تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال یازدهم، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۴
Volume 11, No. 3, Winter 2016 (IR-WRR)
۸۵-۹۹

ارائه مدل ترکیبی ژنتیک ـ کریجینگ برای پیش‌بینی زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت هادیشهر)

محمد حسن حبیبی[۱]، عطاالله ندیری[۲*] و اصغر اصغری مقدم[۳]

چکیده

استفاده از روش‌های هوشمند تکاملی و مدل‌های ترکیبی برای پیش‌بینی زمانی ـ مکانی نوسانات سطح آب زیرزمینی در دهه‌های اخیر بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. الگوریتم ژنتیک و نروفازی از روش‌های جدید پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی هستند که برای پیش‌بینی مسائل پیچیده و غیرخطی می‌توانند به‌صورت منفرد و ترکیبی به‌کار روند. در این پژوهش، از روش‌های فوق برای مطالعه آبخوان دشت هادیشهر که به دلیل برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، سطح آب زیرزمینی آن افت شدیدی پیدا کرده است؛ استفاده شد. دشت هادیشهر در شمال غرب استان آذربایجان شرقی واقع شده و بخشی از محدوده مطالعاتی جلفا ـ دوزال است. به‌منظور یافتن راهکارهایی مفید برای پیش‌بینی زمانی ـ مکانی سطح آب زیرزمینی، از روش‌های هوش مصنوعی مانند نروفازی و برنامه‌ریزی ژنتیک و ترکیب بهترین مدل آن‌ها با روش‌های زمین‌آماری استفاده شد. بارش و تبخیر در گام زمانی t_0 و سطح آب زیرزمینی در گام زمانی t_{0-1} ورودی‌های مدل‌های نروفازی و برنامه‌ریزی ژنتیک بودند. نتایج نشان داد دقت مدل برنامه‌ریزی ژنتیک بیشتر از مدل نروفازی است به‌طوری‌که RMSE میانگین برای پیزومترهای منتخب در مرحله آزمایش در مدل برنامه‌ریزی ژنتیک ۱۹ سانتی‌متر و در مدل نروفازی ۲۳ سانتی‌متر به‌دست آمد. لذا مدل برنامه‌ریزی ژنتیک برای ترکیب با مدل زمین‌آماری (کریجینگ) استفاده شد و در نهایت مدل ترکیبی کریجینگ ـ ژنتیک برای پیش‌بینی زمانی ـ مکانی به‌دست آمد؛ و نتایج شبیه‌سازی‌شده به کل دشت و مناطق فاقد شبکه پایش سطح آب زیرزمینی بسط داده شد.

کلمات کلیدی: سطح آب زیرزمینی، دشت هادیشهر، برنامه‌ریزی ژنتیک، نروفازی، زمین‌آمار.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۹/۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۴/۲۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گرایش آبشناسی، دانشگاه تبریز.
۲- استایارگروه علوم زمین دانشکده علوم طبیعی دانشگاه تبریز.
۳- استاد گروه علوم زمین دانشکده علوم طبیعی دانشگاه تبریز.
*- نویسنده مسئول

Spatio-temporal Groundwater Level Prediction Using Hybrid Genetic-Kriging Model (Case Study: Hadishahr Plain)

M.H. Habibi [1], A.A. Nadiri [2] and A. Asghari Moghaddam [3]*

Abstract

In recent decades, the application of intelligent evolutionary methods and hybrid models for forecasting groundwater spatiotemporal fluctuations were more focused by researchers. Genetic algorithm and Neuro-Fuzzy are new methods which are applicable in single and hybrid forms for forecasting in complex and nonlinear problems. In this research, aforementioned methods were applied to study the Hadishahr plain aquifer. The Hadishahr plain is located in the north of East Azerbaijan province and it is a part of Julfa–Duzal study area. This aquifer suffers from groundwater level declination due to groundwater withdrawal increase. To achieve practical ways for spatio-temporal groundwater level forecasting, the artificial intelligence methods such as neuro–fuzzy (NF), genetic programming (GP) and combination their best model with geostatistical methods were used. Precipitation and evaporation in t_0 time step and groundwater table in t_{0-1} time step were the inputs to the Neuro-Fuzzy and Genetic Programming. The results showed that the average RMSE of selective piezometers for genetic programming and neuro-fuzzy were 19 and 23 centimeter in the test step, respectively. Then, genetic programming was used to present a hybrid model in combination with the geostatistical model (kriging). Finally, the hybrid model "genetic - kriging" were applied to predict the spatiotemporal prediction of the groundwater level. The simulated results were extended to the whole plain and the area with no groundwater level monitoring network.

Keywords: Groundwater level, Hadishahr Plain, Neuro-Fuzzy, Genetic programming, Geostatistics..

Received: November 30, 2014
Accepted: July 15, 2015

1- MSc. Student of Hydrogeology, Department of Earth Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2 - Assistant Professor, Department of Earth Science, Faculty of the Natural Resources, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email:Nadiri@tabrizu.ac.ir
3- Professor, Department of Earth Science, Faculty of the Natural Resources, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
*- Corresponding Author

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

پیش‌بینی سطح آب زیــرزمینی از مسائل مهم در مطالعات هیدروژئولوژیکی و مدیریت صحیح آبخوان‌ها است. افت سطح آب زیرزمینی مشکلاتی مانند خشک شدن چاه‌های آب، کاهش دبی رودخانه‌ها و آب دریاچه‌ها، تنزل کیفیت آب، افزایش هزینه پمپاژ، استحصال آب و نشست زمین را به دنبال دارد؛ لذا مدیریت آبخوان‌ها کاری اساسی برای جلوگیری از این مشکلات است و مدیریت و شناخت خصوصیات آبخوان‌ها نیازمند مدل‌سازی و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی می‌باشد. این امر در ابتدا بیشتر توسط مدل‌های عددی اجرا می‌شد؛ اما در دهه اخیر به دلیل نیازمندی مدل‌های عددی به داده، هزینه و زمان زیاد، مدل‌های هوش مصنوعی[۱] مانند شبکه عصبی مصنوعی، فازی، نروفازی، الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک[۲] پا به عرصه مدل‌سازی در علوم مختلف ازجمله آب‌های زیــرزمینــی گذارده‌اند (Nadiri et al., 2013a,b، Fijani et al., 2013، Tayfur et al., 2014). روش نروفازی (NF)[۳] یکی از روش‌های پرکاربرد و مفیدی است که در علوم مختلف به لحاظ کارایی بالای آن به‌طور وسیع استفاده می‌شود. ایــن روش در حقیقت ترکیبی از روش فــازی و شبکه عصبی مصنوعی می‌بــاشد و از مزایــای هــر دو روش استفاده می‌کند. روش NF در مطالعات منابع آب به‌طور فراوان استفاده شده است (Kurtulus and Razack, 2010، Talei et al., 2010، Yan et al., 2010) از مطالعات هیدروژئولوژیکی انجام شده مرتبط با NF می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد. Tutmez et al. (2006) از مدل نروفازی برای پیش‌بینی هدایت الکتریکی نمونه آب استفــاده کردند. آن‌ها با استفاده از غلظت کاتیون‌ها در آب زیرزمینی اقدام به پیش‌بینی هدایت الکتریکی در آب زیرزمینی کردند، Affandi and Watanabe (2007) با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی مانند NF سطح آب را براساس تأخیر زمانی مورد بررسی قرار دادند. نتایـج نشان داد که با افزایش گام زمانی از دقت مدل‌ها کاسته می‌شود، Saemi and Ahmadi (2008) از ترکیب مدل‌های GA و NF برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی با استفاده از داده‌های گمانه حفاری سود جستند. Shiri and Kişi (2011) از روش‌های مختلف هوش مصنوعی از جمله روش نروفازی برای پیش‌بینی سطح آب در دو چاه استفاده کردند و نشان دادند که روش NF توانایی خوبی در پیش‌بینی سطح آب دارند، Moosavi et al. (2013) برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی آبخوان مشهد، از روش‌های مختلف هوش مصنوعی استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که روش موجک[۴] ـ نروفازی نسبت به روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، موجک ـ شبکه عصبی مصنوعی و نروفازی می‌تواند پیش‌بینی درست‌تری از سطح آب زیرزمینی داشته باشد. یکی از روش‌های قابل اعتماد در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی برنامه‌ریزی ژنتیک[۵] است. می‌توان استراتژی اساسی جستجو در برنامه‌ریزی ژنتیک را به الگوریتم ژنتیک نسبت داد. درواقع برنامه‌ریزی ژنتیک تعمیم و توسعه‌یافته الگوریتم ژنتیک می‌باشد. تفاوت اساسی بین GP و GA در طبیعت افراد است به‌طوری‌که در GA افراد به‌صورت رشته‌های خطی[۶] با طول ثابت به‌عنوان کروموزوم می‌باشند درحالی که در GP افراد به‌صورت غیرخطی با اندازه و شکل مختلف در درخت بیان[۷] می‌باشد. روش GP الهام‌یافته از طبیعت است به‌طوری که در این روش، کروموزوم‌ها اشخاص ساده‌ای هستند که به‌صورت غیرخطی، جمع و جور، نسبتاً کوچک و آسان به دستکاری ژنتیکی (تکثیر، تغییر، ترکیب و غیره) می‌باشند. درخت بیان اصطلاحی است که برای کروموزوم‌ها به کار می‌رود که تابع تناسب بهترین کروموزوم‌ها را برای تولید نسل آینده انتخاب می‌کند (Ferreira, 2001a). اخیراً از برنامه‌ریزی ژنتیک در مطالعات هیدرولوژیکی استفاده فراوانی شده است (Aytek et al., 2008، Ghorbani et al., 2009، فربودفام و همکاران ۱۳۸۸، Ghorbani et al., 2010). همچنین از مطالعات و تحقیقات هیدروژئولوژیکی انجام شده با برنامه‌ریزی ژنتیک می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد؛ Prasad and Rastogi (2001) با استفاده از GA تخمینی از تغذیه آبخوان و مقادیر هدایت هیدرولیکی برای منطقه مطالعاتــی در هند ارائه دادنـد، همچنین Mehdipour et al. (2013) از روش‌های نروفازی و GP برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی ماهانه سطح آب زیرزمینی در دشت کرج استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از روش GP می‌تواند جذر میانگین مربع خطاها (RMSE) را برای داده‌های چاه مشاهده‌ای در مرحله آموزش ۸/۳۵ درصد و در مرحله پیش‌بینی ۱۱/۳۳ درصد نسبت به روش نروفازی کاهش دهد. برای ارزیابی، مطالعه و پیش‌بینی زمانی و مکانی پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی از روش‌هــای مختلــف زمین‌آمار به‌طور فــراوان استفاده شده است (Copertino et al., 1998، Motaghian and Mohammadi, 2011، Fetouani et al., 2008 و اکبری و همکاران ۱۳۸۸). در همین زمینه، مطالعات بیشتر پژوهشگران حاکی از دقت مطلوب روش زمین‌آمار، به‌ویژه کریجینگ معمولی در زمینه‌های مختلف آب‌وخاک است (Barcae et al., 2008، Taghizadeh et al., 2008، Desbarats et al., 2002، Naoum et al., 2004، Phillips et al., 1992). اخیراً مدل‌های ترکیبی هوش‌مصنوعی و زمین‌آمار برای پیش‌بینی زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی استفاده شده‌است (Nourani et al., 2008، Kelin et al., 2005). همچنین ندیری (۱۳۸۷) از ترکیب مدل شبکه عصبی و زمین‌آمار مدلی برای

Archive of SID
www.SID.ir

پیش‌بینی زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی در محدوده متروی شهر تبریز ارائه کردند و مدل ترکیبی کریجینگ عصبی را ارائه دادند. تمام مطالعات انجام گرفته اخیر بر روی پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با استفاده از GP تنها به پیش‌بینی زمانی سطح آب زیرزمینی پرداخته‌اند. لذا در این تحقیق، هدف ارائه مدل ترکیبی GP با زمین‌آمار برای پیش‌بینی زمانی و مکانی سطح آب‌های زیرزمینی می‌باشد که برای پیش‌بینی زمانی از روش‌های نروفازی و برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده شده و از روش برنامه‌ریزی ژنتیک – کریجینگ برای پیش‌بینی زمانی و مکانی و بسط دادن نتایج شبیه‌سازی‌شده به کل دشت و مناطق فاقد پیزومتر استفاده شده است.

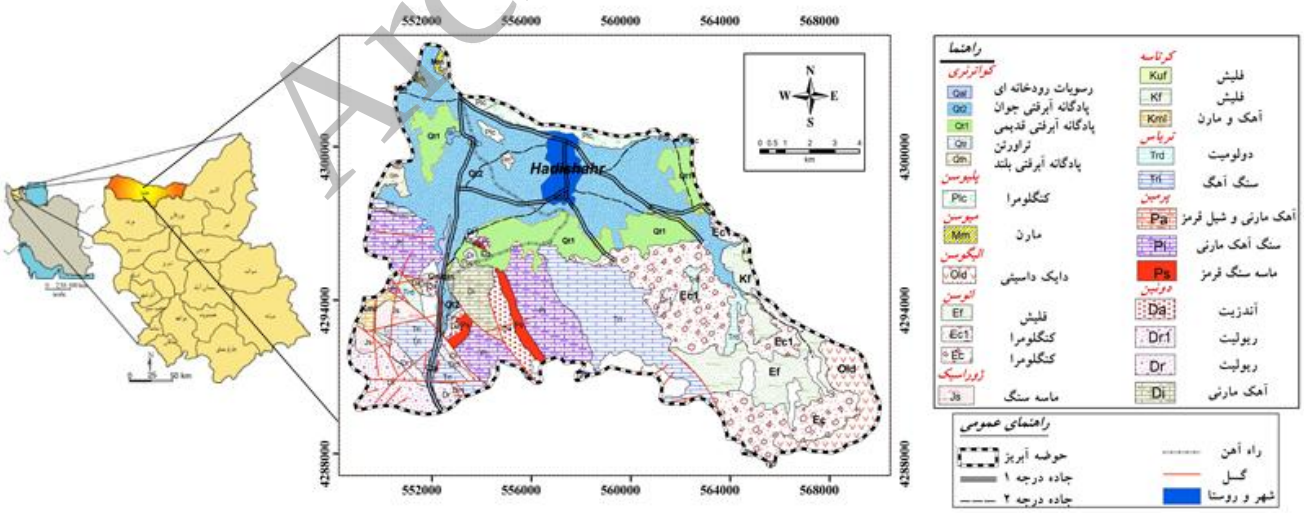
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

دشت هادیشهر در شمال غرب واحد زمین ساختی البرز ـ آذربایجان قرار گرفته است؛ این دشت که قسمتی از محدوده مطالعاتی جلفا ـ دوزال می‌باشد در شمال غربی استان آذربایجان شرقی و در فاصله ۱۱۰ کیلومتری شمال تبریز قرار گرفته که بر اساس تقسیمات هیدرولوژیکی در حوضه آبریز رودخانه ارس قرار دارد. مساحت کل حوضه آبریز دشت هادیشهر حدود ۱۸۰ کیلومترمربع است که دشت هادیشهر با امتداد شرقی ـ غربی با وسعتی معادل ۵۵/۵۷ کیلومترمربع می‌باشد. عبور راه‌آهن تبریز ـ جلفا و جاده آسفالته تبریز ـ جلفا از داخل دشت و شهر هادیشهر دسترسی به منطقه مطالعاتی را مقدور می‌سازد. شکل ۱ موقعیت و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۲-۲- هیدرولوژی و هیدروژئولوژی منطقه

حوضه آبریز دشت هادیشهر را عمدتاً ارتفاعات واقع در جنوب دشت شامل کوه‌های دیوان داغی، قره‌گوز و دامنه‌های غربی کوه کیامکی به ترتیب از جنوب غرب تا جنوب شرق دشت تشکیل می‌دهند. در کل شیب دشت از جنوب شرق به شمال غرب است. مرتفع‌ترین نقطه حوضه آبریز با ارتفاعی حدود ۲۴۴۶ متر در ارتفاعات قره‌گوز در جنوب دشت و پست‌ترین نقطه دشت با ارتفاع ۸۸۰ متر در شمال غرب دشت واقع شده و متوسط ارتفاع دشت حدود ۱۰۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. زهکش اصلی منطقه، دره‌دیزه‌چای است این رودخانه فصلی از محدوده مطالعاتی هرزندات سرچشمه می‌گیرد. بر اساس اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای و گمانه‌ها، آبخوان دشت هادیشهر از نوع آزاد است. همچنین بر پایه اطلاعات هواشناسی ۲۸ ساله (۹۱ ـ ۱۳۶۴) از ایستگاه سینوپتیک جلفا، روند بارندگی‌ها صعودی بوده و متوسط بارندگی سالانه محدوده مطالعاتی ۲۱۴/۳۳ میلی‌متر می‌باشد که فروردین و اردیبهشت‌ماه پرباران‌ترین و تیر و مردادماه کم‌باران‌ترین ماه‌های سال می‌باشند. تغییرات تبخیر پتانسیل در محدوده مطالعاتی از حداقل ۱/۹ میلی‌متر در دی‌ماه تا حداکثر ۵۴۸ میلی‌متر در مردادماه در نوسان است. همچنین اقلیم منطقه مورد مطالعه در اقلیم نمای آمبرژه در محدوده خشک سرد قرار دارد. در محدوده مورد مطالعه ۶۵ حلقه چاه بهره‌برداری، ۳۷ رشته قنات، ۸ دهنه چشمه و ۱۱ حلقه پیزومتر وجود دارد. شکل ۲ تصویری سه‌بعدی از منطقه مطالعاتی و مدل مفهومی از آبخوان را نشان می‌دهد.

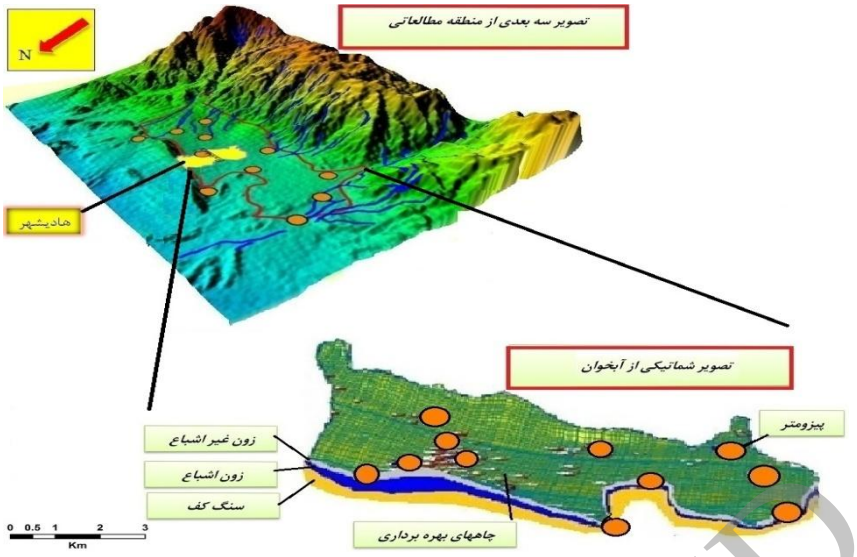


شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

(برگرفته‌شده از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی ایران، ورقه جلفا، ۱۳۷۷)

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲- تصویری سه‌بعدی از منطقه مطالعاتی و مدل مفهومی از آبخوان منطقه مورد مطالعه

مطالعه و مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت هادیشهر که به سبب برداشت بی‌رویه در سال‌های اخیر دچار افت شدیدی شده و یک دشت ممنوعه می‌باشد و همچنین آب‌های زیرزمینی این دشت مهم‌ترین منبع کشاورزی و آشامیدن می‌باشد؛ حائز اهمیت است. برای نمونه در جدول ۱ افت سطح آب زیرزمینی برای بازه زمانی فروردین ۱۳۸۵ تا فروردین ۱۳۹۱ در چند پیزومتر آورده شده است. دلیل اصلی افت سطح آب، به‌احتمال زیاد برداشت بیش‌ازحد می‌باشد.

۳-۳- روش تحقیق

۳-۳-۱- روش نروفازی

روش نروفازی شبکه تطبیق‌پذیر و قابل آموزشی است که به لحاظ عملکرد کاملاً مشابه سیستم استنتاج فازی است. این روش در حقیقت ترکیبی از روش فازی و شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد و از مزایای هر دو روش استفاده می‌کند به‌طوری‌که از شبکه عصبی مصنوعی برای بهینه‌کردن مدل فازی استفاده می‌شود. در این روش شبکه عصبی مصنوعی به‌جای بهینه‌کردن وزن‌ها، قوانین و توابع عضویت فازی را بهینه می‌کند. در روش نروفازی تنها می‌توان از روش فازی ساگنو که خروجی آن ثابت یا خطی است، استفاده کرد (ندیری و همکاران، ۱۳۹۲). توضیحات و اطلاعات بیشتر در مورد روش نروفازی را می‌توان در تحقیقات (Zounemat-Kermani and Teshnehlab, 2008، Maier et al., 2010) به‌دست آورد.

۳-۳-۲- برنامه‌ریزی ژنتیک

برنامه‌ریزی ژنتیک که برای اولین بار توسط Cramer (1985) ابداع و سپس توسط Koza (1992) گسترش و بسط داده شد روشی از الگوریتم‌های تکاملی است که در واقع تعمیم و توسعه‌یافته الگوریتم ژنتیک (GA) می‌باشد. فرآیند گام‌به‌گام برنامه‌ریزی ژنتیک به‌صورت مراحل زیر است: ۱- یک جمعیت اولیه از توابع مرکب نشان‌دهنده الگوهای پیش‌بینی، به‌صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شود (ایجاد کروموزوم‌ها). ۲- معرفی جمعیت اولیه (کروموزوم‌ها) به رایانه و ارزیابی هر یک از افراد (ژن) جمعیت مذکور با استفاده از توابع برازش (شناسایی مؤثرترین افراد در ماهیت پدیده). ۳- انتخاب ژن‌های مؤثر به‌منظور تکثیر، جهش، جفت‌گیری و تولیدمثل افراد جدید با صفات اصلاح‌شده (فرزندان). ۴- اعمال فرآیند توسعه‌ای تکراری بر روی فرزندان در هر تولید. گام چهارم به تعداد معین و تا حصول بهترین پاسخ تکرار خواهد شد (Liong et al., 2002).

GP همانند GA با مجموعه‌های اولیه از راه‌حل‌های تصادفی که جمعیت نامیده می‌شود کار خود را آغاز می‌کند. هر فرد در این جمعیت، کروموزوم نامیده می‌شود که نماینده راه‌حلی برای مسئله مورد نظر است. سپس کروموزوم‌ها که به‌صورت درختی (ET) نشان داده شده‌اند، با یک تابع برازش ارزیابی می‌گردد تا میزان مناسب بودن یک راه‌حل در حیطه مسئله تعیین گردد. این جمعیت به کمک عمل‌گرهای ژنتیکی، طی نسل‌های متمادی تکامل می‌یابد. هدف از این کار، دقیقاً همانند سازش‌پذیری طبیعی ژنتیکی، ایجاد جمعیت‌ها یا نسل‌هایی از جمعیت قبلی است که نسبت به آن‌ها با محیط تطابق بهتری دارند (Lopes and Weinert, 2004).

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱- تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت هادیشهر برای بازه زمانی فروردین ۱۳۸۵ تا فروردین ۱۳۹۱ در چند پیزومتر

محل پیزومتر	UTM X	UTM Y	تراز آب زیرزمینی (متر) در فروردین‌ماه سال ۱۳۹۱	تراز آب زیرزمینی (متر) در فروردین-ماه سال ۱۳۸۵	افت سطح آب زیرزمینی در این مدت (متر)
شهرک فرهنگیان	۵۶۰۴۷۵	۴۲۹۸۹۵۸	۸۹۶/۱۶	۸۹۸/۳۵	-۲/۱۹
جاده لیوارجان	۵۶۰۷۰۲	۴۲۹۷۳۲۶	۹۸۸/۳۲	۹۹۷/۱۷	-۸/۸۵
تقاطع راه‌آهن	۵۵۵۲۶۲	۴۲۹۸۵۴۶	۹۶۱/۹۷	۹۶۵/۴۵	-۳/۴۸
بلوار گرگر	۵۵۹۲۰۵	۴۲۹۸۲۵۰	۹۱۸/۹۷	۹۲۱/۲۷	-۲/۳

توضیحات اضافی و اطلاعات بیشتر در مورد روش برنامه‌ریزی ژنتیک را می‌توان در تحقیقات (Liong et al., 2002، Ferreira, 2001a، Ferreira, 2006b، Poli et al., 2008) به دست آورد.

۳-۳-۳- روش زمین‌آمار

یکی از ساده‌ترین روش‌های تخمین مکانی زمین‌آماری، کریجینگ است، در این روش با توجه به نحوه توزیع مکانی متغیر مورد نظر به تخمین مقادیر مجهول در موقعیت‌های مکانی مطلوب و معلوم پرداخته می‌شود (Isaaks and Srivastava, 1989). از انواع روش‌های کریجینگ می‌توان به کریجینگ ساده[۸]، کریجینگ عادی[۹] و کریجینگ عمومی[۱۰] اشاره کرد. به‌طوری‌که کریجینگ ساده از دیگر روش‌های کریجینگ ساده‌تر می‌باشد و مقدار میانگین معلوم است اما در کریجینگ عادی فرض بر این است که میانگین ثابت است ولی مقدار آن مشخص نیست. این روش در داده‌هایی که دارای روند محلی یا مقطعی هستند می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در کریجینگ عمومی مقدار میانگین متغیر و نامعلوم است. این روش در واقع تلفیق روش کریجینگ با رونـد محلی می‌باشد و برخلاف کریجینگ عادی که فرض می‌شـد رونـد تغییرات میانگین در تمام ناحیه ثـابت است، میانگین نقاط تـابعـی از مختصات جغرافیـای مکان‌ها می‌باشد (ASCE, 1990). توضیحـات و اطلاعـات بیشتر در مـورد روش‌های تخمیـن مکانـی زمین‌آماری را می‌توان در تحقیقات (Isaaks and Srivastava, 1989 و ASCE, 1990) به‌دست آورد.

۳-۴- ارزیابی دقت مدل

در این تحقیق از دو معیار جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) به‌منظور ارزیابی کارایی و توانایی مدل‌ها استفاده شد. RMSE اختلاف مابین مقدار مشاهده شده و مقادیر محاسبه شده را نشان می‌دهد. کمترین مقدار RMSE بالاترین صحت پیشگویی را نشان می‌دهد.

RMSE به‌صورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \qquad (۱)$$

در رابطه ۱، y_i نتایج مشاهداتی و $\hat{y}_i$ نتایج محاسباتی و N تعداد کل مشاهدات است. R^2 نیز نشانگر میزان بازده می‌باشد که به‌صورت رابطه ۲ ارائه می‌گردد. به‌طوری‌که x_i نتایج مشاهداتی برای i، $\bar{x}$ میانگین نتایج مشاهداتی، y_i نتایج محاسباتی برای i و $\bar{y}$ میانگین نتایج محاسباتی است.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \qquad (۲)$$

بهترین جواب برای مدل هنگامی ایجاد خواهد شد که $R^2=1$, RMSE = 0 باشد.

۳-۵- آنالیز داده‌ها

انتخاب ورودی‌های مناسب، یکی از مهم‌ترین مواردی است که بایستی در مدل‌سازی به روش هوش مصنوعی مورد توجه قرار گیرد. این امر در شرایطی که از داده‌های ورودی مختلفی بهره برده می‌شود، از اهمیت مضاعفی برخوردار است. چرا که ارائه داده‌های ورودی غیرمرتبط، سبب کاهش دقت مدل می‌شود. در دشت هادیشهر ۱۱ حلقه پیزومتر وجود دارد که از ۹ پیزومتر که انطباق خوبی با شرایط هیدروژئولوژیکی و داده‌ها داشت، استفاده شد. در این تحقیق، متوسط تبخیر و بارش ماهانه و سطح آب زیرزمینی ماهانه در بازه زمانی مهرماه ۱۳۸۲ تا شهریورماه ۱۳۹۱، به‌عنوان ورودی‌های مدل‌های نروفازی و برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده شدند. تبخیر و بارش ماهانه توسط ایستگاه سینوپتیک جلفا و سطح آب زیرزمینی ماهانه پیزومترهای انتخاب شده توسط سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی اندازه‌گیری شده است. پس از آنالیز حساسیت و انتخاب ورودی‌های مختلف در گام‌های مختلف زمانی در نهایت از بارش و تبخیر در گام زمانی t_0 و سطح آب زیرزمینی در گام زمانی t_{0-1} به‌عنوان ورودی‌های مدل‌های زمانی استفاده شد.

Archive of SID
www.SID.ir

از مسائل مهم در این مدل‌ها تعیین درصدهای مناسبی از داده‌ها به عنوان ورودی مدل می‌باشد (Lallahem et al., 2005). برای تعیین درصدهای مناسبی از داده‌ها برای آموزش و آزمایش از درصدهای مختلفی استفاده شد (آنالیز حساسیت) کـــه نهایتاً بهترین درصد (۷۵–۲۵ درصد) تعیین شد یعنی ۷۵ درصد داده‌ها (از مهرماه ۱۳۸۲ تا شهریورماه ۱۳۸۹) به‌عنوان داده‌های قسمت آموزش و ۲۵ درصد داده‌ها (از مهرماه ۱۳۸۹ تا شهریورماه ۱۳۹۱) به‌عنوان داده‌های قسمت آزمایش انتخاب شد. در جدول ۲ مشخصات آماری متغیرهای استفاده شده آمده است.

برای تعیین شعاع بهینه در مدل نروفازی و تعیین بهتر پارامترها و عمل‌گرها در مدل برنامه‌ریزی ژنتیک یکی از پیزومترها که معرف ویژگی‌های کلی دشت باشد به‌عنوان پیزومتر مرکزی دشت انتخاب شد. برای تعیین پیزومتر مرکزی باید به موارد خاصی مانند مرکزیت نسبت به دشت، عمق پیزومتر، دانه‌بندی و گمانه چاه، خواص هیدرولیکی، نوع سنگ کف، تکتونیک و غیره دقت شود چون این پیزومتر تا حدودی معرف ویژگی‌های هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی کل دشت می‌باشد. شکل ۳ موقعیت پیزومترهای انتخاب شده و پیزومتر مرکزی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

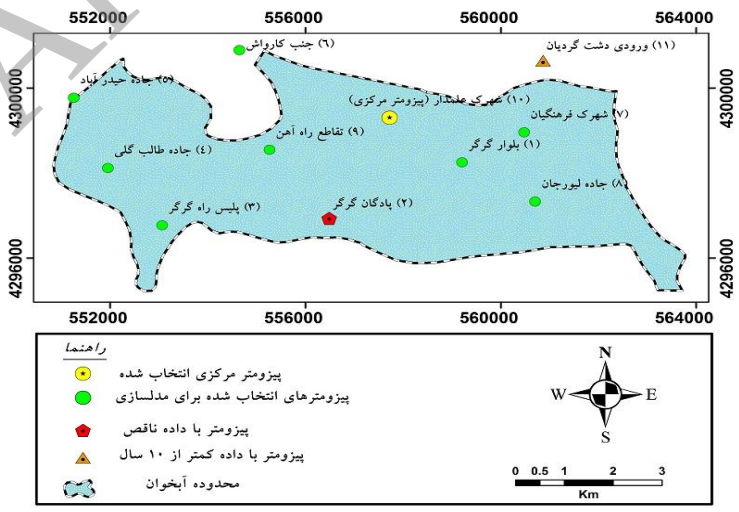
۴- بحث و نتایج

۴-۱- مدل نروفازی

مرحله اول پیش‌بینی زمانی سطح آب زیرزمینی استفاده از روش نروفازی بود. این روش ترکیبی از روش فازی و شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد که از مزایای هر دو روش استفاده می‌کند به‌طوری‌که از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای بهینه‌سازی مدل فازی استفاده می‌شود.

جدول ۲- مشخصات آماری متغیرهای استفاده شده

متغیر	حداقل	حداکثر	متوسط	انحراف معیار
تراز آب پیزومتر جاده طالب گلی (متر)	۹۵۸/۸۴	۹۵۹/۹۶	۹۵۹/۳۷	۰/۲۶
تراز آب پیزومتر تقاطع راه‌آهن (متر)	۹۶۰/۷۳	۹۶۵/۵۳	۹۶۳/۸۶	۱/۳۹
تراز آب پیزومتر پلیس‌راه گرگر (متر)	۹۷۹/۴۷	۹۸۱/۲۴	۹۸۰/۵۲	۰/۴۶
تراز آب پیزومتر جاده لیورجان (متر)	۹۸۴/۰۸	۹۹۷/۰۹	۹۸۹/۶۵	۳/۶۱
تراز آب پیزومتر بلوار گرگر (متر)	۹۱۸/۲۷	۹۲۴/۲۸	۹۲۱/۲۷	۱/۵۹
تراز آب پیزومتر جاده حیدرآباد (متر)	۹۱۳/۷۷	۹۱۷/۶۵	۹۱۶/۴۱	۱/۰۳
تراز آب پیزومتر شهرک فرهنگیان (متر)	۸۹۵/۵۵	۸۹۸/۵۱	۸۹۶/۸۰	۰/۸۱
تراز آب پیزومتر جنب کارواش (متر)	۸۹۸/۷۲	۹۰۴/۸۹	۹۰۱/۸۷	۱/۵۷
تراز آب پیزومتر شهرک علمدار (متر)	۸۸۲/۹۶	۸۸۹/۴۷	۸۸۵/۸۶	۱/۵۴
بارش ماهانه دشت (میلی‌متر)	صفر	۱۱۲	۲۰/۲۳	۱۹/۰۷
تبخیر ماهانه دشت (میلی‌متر)	صفر	۵۴۴/۰۵	۲۰۴/۰۷	۱۷۴/۸۸



شکل ۳- موقعیت پیزومترهای منتخب و پیزومتر مرکزی انتخاب شده

Archive of SID
www.SID.ir

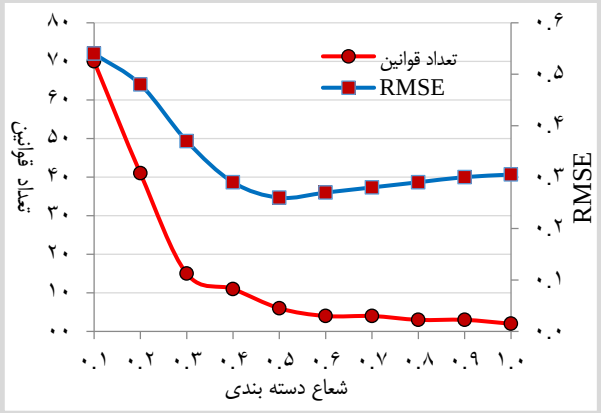
اولین مرحله در مدل نروفازی ایجاد مدل فازی بر اساس داده‌های ورودی و خروجی است؛ که در مدل‌سازی به روش نروفازی باید از روش فازی ساگنو استفاده شـود که در ایـن تحقیق نیز از مـدل فازی ساگنو با دسته‌بندی کاهشی[11] استفاده شد.

برای مدل‌سازی به روش نروفازی، تعیین شعاع بهینه امری مهم و اساسی می‌باشد؛ بنابراین برای تعیین شعاع بهینه و تعداد قوانین، شعاع را بین بازه ۰/۱ تا ۱ در نظر گرفته و مقدار RMSE میانگین مرحله آموزش و آزمایش محاسبه شد و تعداد قوانین در هر شعاع یادداشت شد. لذا بر اساس کمینه RMSE، شعاع بهینه ۰/۵ و ۶ قانون و دسته فازی برای پیزومتر مرکزی دشت به‌دست آمد، بنابراین شعاع بهینه برای مدل‌سازی پیزومترهای منتخب دشت ۰/۵ در نظر گرفته شد. در شکل ۴ شعاع بهینه و تعداد قوانین آورده شده است. همان‌طوری که در شکل ۴ مشخص است با افزایش شعاع دسته‌بندی تعداد قوانین کاهش می‌یابد. تابع عضویت استفاده شده برای اجرای مدل، گوسین می‌باشد؛ در شکل ۵ قوانین فازی ایجاد شده برای ورودی‌های مدل (تبخیر، بارش و سطح آب زیرزمینی در گام زمانی t_{0-1}) در سه ستون سمت چپ و خروجی مدل (سطح آب زیرزمینی در گام زمانی t_0) در ستون اول از سمت راست برای پیزومتر مرکزی دشت نشان داده شده است. در مرحله بعدی برای بهینه کردن پارامترهای مدل فازی ایجاد شده از شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم ترکیبی حداقل مربعات و گرادیان نزولی انتشار خطا به عقب استفاده شد تا مدل نروفازی تهیه شود. شکل ۶ مدل نروفازی به‌دست آمده برای پیزومتر مرکزی دشت را نشان می‌دهد.

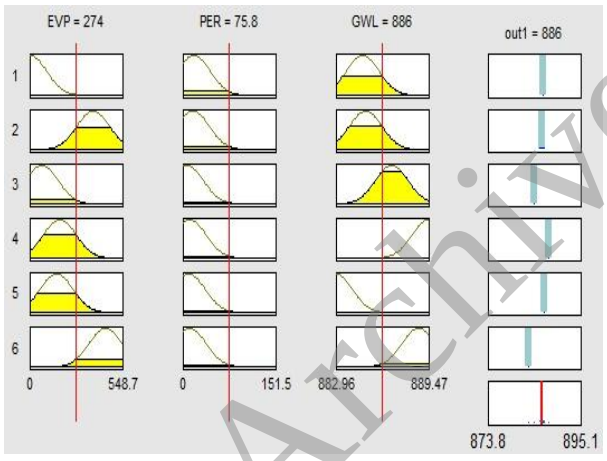
۴-۲- مدل برنامه‌ریزی ژنتیک

۴-۲-۱- پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در پیزومتر مرکزی و پیزومترهای منتخب

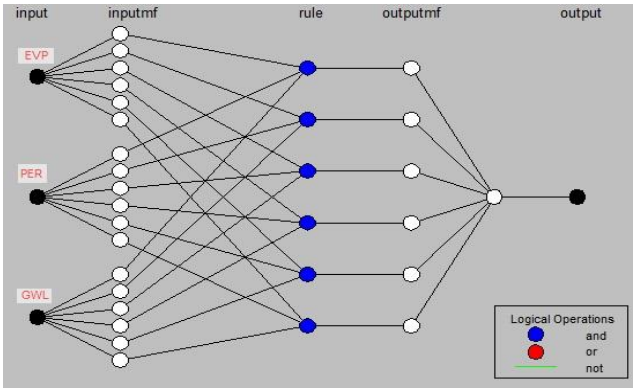
به‌مانـنـد روش NF، از بـارش و تبخیر در گام زمانی t_0 و سطح آب زیرزمینی در گام زمانی t_{0-1} به‌عنوان ورودی‌های مدل‌های GP استفاده شد. برای تعیین بهتر پارامترها و عمل‌گرها در مدل برنامه‌ریزی ژنتیک یکی از پیزومترها که معرف ویژگی‌های کلی دشت باشد به‌عنوان پیزومتر مرکزی دشت انتخاب شد. در اجرا و مدل‌سازی به روش GP انتخاب و تعیین توابع و عمل‌گرهای مختلف ریـاضی بسیار حائز اهمیت است چون این توابع و عمل‌گرهـا در



شکل ۴- شعاع بهینه و تعداد قوانین برای پیزومتر مرکزی دشت



شکل ۵- قوانین فازی ایجاد شده برای ورودی‌های مدل



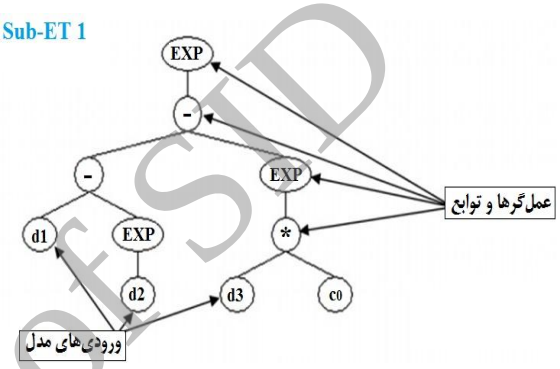
شکل ۶- مدل نروفازی به‌دست آمده برای پیزومتر مرکزی دشت

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳- نتایج مدل NF برای پیزومترهای منتخب منطقه مورد مطالعه

نام محل	UTM Y	UTM X	مرحله آموزش		مرحله آزمایش	
			RMSE	R^2	RMSE	R^2
جاده طالب گلی	۴۲۹۸۱۱۵	۵۵۱۹۵۲	۰/۰۴	۰/۹۷	۰/۱۰	۰/۸۰
تقاطع راه‌آهن	۴۲۹۸۵۴۶	۵۵۵۲۶۲	۰/۰۷	۰/۹۸	۰/۱۱	۰/۹۵
پلیس‌راه گرگر	۴۲۹۶۷۷۰	۵۵۳۰۶۵	۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۲۱	۰/۷۴
جاده لیورجان	۴۲۹۷۳۲۶	۵۶۰۷۰۲	۰/۳۳	۰/۹۹	۰/۴۶	۰/۸۷
بلوار گرگر	۴۲۹۸۲۵۰	۵۵۹۲۰۵	۰/۱۹	۰/۹۴	۰/۳۶	۰/۸۳
جاده حیدرآباد	۴۲۹۹۷۷۰	۵۵۱۲۵۵	۰/۱۱	۰/۹۸	۰/۲۶	۰/۷۹
شهرک فرهنگیان	۴۲۹۸۹۵۸	۵۶۰۴۷۵	۰/۱۱	۰/۹۷	۰/۰۷	۰/۹۱
جنب کارواش	۴۳۰۰۸۹۰	۵۵۴۶۴۷	۰/۱۷	۰/۹۹	۰/۱۹	۰/۸۹
شهرک علمدار	۴۲۹۹۳۰۲	۵۵۷۷۲۲	۰/۲۲	۰/۹۹	۰/۳۰	۰/۸۶



شکل ۷- نمونه‌ای از درخت بیان (ژن) با عمل‌گرها و ورودی‌های مدل

رابطـــه‌ای که بین ورودی‌های مدل در درخت بیان (ET) به‌وجود می‌آید تأثیرگذارند. شکل ۷ نمونه‌ای از عمل‌گرها و توابع ریاضی و ورودی‌های مدل در درخت بیان را نشان می‌دهد. در جدول ۴، نتایج پنج دسته از توابع و عمل‌گر مختلف استفاده شده برای مدل‌سازی پیزومتر مرکزی آورده شده که برای مقایسه نتایج و تعیین بهترین حالت از RMSE و R^2 استفاده شده است. با توجه به نتایج مشخص شد که بهترین دسته تابع، دسته اول است.

یکی از موارد مهم در GP، تعیین تابع برازش به‌منظور یافتن راه‌حلی برای تمامی موارد برازش به اندازه‌ی یک خطای معین است. درواقع تابع برازش برای ارزیابی عملکرد هر برنامه خروجی بر مبنای خطای نسبی استفاده می‌شود و این نظر را به‌وسیله یک محدوده انتخابی و دقت کاوش می‌کند. محدوده انتخابی، به‌عنوان یک حد انتخاب برای دقت و بهبود عملکرد بوده و لذا اجازه تطبیق دقیق از راه‌حل‌های استخراجی با صحت لازم را می‌دهد (Ferreira, 2006b). در این تحقیق از RMSE به‌عنوان تابع برازش استفاده شد.

از گام‌های مهم و اساسی در توسعه و ساخت مدل GP، انتخاب تعداد کروموزوم‌ها، اندازه هد[۱۲]، تعداد ژن[۱۳] و تابع اتصال[۱۴] (که شامل چهار عمل‌گر اصلی یعنی جمع، تفریق، ضرب و تقسیم است) می‌باشد که با توجه به تحقیقات انجام شده با روش GP و روش آزمون‌وخطا برای پیزومتر مرکزی تعداد کروموزوم‌ها و اندازه هد به ترتیب برابر ۵۰ و ۷، انتخاب شد. هم‌چنین تعداد ژن‌ها بر اساس دقت و کاربردی که از مدل ساخته شده انتظار می‌رود، تعیین می‌شود؛ که تعداد ۳ ژن برای این مدل انتخاب شد. همچنین با توجه به تحقیقات انجام شده با روشGP و روش آزمون و خطا در این تحقیق از عملیات جمع به‌منظور تابع اتصال برای برقراری ارتباط بین ژن‌ها استفاده شده است.

جدول ۴- نتایج پنج دسته از توابع و عمل‌گرهای مختلف استفاده شده برای مدل‌سازی پیزومتر مرکزی

دسته‌ها	توابع و عمل‌گرها	مرحله آموزش		مرحله آموزش	
		RMSE	R^2	RMSE	R^2
۱	$\{+, -, \times, \div\}$	۰/۳۰	۰/۹۷	۰/۲۹	۰/۸۸
۲	$\{+, -, \times, \div, Ln, e^x\}$	۰/۳۰	۰/۹۶	۰/۳۰	۰/۸۷
۳	$\{+, -, \times, \div, \sqrt{}, \sqrt[3]{}, x^2, x^3\}$	۰/۳۲	۰/۹۶	۰/۳۰	۰/۸۷
۴	$\{+, -, \times, \div, Ln, e^x, \sqrt{}, \sqrt[3]{}, x^2, x^3\}$	۰/۳۰	۰/۹۷	۰/۳۳	۰/۸۴
۵	$\{+, -, \times, \div, Ln, e^x, \sqrt{}, \sqrt[3]{}, x^2, x^3, Sinx, Cosx, Arctgx\}$	۰/۳۱	۰/۹۶	۰/۳۴	۰/۸۶

Archive of SID
www.SID.ir

انتخاب چند عمل‌گر به‌طور هم‌زمان موجب پیچیده شدن روابط (افزایش عمق درخت بیان) می‌شود که به این امر پدیده پف کردن[15] گفته می‌شود که در تحقیقی که توسط (Poli et al., 2008) ارائه شده به راهکارهای رفع این مشکل اشاره شده است. همچنین از عمل‌گرهای جهش، جابه‌جایی و ترکیب به‌منظور تولید و اصلاح نژاد استفاده شد که نرخ استفاده شده برای پیزومتر مرکزی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- نوع و نرخ بهینه پارامترها و عمل‌گرهای به‌دست آمده برای مدل‌سازی پیزومتر مرکزی دشت هادیشهر

پارامترها و عملگرها	نوع و نرخ بهینه
تعداد کروموزوم‌ها	۵۰
اندازه هد	۷
تعداد ژن	۳
تابع اتصال ژن‌ها	جمع (+)
جهش	۰/۰۱
وارونگی	۰/۱
ترکیب یک نقطه‌ای	۰/۳
ترکیب دو نقطه‌ای	۰/۳
ترکیب ژن	۰/۱
جابه‌جایی ژن	۰/۱
جابه‌جاییIS	۰/۱
جابه‌جاییRIS	۰/۱
تابع برازش	RMSE
توابع و عمل‌گرها	{+، -، ×، ÷}

با توجه به نوع و نرخ بهینه پارامترها و عمل‌گرهای به‌دست آمده، مدل سطح آب زیرزمینی برای پیزومتر مرکزی و پیزومترهای منتخب تهیه شد که نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده‌ی کارایی مناسب و دقت قابل‌قبول روش GP در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی است.

بر اساس جدول ۶ در ۵ پیزومتر نتایج مرحله آزمایش بهتر از مرحله آموزش بوده که این مورد در یکی از پیزومترها در نتایج مدل نروفازی (جدول ۳) نیز مشاهده می‌شود. درحالی‌که بهتر بودن نتایج مرحله آموزش نسبت به آزمایش عموماً منطقی و قابل‌قبول است به شرطی که خصوصیات آماری داده‌های مرحله آموزش و آزمایش یکسان باشند (Maier et al., 2010) در پیش‌بینی‌های زمانی و به‌طورکلی سری‌های زمانی داده‌ها معمولاً این‌گونه نیستند. لذا می‌تواند دلیل بهتر بودن نتایج مدل در مرحله آزمایش نسبت به آموزش در این پیزومترها مربوط به این مورد باشد. در شکل ۸ و ۹ حالت مقایسه‌ای نتایج مدل GP با داده‌های مشاهده‌ای برای پیزومتر مرکزی دشت آورده شده است.

۴-۲-۲- ارائه رابطه چند متغیره پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در پیزومتر مرکزی

از فواید استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک تولید درخت بیان می‌باشد که در این تحقیق نیز برای پیزومتر مرکزی دشت در شکل ۱۰ آورده شده است. با استفاده از عبارت درختی، تابع نگاشتی برای پیزومتر مرکزی نوشته شد که در رابطه ۳ آورده شده است. با استفاده از این رابطه می‌توان به تأثیر پارامترهای استفاده شده به‌عنوان ورودی‌های مدل پی‌برد و در حقیقت یکی از برتری‌های اساسی مدل GP نسبت به NF این امر می‌باشد. در تابع نگاشتی متغیرهای d_0، d_1 و d_2 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی پارامترهای تبخیر در زمان t_0، بارش در زمان t_0 و تراز آب زیرزمینی در زمان t_{0-1} است.

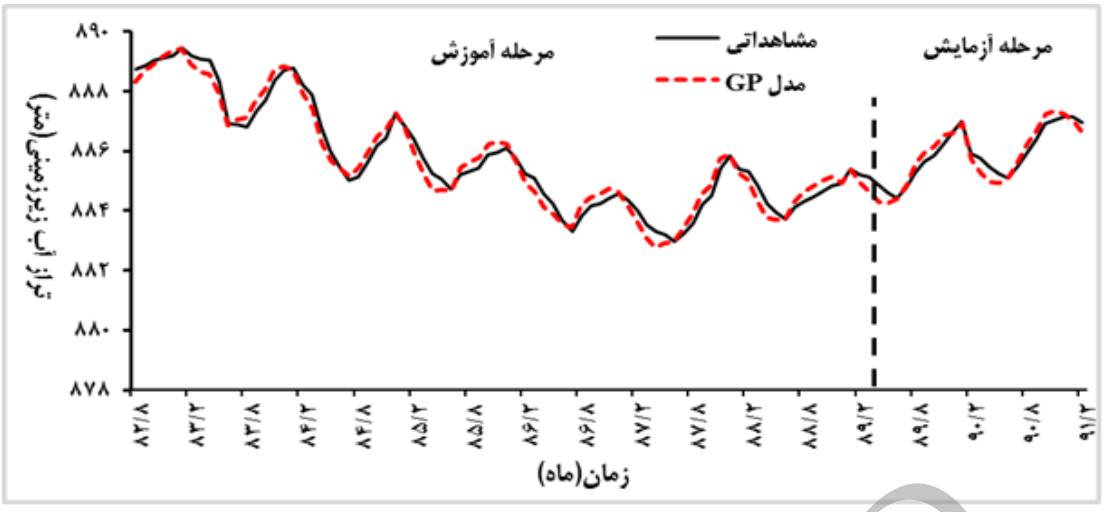
(۳)

$$\text{تراز آب در زمان } t_0 = d_2 + \left[\left((d_2/c_3)-(c_7)\right)/\left((d_2+d_1)+(d_1+d_0)\right)\right] + \left[\left((c_5)-(2d_0)\right)/\left((d_0+d_2)-(c_8)\right)\right]$$

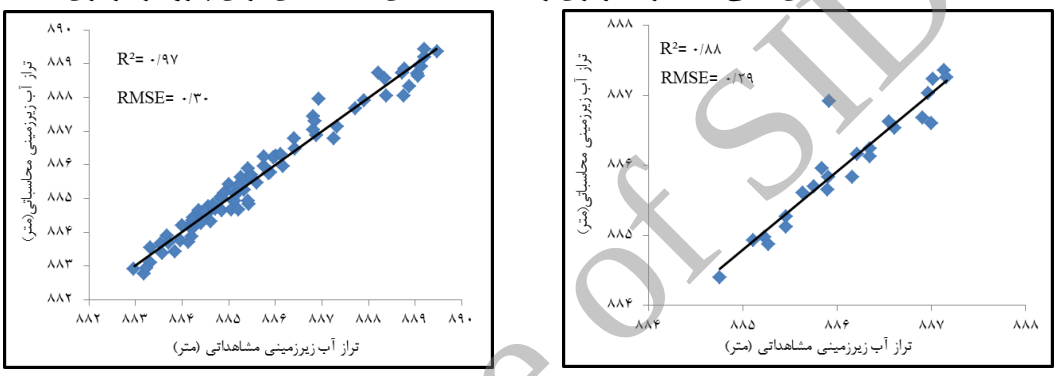
جدول ۶- نتایج مدل برنامه‌ریزی ژنتیک برای پیزومترهای منطقه مورد مطالعه

نام محل	UTM Y	UTM X	مرحله آموزش		مرحله آزمایش	
			RMSE	R^2	RMSE	R^2
جاده طالب گلی	۴۲۹۸۱۱۵	۵۵۱۹۵۲	۰/۰۶	۰/۹۵	۰/۱۰	۰/۸۱
تقاطع راه‌آهن	۴۲۹۸۵۴۶	۵۵۵۲۶۲	۰/۰۹	۰/۹۷	۰/۱۰	۰/۹۴
پلیس‌راه گرگر	۴۲۹۶۷۷۰	۵۵۳۰۶۵	۰/۰۵	۰/۹۸	۰/۲۰	۰/۷۶
جاده لیورجان	۴۲۹۷۳۲۶	۵۶۰۷۰۲	۰/۴۲	۰/۹۸	۰/۳۷	۰/۸۹
بلوار گرگر	۴۲۹۸۲۵۰	۵۵۹۲۰۵	۰/۲۴	۰/۹۲	۰/۱۰	۰/۹۴
جاده حیدرآباد	۴۲۹۹۷۷۰	۵۵۱۲۵۵	۰/۲۲	۰/۹۵	۰/۳۴	۰/۸۳
شهرک فرهنگیان	۴۲۹۸۹۵۸	۵۶۰۴۷۵	۰/۱۶	۰/۹۵	۰/۰۶	۰/۹۱
جنب کارواش	۴۳۰۰۸۹۰	۵۵۴۶۴۷	۰/۱۸	۰/۹۸	۰/۱۷	۰/۸۹
شهرک علمدار	۴۲۹۹۳۰۲	۵۵۷۷۲۲	۰/۳۰	۰/۹۷	۰/۲۹	۰/۸۸

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۸- حالت مقایسه‌ای نتایج مدل برنامه‌ریزی ژنتیک با داده‌های مشاهده‌ای برای پیزومتر مرکزی دشت



الف ب

شکل ۹- نتایج مدل برنامه‌ریزی ژنتیک با داده‌های مشاهده‌ای برای پیزومتر مرکزی، الف: مرحله آموزش ب: مرحله آزمایش

مقادیر ضرایب ثابت c_3، c_5، c_7 و c_8 برای ژن‌های یک تا سه که در عبارت درختی و در رابطه ۳ جای‌گذاری شده است. به قرار زیر است:

c_8=-۹/۱۲۳۶۸۷ ،c_7=-۰/۶۹۲۸۱ ،c_5=-۱/۴۵۴۷۴۲ ،

c_3= ۲/۸۸۱۸۰۶

از رابطه ۳ می‌توان به‌منظور پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در پیزومتر مرکزی دشت هادیشهر استفاده کرد به‌طوری‌که ضریب تبیین این رابطه برابر با R^2 = ۰/88 و RMSE= 0.29 m است. در جدول ۷ رابطه چند متغیره پیش‌بینی سطح آب در زمان t_0 برای پیزومترهای منتخب آمده است به‌طوری‌که d_0، d_1 و d_2 به ترتیب نشان‌دهنده‌ی پارامترهای تبخیر در زمان t_0، بارش در زمان t_0 و تراز آب زیرزمینی در زمان t_{0-1} است.

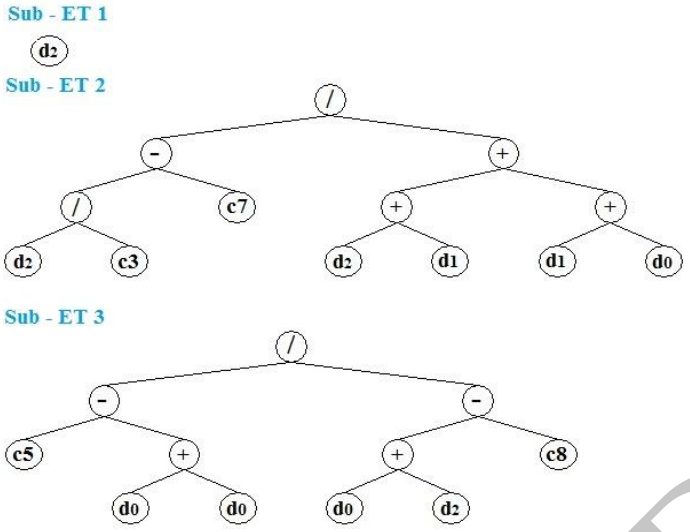
۴-۳- مقایسه نتایج مدل‌های نروفازی و برنامه‌ریزی ژنتیک

مقایسه نتایج به‌دست آمده از مدل‌های نروفازی و برنامه‌ریزی ژنتیک نشان داد که هر دو مدل قابلیت بالایی در پیش‌بینی و مدل‌سازی زمانی سطح آب زیرزمینی دارند اما نتایج مدل برنامه‌ریزی ژنتیک اندکی از مدل نروفازی بهتر است به‌طوری‌که میانگین RMSE برای پیزومترهای منتخب مدل شده در مرحله آزمایش برای مدل نروفازی حدود ۲۳ سانتی‌متر و برای مدل برنامه‌ریزی ژنتیک حدود ۱۹ سانتی‌متر است. لذا از نتایج مدل برنامه‌ریزی ژنتیک به‌عنوان ورودی مدل زمین‌آماری استفاده شد.

۴-۴- مدل ژنتیک ـ کریجینگ

هدف این مرحله از مطالعه، پیش‌بینی زمانی ـ مکانی سطح تراز آب‌های زیرزمینی در محدوده مطالعاتی به‌وسیله مدل ترکیبی برنامه‌ریزی ژنتیک و زمین‌آمار می‌باشد که به‌وسیله مدل‌سازی سطح تراز هر یک از پیزومترهای منتخب و استفاده از داده‌های پیش‌بینی شده بیست‌وچهار ماهه صورت می‌گیرد. به‌طوری‌که برای هرماه از پیش‌بینی انجام شده (۱۳۸۹-۱۳۹۱) یک مدل زمین‌آماری منفرد حاصل گردد.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱۰- درخت بیان با سه ژن برای پیزومتر مرکزی دشت هادیشهر

جدول ۷- رابطه چند متغیره بدست آمده برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در زمان t0 برای پیزومترهای منتخب

نام محل	رابطه چند متغیره بدست آمده برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی
جاده طالب گلی	t_0 تراز آب در زمان $= (c_1/d_2)+(d_0/c_2d_1d_2)+d_2$ ، c_1=36.2308457 , c_2=5.053405
تقاطع راه‌آهن	t_0 تراز آب در زمان $=[((d_1)/(d_2+d_0)+d_2)]+[((c_1)/(d_2+d_1+d_0))]+[(d_0)/(c_2d_2)]$ ، c_1=52.3658981 , c_2= -2.328369
پلیس‌راه گرگر	t_0 تراز آب در زمان $=[(c_1)/(d_2d_0+d_2)]+d_2-(c_2/d_2)+c_3$ ، c_1=9.28696758 , c_2=21.9640773 , c_3=2.30535779
جاده لیورجان	t_0 تراز آب در زمان $=d_1+[(c_1)-((c_2-d_2c_2)/d_2d_1)]+c_3$ ، c_1=0.245453 , c_2= -2.227722 , c_3=0.100311
بلوار گرگر	t_0 تراز آب در زمان $=d_2+(d_0d_2-d_0d_1)/2d_2+1/c_3$ ، c_3 = -9.985688
جاده حیدرآباد	t_0 تراز آب در زمان $=[(d_2)/(d_2+c_1d_0+c_2)]+c_3+d_2$ ، c_1=0.746399 , c_2=9.644379 , c_3=0.889587
شهرک فرهنگیان	t_0 تراز آب در زمان $=[(d_2)/(c_1+d_0-d_2)]+[(d_0)/(c_2-d_2)]+d_2$ ، c_1=-58.7664639 , c_2=51.4788554
جنب کارواش	t_0 تراز آب در زمان $=d_2+[(c_1)/((c_2d_1+d_0d_1)-d_2)]+[(d_1)/(d_2+3d_0-d_1+c_3)]$ ، c_1= -3.884674 , c_2= 9.987 , c_3= -9.18649

در این تحقیق برای بسط دادن نتایج به کل دشت و انجام پیش‌بینی زمانی ـ مکانی سطح آب زیرزمینی درکل دشت از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک به دلیل این‌که نتایج بهتری نسبت به مدل نروفازی داشت (میانگین RMSE مدل نروفازی حدود ۲۳ سانتی‌متر و مدل برنامه‌ریزی ژنتیک حدود ۱۹ سانتی‌متر) برای ترکیب با مدل‌های زمین‌آماری مانند کریجینگ استفاده شد و مدل ژنتیک- کریجینگ برای منطقه مورد مطالعه تهیه شد.

در این تحقیق ابتدا روند داده‌ها بررسی و حذف شد و به دلیل شرایط و داده‌ها با کریجینگ عادی بیشترین تطابق را داشت از روش کریجینگ عادی استفاده شد. در هر مدل زمین‌آماری اولین مرحله رسم نیم‌تغییرنما می‌باشد؛ بنابراین برای رسم آن نیاز به تعیین نوع توزیع داده است لذا از آزمون کولموگروف و اسمیرنوف[۱۶] برای بررسی آماره‌های (مانند متوسط، واریانس، چولگی و غیره) داده‌ها استفاده شد. این آزمون نشان داد که داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند. همچنین قبل از رسم نیم‌تغییرنما، همسانگرد[۱۷] و ناهمسانگرد[۱۸] بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت؛ نتایج نشان داد که داده‌ها همسانگرد بوده و ناهمسانگردی محسوسی ندارند؛ بنابراین نیم‌تغییرنما داده‌ها برای حالت همسانگرد رسم شد و مدل‌های تجربی مختلف (کروی، نمائی، خطی و گوسین) برازش داده شد تا بهترین مدل برای انجام مدل‌سازی نهایی مشخص شود؛ نتایج حاصل از برازش در جدول ۸ نشان داده شده است. شکل ۱۱ نیم‌تغییرنمای داده‌ها و مدل تجربی برازش داده شده برای مدل کریجینگ را نشان می‌دهد.

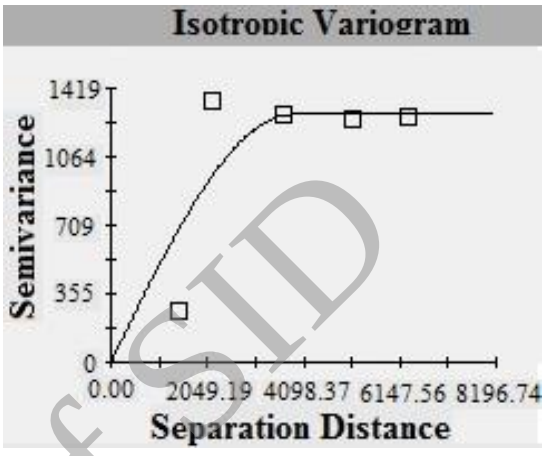
بر اساس جدول ۸، بهترین برازش مربوط به مدل کروی می‌باشد. معادله کلی نیم‌تغییرنما مدل کروی به‌صورت رابطه ۴ بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \gamma(h)=c\left(\frac{h}{a}-0.5\frac{h^3}{a^3}\right) & h<a \\ \gamma(h)=c(h) & h>a \end{cases} \quad (۴)$$

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۸- پارامترهای حاصل از برازش مدل‌های مختلف

مدل	اثر قطعه‌ای (C_0)	سقف (C_0+C)	$C/(C_0+C)$	R^2
کروی	۱	۱۲۸۳	۰/۹۹۹	۰/۸۶
نمائی	۱	۱۴۱۷	۰/۹۹۹	۰/۵۴
خطی	۰/۷۸	۱۴۲۲	۰/۵۹۲	۰/۳۳
گوسین	۱	۱۳۰۹	۰/۹۹۹	۰/۷۵



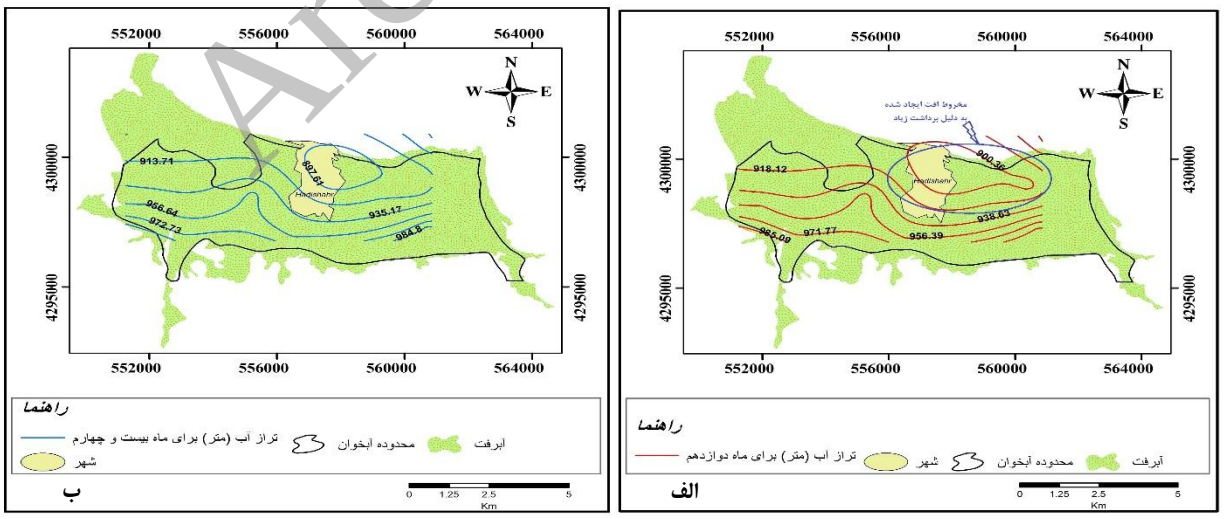
شکل ۱۱- نیم‌تغییرنما مدل کریجینگ

در رابطه ۴، $\gamma(h)$ نیم‌تغییرنما، h فاصله، a دامنه تأثیر و c سقف نیم‌تغییرنما می‌باشد. با توجه به نیم‌تغییرنما کروی مدل کریجینگ اجرا شد. شکل ۱۲ نتایج مدل کریجینگ ـ برنامه‌ریزی ژنتیک را در ماه‌های دوازدهم و بیست و چهارم مرحله آزمایش نشان می‌دهد. به دلیل این‌که از خروجی مدل برنامه‌ریزی ژنتیک به‌عنوان ورودی مدل زمین‌آمار استفاده شده لذا خطای حاصل از مدل کریجینگ ـ ژنتیک، مجموع خطاهای مدل‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و کریجینگ است.

با توجه به خطوط تراز نشان داده شده در شکل ۱۲، در دشت هادیشهر جهت غالب جریان آب زیرزمینی از جنوب به سمت شمال می‌باشد و این نشانگر آن است که عمده ورودی‌های آب زیرزمینی در ناحیه جنوب واقع شده است.

بالاترین تراز آب زیرزمینی در جنوب شرق دشت و در پیزومتر جاده لیوارجان و پایین‌ترین سطح تراز در نزدیکی شهر هادیشهر و قسمت شرقی شهر هادیشهر (به دلیل تمرکز اکثر چاه‌های بهره‌برداری) می‌باشد. از نکات جالبی که نقشه تراز آب زیرزمینی نشان می‌دهد وقتی از ناحیه دره‌دیزه‌چای (قسمت جنوب غربی دشت) آب زیرزمینی وارد دشت می‌گردد جریان دو قسمت می‌شود؛ قسمتی از آب زیرزمینی به سمت شمال شرق در امتداد دره مدفون در زیر هادیشهر جریان می‌یابد و قسمت دیگر به سمت شمال غرب (خروجی دشت و در جهت دره دیزه‌چای) جریان می‌یابند. در مابین این دو مسیر جریان، یک خط تقسیم وجود دارد که روند آن در جهت شمال شرق ـ جنوب غرب است؛ در این قسمت سنگ کف رس و مارنی بسیار بالاتر قرار گرفته و حتی در سطح زمین نیز برونزد دارد.

در قسمت غربی دشت که خطوط جریان به سمت شمال غرب می‌رسد، خطوط تراز کمترین ارتفاع تراز آب زیرزمینی را نشان داده و جریان آب زیرزمینی از محدوده دشت خارج می‌شود. جریان زیرزمینی دیگری از جنوب شرق دشت وارد محدوده می‌شود که با توجه به خطوط تراز آب زیرزمینی و جهت جریان، ابتدا اندکی به سمت غرب و سپس با تغییر جهت به سمت شمال دشت، ادامه مسیر می‌دهد.



شکل ۱۲- مدل کریجینگ ـ برنامه‌ریزی ژنتیک، الف- ماه دوازدهم (RMSE= 38 cm) و ب- ماه بیست و چهارم (RMSE= 46 cm)

Archive of SID
www.SID.ir

با توجه به خطوط هم‌پتانسیل نشان داده شده برای ماه‌های دوازده‌ام و بیست و چهارم مرحله پیش‌بینی بیشترین تغییرات خطوط تراز در محل پیزومترهای شهرک فرهنگیان و شهرک علمدار (نزدیکی شهر هادیشهر) است که یک مخروط افت بزرگی به‌وجود آمده است و مجموع آب‌های تغذیه‌کننده از جنوب شرق، ارتفاعات شمالی و دره دیزه‌چای همه به طرف شمال شرق و به سمت این مخروط افت متمرکز می‌شوند. این امر به دلیل تمرکز اکثر چاه‌های بهره‌برداری در این قسمت است؛ که برداشت زیاد و وضعیت عمق سنگ کف باعث ایجاد مخروط افت بزرگ در این ناحیه شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از روش‌های جدید هوش مصنوعی مانند نروفازی و برنامه‌ریزی ژنتیک به‌عنوان یک روش نسبتاً جدید، کارا و مفید برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در دشت هادیشهر استفاده شد. این مدل‌ها به علت توانایی بالا در مدل‌سازی قادر به حل بسیاری از مسائل پیچیده و پیش‌بینی پدیده‌های هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی می‌باشند. بارش و تبخیر در گام زمانی t_0 و سطح آب زیرزمینی در گام زمانی t_{0-1} ورودی‌های مدل‌های نروفازی و برنامه‌ریزی ژنتیک بودند. نتایج هر دو مدل NF و GP قابل‌قبول می‌باشند به‌طوری‌که مقدار RMSE مدل نروفازی و مدل برنامه‌ریزی در حد قابل قبول است. از مزایای استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک ارائه رابطه نهایی بین ورودی‌های مدل با استفاده از درخت بیان می‌باشد که با استفاده از این رابطه می‌توان به تأثیر پارامترهای استفاده شده به‌عنوان ورودی‌های مدل پی‌برد و در حقیقت یکی از برتری‌های اساسی مدل GP نسبت به NF این امر می‌باشد. نتایج نشان داد دقت مدل برنامه‌ریزی ژنتیک بیشتر از مدل نروفازی است به‌طوری‌که RMSE میانگین برای پیزومترهای منتخب در مرحله آزمایش در مدل برنامه‌ریزی ژنتیک ۱۹ سانتی‌متر و در مدل نروفازی ۲۳ سانتی‌متر به‌دست آمد؛ بنابراین مدل ترکیبی کریجینگ ـ ژنتیک ایجاد و برای پیش‌بینی زمانی ـ مکانی به‌دست آمد و نتایج شبیه‌سازی شده به کل دشت و مناطق فاقد پیزومتر بسط داده شد. با توجه به خطوط تراز، جهت غالب جریان آب زیرزمینی دشت هادیشهر از جنوب به سمت شمال می‌باشد. بالاترین تراز آب زیرزمینی در جنوب شرق دشت و پایین‌ترین سطح تراز در نزدیکی شهر هادیشهر و قسمت شرقی شهر هادیشهر می‌باشد که موجب ایجاد یک مخروط افت بزرگی شده است؛ این امر به دلیل تمرکز بیشتر چاه‌های بهره‌برداری در این قسمت، برداشت بی‌رویه و وضعیت سنگ کف می‌باشد. خطای به‌دست آمده از مدل ژنتیک ـ کریجینگ تا حدودی قابل‌قبول است؛ و برای بهبود این نتایج توصیه می‌شود که ترکیب روش‌های هوش مصنوعی مختلف در مطالعات بعدی استفاده شود.

پی نوشت‌ها

1- Artificial Intelligence
2- Genetic Algorithm (GA)
3- Neuro-Fuzzy (NF)
4- Wavelet
5- Genetic Programming (GP)
6-Bit String
7-Expression Trees
8- Simple Kriging
9- Ordinary Kriging
10- Universal Kriging
11- Subtractive
12- Head size
13- Number of Genes
14- Linking function
15- Bloat Phenomena
16- Kolmogorov-Smirnov
17- Isotope
18- Anisotropy

۶- مراجع

اصغری مقدم الف، نورانی و، ندیری ع (۱۳۸۸) پیش‌بینی زمانی و مکانی سطح آب‌های زیرزمینی در محدوده متروی شهر تبریز با استفاده از مدل کریجینگ عصبی. تحقیقات منابع آب ایران، جلد ۱۳، شماره ۱: ۱۴-۲۴.

اکبری م، جرگه مر، مدنی سادات ح (۱۳۸۸) بررسی افت سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مطالعه موردی: آبخوان دشت مشهد. پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، جلد ۱۶، شماره ۴: ۶۳-۷۸.

فربودفام ن، قربانی مع، اعلمی مت (۱۳۸۸) پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک. دانش آب‌وخاک، جلد ۱۹، شماره ۱.

ندیری ع‌ا، اصغری مقدم الف، عبقری ه، فیجانی ا (۱۳۹۲) توسعه مدل‌های هوش مصنوعی مرکب در برآورد قابلیت انتقال آبخوان مطالعه موردی: دشت تسوج. تحقیقات منابع آب ایران، جلد ۲۶، شماره ۱: ۱-۱۴.

نورانی و، طالب بیدختی ن، عابدینی مج، رخشندرو غر(۱۳۸۴) تخمین بار رسوبی معلق با استفاده از زمین‌آمار مطالعه‌ی موردی

Archive of SID
www.SID.ir

تلخه‌رود تبریز. تحقیقات منابع آب ایران، جلد ۱، شماره ۲: ۴۲-۵۰.

ندیری، ۱۳۸۷. پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در محدوده متروی شهر تبریز با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی، ۱۸۷ ص.

Affandi A, Watanabe K (2007) Daily groundwater level fluctuation forecasting using soft computing technique. J Nature and Science 5(2):1-10.

ASCE Task Committee on Geostatistical Techniques in Geohydrology of the Ground Water Hydrology Committee of the ASCE Hydraulics Division. (1990) Review of geostatistics in geohydrology, part I: Basic Concepts. J Hydrol. Eng 116:612-632.

Aytek A, Alp M (2008) An application of artificial intelligence for rainfall runoff modeling. J Earth Syst Sci 117 (2):145–155.

Barcae E, Passarella G (2008) Spatial evaluation of the risk of groundwater quality degradation: Acomparison between Disjunctive Kriging and geostatistical simulation. Journal of Environmental Monitoring and Assessment 133: 261-273.

Copertino VA, Molino B, Telesca V (1998) Spatial and temporal evolution of water quality in reservoirs. Phys Chem Earth 23(4): 475-478.

Cramer NL (1985) A representation for the adaptive generation of simple sequential programs. In: Proc. of International Conference on Genetic Algorithms and their Applications (ICGAA-1985), 24-26 July, Carnegie-Mellon Universality Pittsburgh, PA, USA, 183- 187.

Desbarats AJ, Logan CE, Hiton MJ, Sharpe DR (2002) On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model. J Hydrol 255: 25-38.

Ferreira C (2001a) Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. Complex Systems 13(2): 87–129.

Ferreira C (2006b) Automatically defined functions in gene expression programming. In: Nedjah, N, Mourelleh, L.de M, Abraham, A (Eds.), Genetic Systems Programming: Theory and Experiences, Studies in Computational Intelligence, Springer-Verlag, 13: 21–56.

Fetouani S, Sbaa M, Vanclooster M, Bendra B (2008) Assessing groundwater quality in the irrigated plain of Triffa (Northeast Morocco). Journal of Agricultural Water Management 95: 133-142.

Fijani E, Nadiri AA, Moghaddam AA (2013) Optimization of DRASTIC method by supervised committee machine artificial intelligence to assess groundwater vulnerability for Maragheh–Bonab plain aquifer, Iran. J Hydrology 503: 89-100.

Ghorbani MA, Makarynskyy O, Shiri J, Makarynska D (2009) genetic programming for Sea water level predictions in an island environment. Journal of Ocean and Climate systems 1(1): 27-36.

Ghorbani MA, Khatibi R, Aytek A, Makarynskyy O, Shiri J (2010) Sea water level forecasting using genetic programming and comparing the performance with artificial neural networks. Computers & Geosciences 36(5): 620-627.

Isaaks EH, Srivastava RM (1989) Applied Geostatistics. Oxford Universisity press 561p.

Kelin H, Huang Y, Li H, Li B, Chen D, Robert EW (2005) Spatial variability of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain. Environment International 31:893-903.

Koza JR (1992) Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection. Cambrigdge.MA: MIT Press.

Kurtulus B, 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.

Lallahem S, Mania J, Hani A, Najjar Y (2005) on the use of neural networks to evaluate ground water levels in fractured media. Journal of Hydrology 307: 92-111.

Liong SY, Gautam TR, Khu ST, Babovic V, Keijzer M, Muttil N (2002) Genetic programming, A new paradigm in rainfall runoff modeling. J Am Water Res Assoc 38(3): 705-718.

Lopes HS, Weinert, WR (2004) EGIPSYS: an enhanced gene expression programming approach for symbolic regression problems. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science 14(3): 375-384.

Maier HR, Jain A, Dandy GC, Sudheer KP (2010) Methods used for the development of neural networks for the prediction of water resource variables in river systems. Current status and future directions. Environmental Modelling & Software 25: 891-909.

Mehdipour FE, Haddad BO, Marin AM (2013) Prediction and simulation of monthly groundwater levels by genetic programming. J. Hydro-environment Research 7(4): 253-260.

Archive of SID

www.SID.ir

Saemi M, Ahmadi M (2008) Integration of genetic algorithm and a coactive neurofuzzy inference system for permeability prediction from well logs data. J Transp Porous Med 71: 273–288.

Shiri J, Kişi Ö (2011) Comparison of genetic programming with neuro-fuzzy systems for predicting short-term water table depth fluctuations. Computers & Geosciences 37: 1692-1701.

Taghizadeh Mehrjerdi R, Zareian M, Mahmodi Sh, Heidari A (2008) Spatial distribution of groundwater quality with geostatistics (Case study: Yazd-Ardakan plain), World Applied Science Journal. 4(1): 9-17.

Talei A, Chua LHC, Quek C (2010) A novel application of a neuro-fuzzy computational technique in event-based rainfall–runoff modeling. Expert Systems with Applications 37: 7456-7468.

Tayfur G, Nadiri AA, Moghaddam AA (2014) Supervised intelligent committee machine method for hydraulic conductivity estimation. J Water Resources Manage 28(4): 1173-1184.

Tutmez B, Hatipoglu Z, Kaymak U (2006) Modelling electrical conductivity of groundwater using an adaptive neuro-fuzzy inference system. Computers & Geosciences 32: 421-433.

Yan H, Zou Z, Wang H (2010) Adaptive neuro-fuzzy inference system for classification of water quality status. Journal of Environmental Sciences 22: 1891-1896.

Zounemat-Kermani M, Teshnehlab M (2008) Using adaptive neuro-fuzzy inference system for hydrological time series prediction. J Soft Computing 8(2): 928-936.

Moosavi V, Vafakhah M, Shirmohammadi B, Behnia N (2013) A wavelet-ANFIS hybrid model for groundwater level forecasting for different prediction periods. J Water Resour Manage 27: 1301–1321.

Motaghian HR, Mohammadi J (2011) Spatial estimation of saturated hydraulic conductivity from terrain attributes using regression, Kriging, and Artificial Neural Networks. Pedosphere 21(2): 170-177.

Nadiri AA, Chitsazan N, Tsai FTC, Moghaddam AA (2013b) Bayesian artificial intelligence model averaging for hydraulic conductivity estimation. J Hydrol Eng 19(3): 520-532.

Nadiri AA, Fijani E, Tsai FTC, Moghaddam AA (2013a) Supervised committee machine with artificial intelligence for prediction of fluoride concentration. J Hydroinformatics 15(4): 1474-1490.

Naoum S, Tsanis LK (2004) Ranking spatial interpolation techniques using a GIS-based DSS. J Global Nest 6(1): 1-20.

Nourani V, Mogaddam AA, Nadiri AO (2008) An ANN-based model for spatiotemporal groundwater level forecasting. J Hydrol Process 22: 5054– 5066.

Phillips DL, Dolph J, Marks D (1992) A comparison of geostatistical procedure for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. J Agr forest meteoral 58: 119-141.

Poli R, Langdon W, McPhee N, Koza J (2008) A field guide to genetic programming.

Prasad KL, Rastogi AK (2001) Estimating net aquifer recharge and zonal hydraulic conductivity values for Mahi Right Bank Canal project area, India by genetic algorithm. Journal of Hydrology 243: 149-161.

Archive of SID

www.SID.ir