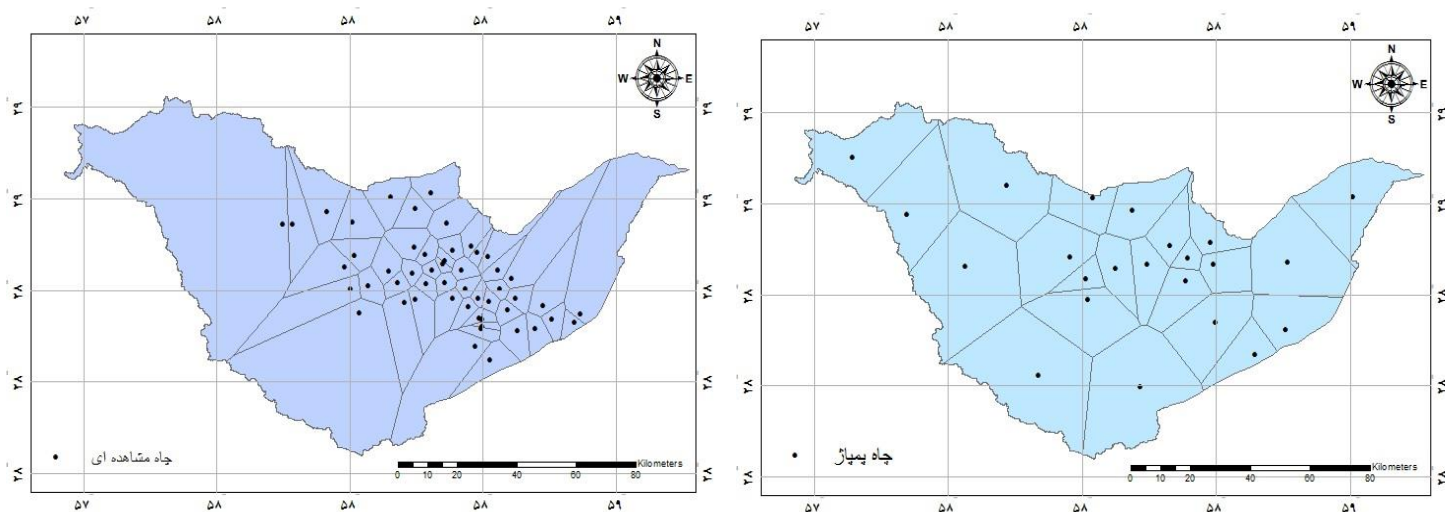
منطقه مورد مطالعه در این تحقیق دشت بمرماشیر واقع در مختصات "۳۴' ۳۵° ۵۷ تا "۰' ۲۹° ۵۹ طول جغرافیایی و "۲۹' ۲۴° ۲۸ تا "۱۱' ۳۰° عرض جغرافیایی در استان کرمان می‌باشد که ارتفاع متوسط دشت از سطح دریا ۹۶۰ متر و مساحت آن ۹۶۵۸/۱۸ کیلومتر مربع می‌باشد. این محدوده یکی از مناطق کویری ایران به‌شمار می‌آید، زیرا که حاشیه شمالی آن به کویر لوت ختم شده و از این جهت دارای تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های کم باران می‌باشد. میزان نزولات جوی تقریباً ناچیز است به‌طوری که متوسط بارندگی سالانه آن کمتر از ۵۰ میلی-متر می‌باشد. طبق آماربرداری سال ۱۳۹۰ مجموع تخلیه منابع آبی دشت بمرماشیر ۶۷۸/۴۵۷ میلیون مترمکعب می‌باشد. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه در استان کرمان را نشان می‌دهد.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه.

مقاوتی جهت رساندن سیستم به حالت تعادل می‌باشند لذا با تأخیر دادن ماهانه رواناب سطحی رابطه منطقی به‌دست آمد. برای پی بردن به ساختار مدل بهینه حاکم بر مصرف - رواناب سطحی - سطح آب‌زیرزمینی به دلیل عدم هم‌زمانی تأثیر این متغیرها به هم که محیط متخلخل سفره باعث می‌شود، تأخیرهای مختلف بررسی و سپس رابطه عمومی پیشنهاد گردید که در آن سطح آب‌زیرزمینی به‌عنوان متغیر وابسته، تابعی از مصارف و رواناب سطحی می‌باشد. برای اطمینان از کارایی مدل‌های پیشنهادی، مصارف و رواناب سطحی پیش‌بینی شده و در رابطه حاکم بر سیستم قرار گرفت تا نتایج برآورد سطح آب‌زیرزمینی با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه گردد. در این راستا طبق توصیه عبدالله‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) برای پیش‌بینی رواناب سطحی و مصارف به‌ترتیب از مدل‌های توماس فیرینگ و شبکه عصبی استفاده گردید.

در این تحقیق از داده‌های سطح آب زیرزمینی، مصارف و رواناب سطحی در طول آماری سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۰ استفاده شد. نواقص آماری بسیار محدود در داده‌ها با استفاده از روش‌های آماری رفع و داده‌های پرت شناسایی و حذف گردید. داده‌های مورد نظر با استفاده از پلیگون‌بندی تیسن در محیط GIS ناحیه‌ای شدند تا آمار معادل هر متغیر در طول آماری مورد مطالعه به‌دست آید. برای ناحیه‌ای نمودن هر متغیر پس از تیسن‌بندی، وزن‌های مربوط به هرچاه (مساحت) از محیط GIS استخراج و با اعمال این وزن‌ها به کل چاه‌ها، مقادیر معادل محاسبه گردید. شکل ۲ تیسن‌بندی چاه‌های پمپاژ و پیزومترها را به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل داده‌ها در حالت هم‌زمان نشان داد که رابطه منطقی برای متغیر رواناب سطحی وجود ندارد که این امر از نظر فیزیکی منطقی به‌نظر می‌رسد، زیرا پاسخ سیستم نسبت به تغییرات متغیرهای مؤثر، هم‌زمان اتفاق نمی‌افتد و متغیرها دارای فازهای زمانی



شکل ۲- پلیگون بندی نسیس برای پیژومترها (شکل چپ) و چاه‌های پمپاژ (شکل راست).

برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP^۱)

برنامه‌ریزی بیان ژن توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ ارائه شد (فریرا ۲۰۰۱). در این برنامه، کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، مشابه با آنچه که در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و اشکال متفاوت، مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک، ترکیب می‌شوند. اولین مرحله در الگوریتم مدل، تولید جمعیت اولیه از راه حل‌ها است. این موضوع می‌تواند به وسیله فرآیند تصادفی و یا با استفاده از مقداری اطلاعات درباره مسأله انجام شود. سپس کروموزوم‌ها به صورت بیان درختی اظهار شده، که این هم مطابق با یک تابع برازش ارزیابی می‌گردد تا میزان مناسب بودن یک راه حل در حیطه مسأله تعیین گردد. معمولاً تابع برازش به وسیله پردازش تعدادی نمونه از مسأله هدف، که موارد برازش نیز نامیده می‌شوند، ارزیابی می‌گردد. اگر کیفیت رضایت‌بخش از یک راه حل پیدا شود و یا نسل‌ها به

تعداد معینی برسد، تکامل متوقف شده و بهترین راه حل یافت شده تا به حال، گزارش داده می‌شود. از طرف دیگر اگر شرایط توقف یافت نشود، بهترین راه حل از نسل حاضر نگه داشته می‌شود (به معنای نخبه‌گزینی است). گزینش یا انتخاب، نقش بقاء شایستگی را انجام می‌دهد و بر اساس آن بهترین افراد شانس بهتری برای تولید فرزندان دارند. کل این روند برای چندین نسل تکرار می‌شود و با پیش رفتن نسل به جلو، انتظار می‌رود که کیفیت جمعیت نیز به طور متوسط بهبود یابد (فریرا ۲۰۰۶). در برنامه‌ریزی بیان ژن از عملگرهای مختلفی نظیر جهش^۲ و تلاقی^۳ استفاده می‌شود. این مدل، از روش معروف چرخ رولت^۴، برای انتخاب افراد استفاده می‌کند. هدف عملگر جهش، به‌سازی تصادفی داخل کروموزوم‌های معینی است. خصوصیت این عملگر این است که برای جلوگیری از ایجاد افراد معیوب از نظر قواعد، برخی عملیات بدون نقص را اجرا

^۲Mutation

^۳Crossover

^۴Roulette wheel

^۱Gene expression programming

q_j , q_{j+1} : مقادیر رواناب سطحی ماهانه در ماه j و $j+1$ می‌باشد.

q_{avj} , q_{avj+1} : میانگین مقادیر رواناب سطحی ماهانه در ماه j و $j+1$ می‌باشد.

$$q_{j+1} = q_{avj+1} + b_{j,j+1}(q_j - q_{avj}) + t_j \sigma_{j+1} \sqrt{1 - r_{j,j+1}^2} \quad [1]$$

t_j : عدد نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس یک.

$b_{j,j+1}$: ضریب خطی‌سازی برای تخمین رواناب سطحی است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$b_{j,j+1} = r_{j,j+1} \frac{\sigma_{j+1}}{\sigma_j} \quad [2]$$

در روابط فوق، $r_{j,j+1}$ ضریب همبستگی مقادیر رواناب سطحی بین ماه j و $j+1$ است. همچنین q_j و q_{j+1} به ترتیب انحراف معیار برای ماه‌های j و $j+1$ می‌باشد. با محاسبه پارامترهای مورد نیاز و قرار دادن آن‌ها در رابطه ۲ می‌توان رواناب سطحی را در آینده پیش‌بینی کرد.

مدل رگرسیونی

مدل‌های رگرسیونی، یک نگاهت خطی یا غیرخطی از یک متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل ایجاد می‌کنند. با در دست داشتن یک رابطه رگرسیونی و معلوم بودن متغیرهای مستقل آن می‌توان متغیر وابسته را برآورد کرد (فریدیک و وایلد ۲۰۰۳). روابط سه متغیر با تأخیرهای مناسب به صورت زیر به دست آمد:

می‌نماید. در این مدل از تلاقی تک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای استفاده می‌شود. تلاقی دو نقطه‌ای تا حدی جالب‌تر است چون می‌تواند نواحی کدگذاری نشده داخل کروموزوم‌ها را به مراتب زیادی روشن و خاموش کند. به علاوه در این روش، نوع دیگری از تلاقی، به نام ترکیب ژنی نیز اجرا می‌شود که در آن ژن‌ها به طور کامل ترکیب می‌شوند. این عملگر، به طور تصادفی ژن‌ها را در موقعیت یکسانی در دو کروموزوم والد انتخاب می‌کند تا دو فرزند جدید را تشکیل دهد. از دیگر عملگرهای مورد استفاده می‌توان عملگر ترانهش^۱ را نام برد. در این روش پدیده‌های مختلف با استفاده از مجموعه‌ای از توابع و مجموعه‌ای از ترمینال‌ها، مدل‌سازی می‌شوند. مجموعه توابع، معمولاً شامل توابع اصلی حسابی $\{+, -\}$ $\{\times, \div\}$ ، توابع مثلثاتی یا هر نوع تابع ریاضی دیگر $\{\sqrt{\quad}, x^2\}$ $\{\exp, \log, \sin, \cos, \dots\}$ و یا توابع تعریف شده توسط کاربر است که معتقد است، می‌توانند برای تفسیر مدل مناسب باشند. مجموعه ترمینال‌ها، از مقادیر ثابت و متغیرهای مستقل مسأله تشکیل شده‌اند (فریرا ۲۰۰۱). در تحقیق حاضر از نرم‌افزار GeneXproTools4 استفاده شد.

مدل توماس-فیرینگ

این مدل یک دنباله از زنجیره مارکوف است که فرض می‌کند مقادیر دبی ماهانه فقط به دو متغیر میانگین و انحراف معیار مقادیر همان ایستگاه وابسته است. در این روش هر داده دبی ماهانه فقط به داده دبی ماه قبل از خود وابسته است. شکل کلی معادله حاکم به صورت زیر بیان می‌شود (الیزابت و همکاران ۲۰۱۰).

که در این رابطه:

^۱Transposition

4-t، Q_t مصارف در زمان t و X متغیر مستقل رواناب مصرف می‌باشند.

در ماه‌های که مصرف از چاه‌ها افزایش یافته، سطح آب‌زیرزمینی پایین رفته و در ماه‌های که مصرف کاهش یافته، سطح آب‌زیرزمینی بالا آمده است. برای پیدا کردن تعداد تأخیر بهینه کورلوگرام تقاطعی بین مصارف و سطح آب‌زیرزمینی و همچنین بین رواناب سطحی و سطح آب‌زیرزمینی در شکل ۴ رسم شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که مصارف به صورت هم‌زمان دارای بیشتر همبستگی با سطح آب‌زیرزمینی می‌باشد و برای رواناب سطحی بیشترین همبستگی با سطح آب‌زیرزمینی در تأخیر ۴ ماهه مشاهده می‌شود. معادله ۴ رابطه مصارف- سطح آب‌زیرزمینی به صورت هم‌زمان و رواناب سطحی- سطح آب‌زیرزمینی با اعمال تأخیر ۴ ماهه را نشان می‌دهد که به ترتیب در آن‌ها مصارف و رواناب سطحی متغیر مستقل و سطح

$$y_t = a + bR_{t-4} + cQ_t \quad [۳]$$

$$y_t = a + bx \quad [۴]$$

آب‌زیرزمینی متغیر وابسته می‌باشد که تفاوت در ضرایب ایجاد خواهد شد. شکل ۵ نتایج برآورد با استفاده از رابطه ۴ را نشان می‌دهد که با توجه به آن می‌توان دریافت که رابطه بین مصارف با سطح آب‌زیرزمینی قوی‌تر از رابطه رواناب سطحی با سطح آب‌زیرزمینی می‌باشد. شکل ۶ مقادیر مشاهداتی و محاسباتی سطح آب‌زیرزمینی با استفاده از معادله ۳ که رابطه بین متغیرهای مصارف به صورت هم‌زمان و رواناب سطحی با تأخیر ۴ ماهه به عنوان متغیرهای مستقل با سطح آب‌زیرزمینی (متغیر وابسته) را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۱ مقادیر باند اطمینان ۹۵ درصد را برای روابط رگرسیونی استخراج شده نشان می‌دهد، که با توجه به آن می‌توان معنی‌داری ضرایب را نتیجه گرفت.

در روابط فوق، y_t سطح آب‌زیرزمینی (متر) در زمان t (ماه)، R_{t-4} رواناب سطحی (مترمکعب بر ثانیه) در زمان $t-4$ ، a ، b و c ضرایب رابطه‌ها می‌باشند. رابطه کلی برای برآورد سطح آب‌زیرزمینی با استفاده از مصرف همان ماه و رواناب سطحی با تأخیر ۴ ماهه در معادله ۳ آمده است. معادله ۴ رابطه بین مصارف- سطح آب‌زیرزمینی و رواناب سطحی - سطح آب‌زیرزمینی را نشان می‌دهد.

معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی دقت پیش‌بینی‌های سطح آب‌زیرزمینی شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (r)، ریشه میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE) و میانگین خطای مطلق^۲ (MAE) محاسبه شدند. مقادیر شاخص‌های مذکور از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad [۵]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad [۶]$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad [۷]$$

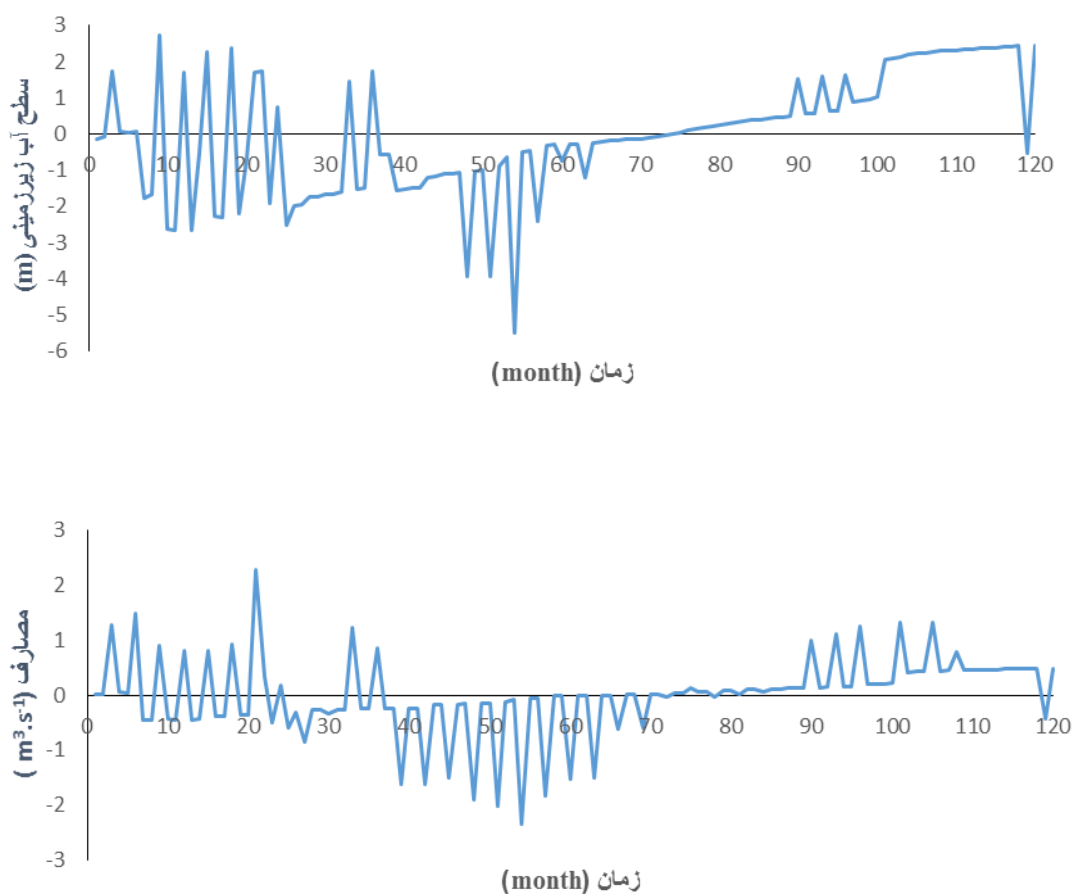
در روابط فوق، x_i مقدار اندازه‌گیری شده در گام زمانی i ام، y_i مقدار پیش‌بینی شده در همان زمان، n تعداد گام زمانی (تعداد داده‌ها)، \bar{x} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و \bar{y} میانگین نظیر برای مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد.

نتایج و بحث

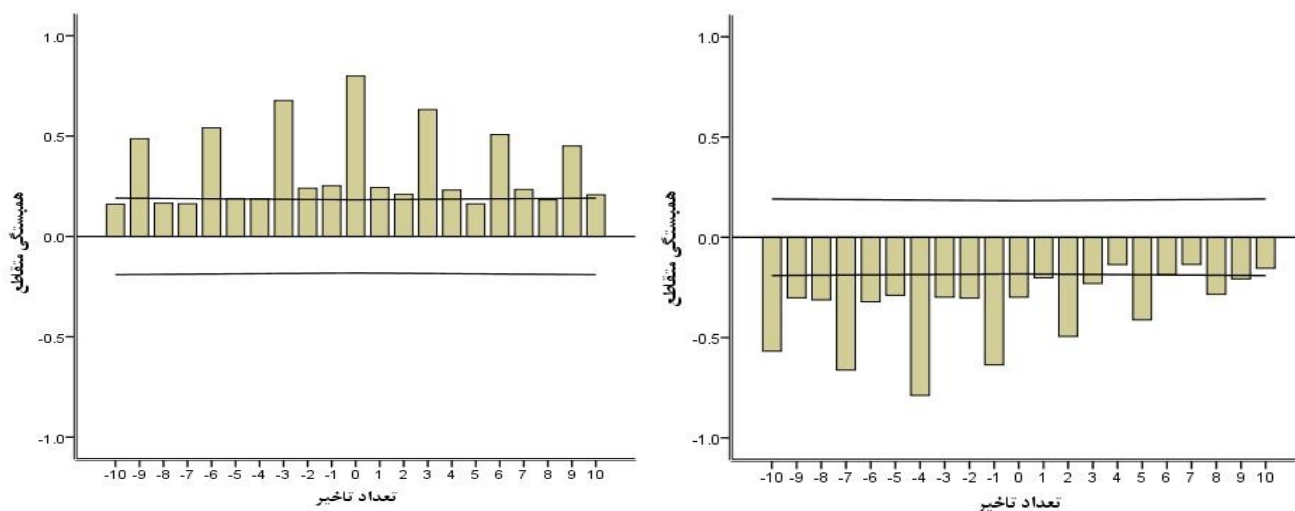
در ابتدا اختلاف مقادیر سطح آب‌زیرزمینی و مصارف ناحیه‌ای از میانگین محاسبه شد و نمودار آن در شکل ۳ آمده است. با توجه به شکل ۳ می‌توان گفت

^۱ Root mean square error

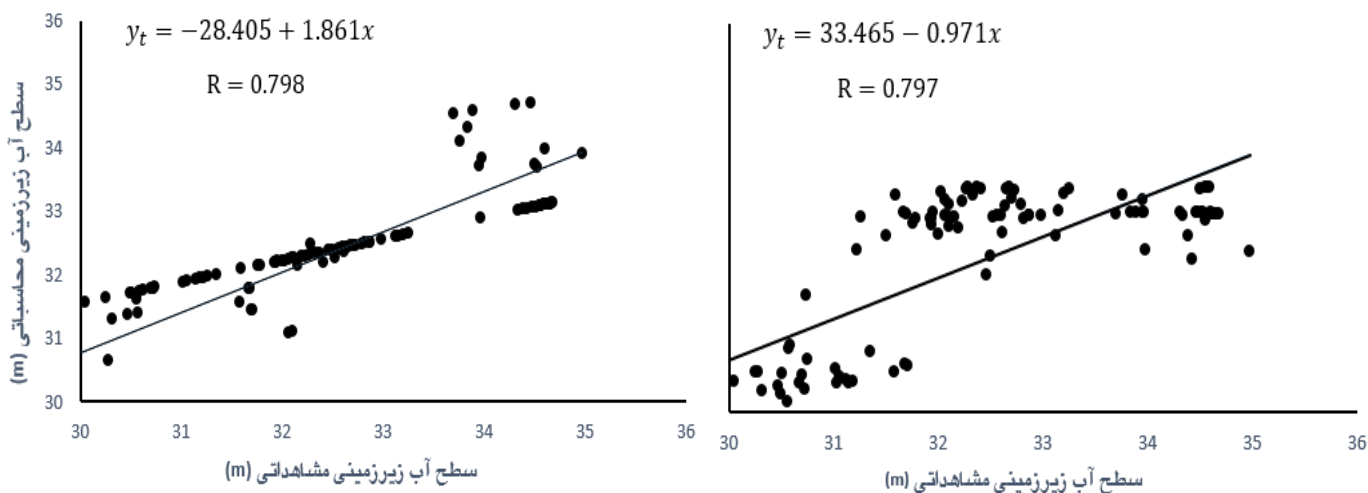
^۲ Mean absolute error



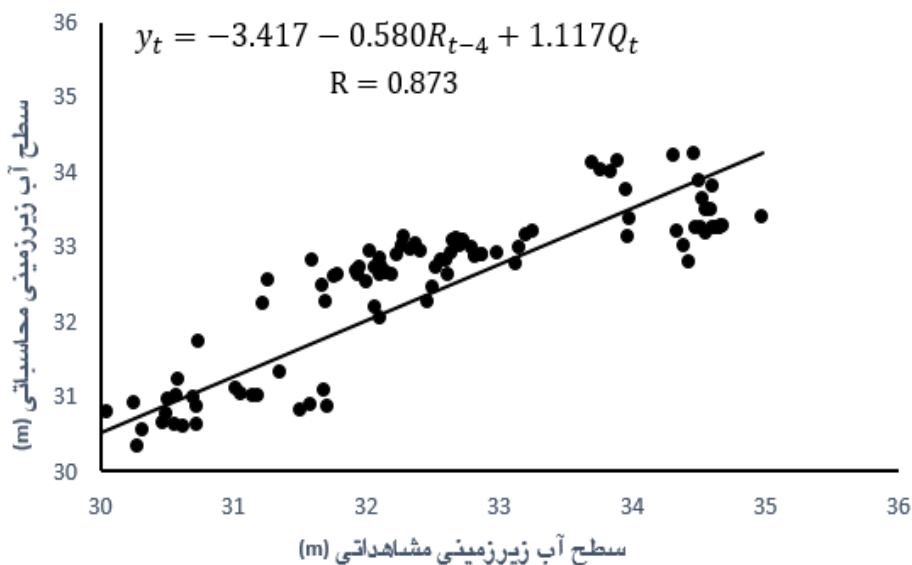
شکل ۳- سری آنومالی مصارف و سطح آب زیرزمینی.



شکل ۴- همبستگی متقابل بین مصارف و سطح آب زیرزمینی (شکل چپ)، بین رواناب سطحی و سطح آب زیرزمینی (شکل راست).



شکل ۵- نمودار سطح آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از مصارف (شکل چپ)، با استفاده از رواناب سطحی (شکل راست).



شکل ۶- نمودار سطح آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از مصارف و رواناب سطحی

جدول ۱- باند اطمینان ۹۵ درصد ضرایب رگرسیونی.

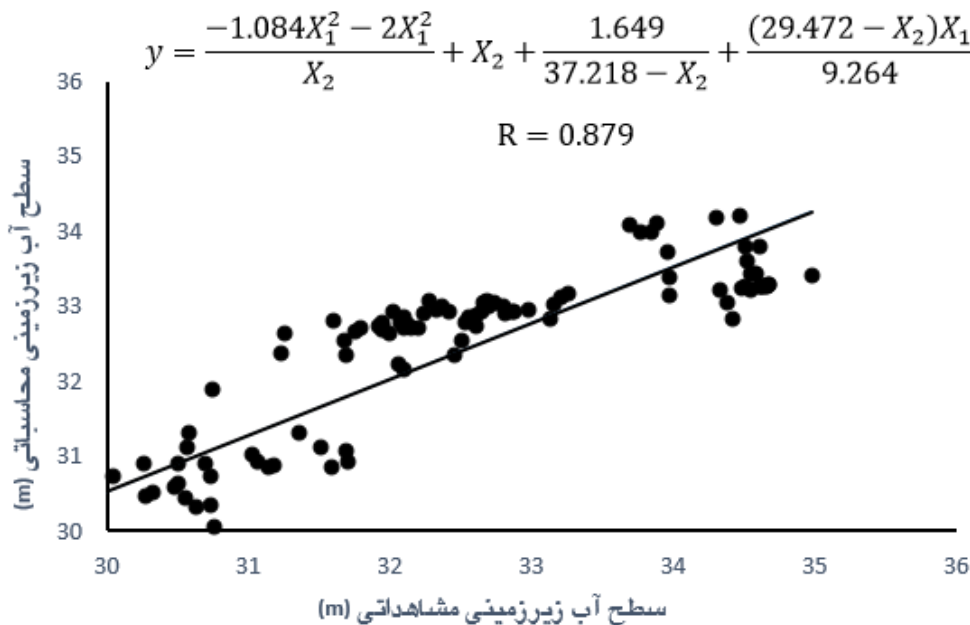
رابطه رگرسیونی	ضرایب	مقدار ضرایب	باند اطمینان ۹۵٪
سطح آب - مصارف	a	-۲۸/۴۰۵	-۱۹/۸۹۹ - -۳۶/۹۱۲
	b	۱/۸۶۱	۲/۱۲۲ - ۱/۶۰۰
سطح آب - جریان سطحی	a	۳۳/۴۶۵	۳۳/۷۲۰ - ۳۳/۳۰۰
	b	-۰/۹۷۱	-۰/۸۳۴ - -۱/۱۰۸

-۱۲/۸۶۱- ۶/۰۲۶	-۳/۴۱۷	a	سطح آب - مصارف -
-۰/۷۳۰- -۰/۴۳۱	-۰/۵۸۰	b	جریان سطحی
۰/۱-۸۳۱/۴۰۳	۱/۱۱۷	c	

جدول ۲- مقادیر پارامترهای به‌کارگرفته شده در برنامه‌ریزی بیان ژن.

تعداد کروموزوم‌ها	۳۰	نرخ برگشت	۰/۱	نرخ ترکیب تک نقطه‌ای	۰/۳
طول هر راس	۸	نرخ ترانهش ژنی	۰/۱	نرخ ترکیب دو نقطه‌ای	۰/۳
تعداد ژن‌ها	۳	نرخ جهش	۰/۰۴	نرخ ترکیب ژنی	۰/۱

$$y = \frac{-1.084X_1^2 - 2X_1^2}{X_2} + X_2 + \frac{1.649}{37.218 - X_2} + \frac{(29.472 - X_2)X_1}{9.264} \quad [8]$$



شکل ۷- نمودار سطح آب‌زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از رابطه مستخرج از مدل GEP.

جدول ۳- ارزیابی رابطه‌های پیشنهادی توسط مدل‌های رگرسیونی و GEP.

MAE (m)	RMSE (m)	R	مقادیر رواناب سطحی	مقادیر مصارف	روش به‌کار رفته
۰/۶۴۶	۰/۷۹۴	۰/۸۷۳	مشاهداتی	مشاهداتی	رابطه رگرسیونی پیشنهادی
۰/۶۳۶	۰/۷۹۳	۰/۸۷۹	مشاهداتی	مشاهداتی	رابطه مستخرج از GEP
۱/۱۱۸	۱/۴۳۷	۰/۴۷۲	تخمین زده شده	تخمین زده شده	رابطه رگرسیونی پیشنهادی
۱/۱۳۵	۱/۴۶۱	۰/۴۶۹	تخمین زده شده	تخمین زده شده	رابطه مستخرج از GEP

محاسباتی با مشاهداتی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این دو حالت در جدول ۳ آمده است.

نتایج جدول ۳ مناسب بودن هر دو نوع رابطه را نشان می‌دهد اما با اختلاف اندک می‌توان گفت که رابطه رگرسیونی در حالت برآورد سطح آب‌زیرزمینی با مقادیر تخمینی مصرف و رواناب سطحی به ترتیب توسط شبکه عصبی و روش توماس فیرینگ، از دقت بیشتر برخوردار است. اما در حالت استفاده از مقادیر مشاهداتی رابطه مستخرج از مدل GEP بهتر عمل کرده است. در پژوهش کاوه‌کار و همکاران (۱۳۹۲) مدل GEP از دقت کافی برای پیش‌بینی برخوردار بود که این نتیجه با پژوهش حاضر که نشان داد با اختلاف اندک (در حالت استفاده از داده‌های واقعی) مدل GEP بهتر عمل کرده، هم‌سو می‌باشد. هرچند در پژوهش کاوه‌کار و همکاران (۱۳۹۲) حالت دیگری بررسی نشد که قدرت روابط را با داده‌های تخمینی و همچنین روابط نظیر روابط رگرسیونی، مشاهده شود. همچنین نتیجه پژوهش حاضر با مطالعه انجام گرفته توسط عبدالله‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) هم‌راستا بوده و در هر دو مطالعه روابط رگرسیونی قابلیت بالایی در مدل‌بندی سطح آب‌زیرزمینی داشته است.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، مدل‌بندی مصارف و رواناب سطحی بر نوسانات سطح آب‌زیرزمینی مورد تحقیق قرار گرفت. در این راستا ۲ رابطه (رگرسیونی و مستخرج از مدل GEP) پیشنهاد گردید. برای پیدا کردن رابطه منطقی بین متغیرهای مستقل (مصارف و رواناب سطحی) و وابسته (سطح آب زیرزمینی) که عکس‌العمل سیستم را در نظر بگیرد از کورلوگرام تقاطعی استفاده گردید. در رابطه‌های پیشنهادی مصارف به صورت هم‌زمان و رواناب سطحی با تاخیر ۴ ماهه بیشترین تاثیر را در برآورد سطح آب‌زیرزمینی داشتند. جهت اطمینان از رابطه‌های ارائه شده در دو حالت (۱- برآورد سطح

استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن به دلیل توانایی ارائه رابطه صریح جهت تخمین سطح آب‌زیرزمینی مدنظر قرارگرفت که این ویژگی آن را از سایر مدل‌ها نظیر شبکه عصبی متمایز می‌کند (کاوه‌کار و همکاران ۱۳۹۲). در این تحقیق، جهت ارائه رابطه ساده و پرکاربرد از ۴ عملگر اصلی $\{+, -, \times, \div\}$ استفاده شد. در مدل GEP برای مدل‌سازی سطح آب‌زیرزمینی با سعی و خطا بهترین تابع تطبیق و تابع ارتباط‌دهنده بر اساس کمینه ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب تابع ریشه نسبی مربعات خطا ($RRSE^1$) و تابع جمع انتخاب شد. به طور خلاصه پارامترهای استفاده شده در هر بار اجرای مدل که به صورت بهینه و پیش‌فرض توسط نرم‌افزار انتخاب می‌شود، در جدول ۲ آمده است. معادله بهینه مدل GEP در رابطه ۸ آمده است که در آن X_1 ، X_2 و y به ترتیب رواناب سطحی با تاخیر ۴ ماه، مصارف به صورت هم‌زمان و سطح آب‌زیرزمینی می‌باشد. شکل ۷ مقادیر مشاهداتی و محاسباتی توسط رابطه به دست آمده از مدل GEP (رابطه ۸) را نشان می‌دهد. در این پژوهش رابطه کلی رگرسیونی برای برآورد سطح آب‌زیرزمینی (رابطه ۳) با رابطه مستخرج از مدل GEP مقایسه شد. در این راستا مقایسه در ۲ حالت صورت گرفت. در حالت اول سطح آب‌زیرزمینی با استفاده از تعداد تاخیر بهینه رواناب سطحی و مصارف برآورد گردید و نتیجه با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد.

در حالت دوم، ابتدا مقادیر مصارف و رواناب سطحی به ترتیب با استفاده از شبکه عصبی و روش توماس فیرینگ تخمین زده شد و این مقادیر در رابطه‌های رگرسیونی و به دست آمده از مدل GEP جهت برآورد سطح آب‌زیرزمینی استفاده شد. در نهایت مقادیر

¹ Root relative squared error

بیشتر، عملکرد بهتری را شاهد خواهیم بود، که پژوهش‌هایی همچون پژوهش خاشعی و همکاران (۱۳۹۲) که از طول آماری ۱۹ ساله استفاده کردند و برتری شبکه عصبی را نسبت به رابطه رگرسیونی نتیجه گرفتند، تاییدی بر این مورد است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت در مطالعاتی همچون دشت بمرماشیر که طول داده‌ها کم و نیاز به رابطه مشخص جهت مدیریت می‌باشد لزوماً استفاده از مدل‌های همچون GEP نتایج بهتر از رابطه‌های ساده رگرسیونی در اختیار مدیران قرار نمی‌دهد.

آب‌زیرزمینی با استفاده از مقادیر مشاهداتی مصارف و رواناب سطحی، ۲- برآورد سطح آب‌زیرزمینی توسط مصارف و رواناب سطحی تخمین زده شده به‌وسیله شبکه عصبی و روش توماس فیرینگ) با یکدیگر مقایسه شدند که نتایج برتری رابطه رگرسیونی را در حالت تخمین برای دشت بمرماشیر نشان داد. یکی از دلایل اختلاف اندک رابطه رگرسیونی نسبت به رابطه مستخرج از مدل هوشمند GEP طول آماری کم داده‌ها می‌باشد، چراکه مدل‌های هوشمند نظیر GEP باتوجه به حافظه سیستم عملکرد متفاوت نشان می‌دهند. حافظه سیستم به طول آماری موجود بستگی دارد، و با داشتن حافظه

منابع مورد استفاده

- Abdolahzadeh M, Fakherifard A, Asadi A and Nazemi A.H, 2017. Modeling the Effects of Consumption and Precipitation on the WaterTable Oscillations (Case Study: Ajabshir Aquifer). *Water and Soil Science- University of Tabriz*, 26(1): 97-83. (In Persian)
- Affandi A and Watanabe K, 2007. Daily groundwater level fluctuation forecasting using soft computing technique. *Nature and Science* 5(2): 1-10.
- Coulibaly P, Anctil F, Aravena R and Bobee B, 2001. Artificial neural network modeling of water table depth fluctuations. *Water Resources Research* 37: 885-896.
- Ebrahimi H, Rajaei T, 2016. Simulation of groundwater level variations using wavelet combined with neural network, linear regression and support vector machine. *Global and Planetary Change* 148: 181-191.
- Elizabeth MS, Keith JB and Nick A, 2010. *Hydrology in Practice*. 4th ed, 546 p. Amazon.Co.Uk.
- Ferreira C, 2001. Gene Expression Programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *Complex Systems* 13(2): 87-129.
- Ferreira C, 2006. *Gene Expression Programming: Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence*. Springer, Berlin: Heidelberg New York, 478.
- Frederick GE and Wild KJ, 2003. *Nonlinear Regression*. Wiley-IEEE. 768p.
- Ghorbani MA, Khatibi R, Aytak A, Makarynsky O and Shiri J, 2010. Sea water level forecasting using genetic programming and comparing the performance with artificial neural networks. *Computers & Geosciences* 36: 620-627.
- Ghorbani MA, Makarynsky O, Shiri J and Makarynska D, 2010. Genetic Programming for sea level prediction in an Island Environment. *Journal of Ocean and Climate Systems* 1: 27-35.
- Ioannis N, Daliakopoulos A, Coulibaly P, Ioannis K and Tsanis B, 2005. Groundwater level forecasting using artificial neural networks. *Journal of Hydrology* 309: 229-240.
- Karamouz M, Kerachian R and Zahraie B, 2004. Monthly water resources and irrigation planning: case study of conjunctive use of surface and groundwater resources. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 130(5): 391-402.
- Kavehkar SH, Ghorbani M.A, Ashrafzadeh A and Darbandi S, 2014. Simulation of water level fluctuations using gene expression planning. *Civil Engineering and Environment*, 43(3): 78-72. (In Persian)

- Khasheiy Siyuki A, Ghahreman B and Koochakzade M, 2014. Comparison of Artificial Neural Network Models, ANFIS and Regression in Estimating the Staging Level of the Aquifer in Neishabour Plain. *Irrigation and drainage of Iran*, 7: 10-22. (In Persian)
- Kurtulus B and Razack M, 2010. Modeling daily discharge responses of a large karstic aquifer using soft computing methods: Artificial neural network and neuro-fuzzy. *Journal of Hydrology* 381: 101–111.
- Makarynskyy O, Makarynska D, Kuhn M and Featherstone WE, 2004. Predicting sea level variations with artificial neural networks at Hillary Harbour, Western Australia. *Estuaries, Coastal and Shelf Science* 61:351-360.
- Mohtasham M, Dehghani A, Akbarpour A, Meftah M and Etebari B, 2011. Groundwater Level Determination by Using Artificial Neural Network (Case study: Birjand Aquifer). *Irrigation and drainage of Iran*, 4(1): 9-1. (In Persian)
- Nayak P, Satyaji R and Sudheer KP, 2006. Groundwater level forecasting in a shallow aquifer using artificial neural network approach. *Water Resources Management* 2(1): 77-99.
- Panda DK, Mishra A, Jena SK, James BK and Kumar A, 2007. The influence of drought and anthropogenic effects on groundwater levels in Orissa, India. *Hydrology* 343: 140– 153.
- Sahoo S, Jha MK, 2013. Groundwater-level prediction using multiple linear regression and artificial neural network techniques: a comparative assessment. *Hydrology* 21: 1865– 1887.
- Suryanarayana C, Sudheer C, Mahmood V, Panigrahi BK, 2014. An integrated wavelet-support vector machine for groundwater level prediction in Visakhapatnam, India. *Neurocomputing* 145: 324-335.