

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

M.H. Habibi¹, A.A. Nadiri^{2*} and A. Asghari
Moghaddam³

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

ارائه مدل ترکیبی ژنتیک - 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 - 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 به صورت منفرد و ترکیبی به کار 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 - دوزال است. به منظور یافتن راهکارهایی مفید برای پیش‌بینی زمانی - 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 تیخیر 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 به طوری که RMSE میانگین برای پیژومترهای منتخب در مرحله آزمایش در مدل برنامه‌ریزی ژنتیک ۱۹ سانتی‌متر و در مدل نروفازی ۲۳ سانتی‌متر به دست آمد. لذا مدل برنامه‌ریزی ژنتیک برای ترکیب با مدل زمین‌آماری (کریجینگ) استفاده شد و در نهایت مدل ترکیبی کریجینگ - ژنتیک برای پیش‌بینی زمانی - مکانی به دست آمد؛ و نتایج شبیه‌سازی شده 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

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

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گرایش ایشناسی، دانشگاه تبریز.

۲- استادیار گروه علوم زمین دانشکده علوم طبیعی دانشگاه تبریز.

۳- استاد گروه علوم زمین دانشکده علوم طبیعی دانشگاه تبریز.

*- نویسنده مسئول

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. در واقع برنامه‌ریزی ژنتیک تعمیم و توسعه یافته الگوریتم ژنتیک می‌باشد. تفاوت اساسی بین GP و GA در طبیعت افراد است به طوری که در GA افراد به صورت رشته‌های خطی^۶ با طول ثابت به عنوان کروموزوم می‌باشند در حالی که در GP افراد به صورت غیرخطی با اندازه و شکل مختلف در درخت بیان^۷ می‌باشد. روش GP الهام‌یافته از طبیعت است به طوری که در این روش، کروموزوم‌ها اشخاص ساده‌ای هستند که به صورت غیرخطی، جمع و جور، نسبتاً کوچک و آسان به دستکاری ژنتیکی (تکتیر، 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, فرودفام و همکاران ۱۳۸۸، Ghorbani et al., 2010). همچنین از مطالعات و تحقیقات هیدرولوژیکی انجام شده با برنامه‌ریزی ژنتیک می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد؛ (Prasad and Rastogi (2001) استفاده از GA تخمینی از تغذیه آبخوان و مقادیر هدایت هیدرولیکی برای منطقه مطالعاتی در هند ارائه دادند، همچنین Mehdi-pour 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 هیدرولوژیکی از روش‌های مختلف زمین‌آمار به طور فراوان 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 (Taghizadeh et al., 2008, Barcae et al., 2008, Naoum et al., 2004, Desbarats et al., 2002, Phillips et al., 1992). اخیراً مدل‌های ترکیبی هوش مصنوعی و زمین‌آمار برای پیش‌بینی زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی استفاده شده است (Kelin et al., 2005, Nourani et al., 2008). همچنین ندیری (۱۳۸۷) از ترکیب مدل شبکه عصبی و زمین‌آمار مدلی برای

پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی از مسائل مهم در مطالعات هیدرولوژیکی 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 یا به عرصه مدل‌سازی در علوم مختلف از جمله آب‌های زیرزمینی گذارده‌اند (Nadiri et al., 2013a,b, Tayfur et al., 2014, Fijani et al., 2013). روش نروفازی (NF)^۳ یکی از روش‌های پرکاربرد و مفیدی است که در علوم مختلف به لحاظ کارایی بالای آن به طور وسیع استفاده می‌شود. این روش در حقیقت ترکیبی از روش فازی و شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد و از مزایای هر دو روش استفاده می‌کند. روش NF در مطالعات منابع آب به طور فراوان استفاده شده است (Talei et al., 2010, Kurtulus and Razack, 2010, Yan et al., 2010) از مطالعات هیدرولوژیکی انجام شده مرتبط با NF می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد. (Tutmez et al. (2006) از مدل نروفازی برای پیش‌بینی هدایت الکتریکی نمونه آب استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از غلظت کاتیون‌ها در آب زیرزمینی اقدام به پیش‌بینی هدایت الکتریکی در آب زیرزمینی کردند، (Affandi and Watanabe (2007) از مدل‌های هوش مصنوعی مانند NF سطح آب را براساس تأخیر زمانی مورد بررسی قرار دادند. نتایج 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 - نروفازی نسبت به روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، موجک - شبکه عصبی مصنوعی و نروفازی می‌تواند پیش‌بینی

۳-۲- هیدروژئولوژی و هیدروژئولوژی منطقه

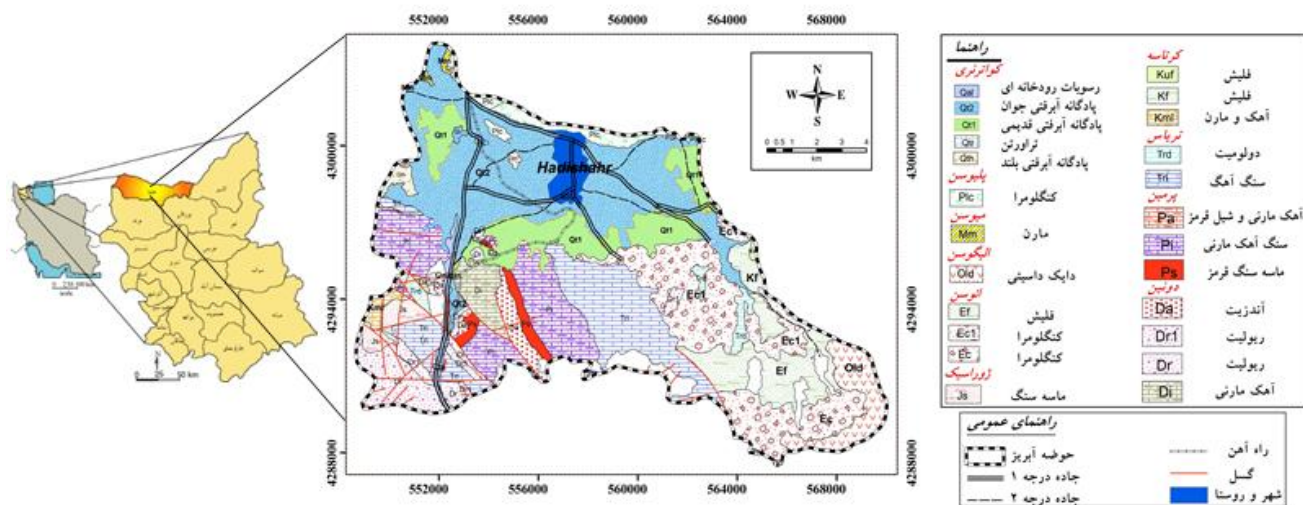
حوضه آبریز دشت هادیشهر را عمدتاً ارتفاعات واقع در جنوب دشت شامل کوه‌های دیوان داغی، قره‌گوز و دامنه‌های غربی کوه کیامکی به ترتیب از جنوب غرب تا جنوب شرق دشت تشکیل می‌دهند. در کل شیب دشت از جنوب شرق به شمال غرب است. مرتفع‌ترین نقطه حوضه آبریز با ارتفاعی حدود ۲۴۴۶ متر در ارتفاعات قره‌گوز در جنوب دشت و 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 هرنزدات سرچشمه می‌گیرد. بر اساس اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای و گمانه‌ها، آبخوان دشت هادیشهر از نوع آزاد است. همچنین بر پایه اطلاعات هواشناسی ۲۸ ساله (۹۱ - 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 دهانه چشمه و ۱۱ حلقه پیژومتر وجود دارد. شکل ۲ تصویری سه‌بعدی از منطقه مطالعاتی و مدل مفهومی از آبخوان را نشان می‌دهد.

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 شبیه‌سازی شده به کل دشت و مناطق فاقد پیژومتر استفاده شده است.

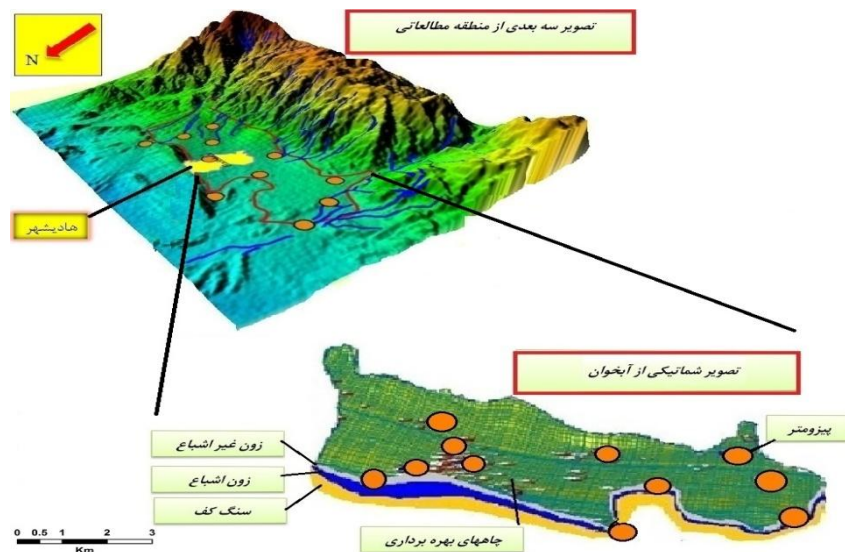
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

دشت هادیشهر در شمال غرب واحد زمین ساختی البرز - آذربایجان قرار گرفته است؛ این دشت که قسمتی از محدوده مطالعاتی جلفا - دوزال می‌باشد در شمال غربی استان آذربایجان شرقی و در فاصله ۱۱۰ کیلومتری شمال تبریز قرار گرفته که بر اساس تقسیمات هیدروژئولوژیکی در حوضه آبریز رودخانه ارس قرار دارد. مساحت کل حوضه آبریز دشت هادیشهر حدود ۱۸۰ کیلومترمربع است که دشت هادیشهر با امتداد شرقی - غربی با وسعتی معادل ۵۵/۵۷ کیلومترمربع می‌باشد. عبور راه‌آهن تبریز - جلفا و جاده آسفالت تبریز - 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.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته شده از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی ایران، ورقه جلفا، ۱۳۷۷)



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

۳-۳-۲- برنامه ریزی ژنتیک

برنامه ریزی ژنتیک که برای اولین بار توسط Cramer (1985) ابداع و سپس توسط Koza (1992) گسترش و بسط داده شد روشی از الگوریتم های تکاملی است که در واقع تعمیم و توسعه یافته الگوریتم ژنتیک (GA) می باشد. فرآیند گام به گام برنامه ریزی ژنتیک به صورت مراحل زیر است: ۱- یک جمعیت اولیه از توابع مرکب نشان دهنده الگوهای پیش بینی، به صورت تصادفی در نظر گرفته می شود (ایجاد کروموزوم ها). ۲- معرفی جمعیت اولیه (کروموزوم ها) به رایانه و ارزیابی هر یک از افراد (ژن) جمعیت مذکور با استفاده از توابع برازش (شناسایی مؤثرترین افراد در ماهیت پدیده). ۳- انتخاب ژن های مؤثر به منظور تکثیر، جهش، جفت گیری و تولیدمثل افراد جدید با صفات اصلاح شده (فرزندان). ۴- اعمال فرآیند توسعه ای 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 مجموعه های اولیه از راه حل های تصادفی که جمعیت نامیده می شود کار خود را آغاز می کند. هر فرد در این جمعیت، کروموزوم نامیده می شود که نماینده راه حل برای مسئله مورد نظر است. سپس کروموزوم ها که به صورت درختی (ET) نشان داده شده اند، با یک تابع برازش ارزیابی می گردد تا میزان مناسب بودن یک راه حل در حیطه مسئله تعیین گردد. این جمعیت به کمک عملگرهای ژنتیکی، طی نسل های متمادی تکامل می یابد. هدف از این کار، دقیقاً همانند سازش پذیری طبیعی ژنتیکی، ایجاد جمعیت ها یا نسل هایی از جمعیت قبلی است که نسبت به آن ها با محیط تطابق بهتری دارند (Lopes and Weinert, 2004).

مطالعه و مدل سازی سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت هادیشهر که به سبب برداشت بی رویه در سال های اخیر دچار افت شدیدی شده و یک دشت ممنوعه می باشد و همچنین آب های زیرزمینی این دشت مهم ترین منبع کشاورزی و آشامیدن می باشد؛ 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، به احتمال زیاد برداشت بیش از حد می باشد.

۳-۳-۳- روش تحقیق

۳-۳-۱- روش نروفازی

روش نروفازی شبکه تطبیق پذیر 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 می باشد و از مزایای هر دو روش استفاده می کند به طوری که از شبکه عصبی مصنوعی برای بهینه کردن مدل فازی استفاده می شود. در این روش شبکه عصبی مصنوعی به جای بهینه کردن وزن ها، قوانین و توابع عضویت فازی را بهینه می کند. در روش نروفازی تنها می توان 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 می توان در تحقیقات (Zounemat-Kermani and Teshnehlab, 2008) (Maier et al., 2010) به دست آورد.

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

محل پیژومتر	UTM X	UTM Y	تراز آب زیرزمینی (متر) در فروردین ماه 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 راه آهن	۵۵۵۲۶۲	۴۲۹۸۵۴۶	۹۶۱/۹۷	۹۶۵/۴۵	-۳/۴۸
بلوار گرگر	۵۵۹۲۰۵	۴۲۹۸۲۵۰	۹۱۸/۹۷	۹۲۱/۲۷	-۲/۳

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

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 می باشد که به صورت رابطه ۲ ارائه می گردد. به طوری که x_i نتایج مشاهداتی برای \bar{x} میانگین نتایج مشاهداتی، y_i نتایج محاسباتی برای \bar{y} میانگین نتایج محاسباتی است.

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

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

۳-۵- آنالیز داده ها

انتخاب ورودی های مناسب، یکی از مهم ترین مواردی است که بایستی در مدل سازی به روش هوش مصنوعی مورد توجه قرار گیرد. این امر در شرایطی که از داده های ورودی مختلفی بهره برده می شود، از اهمیت مضاعفی برخوردار است. چرا که ارائه داده های ورودی غیرمرتبط، سبب کاهش دقت مدل می شود. در دشت هادیشهر ۱۱ حلقه پیژومتر وجود دارد که از ۹ پیژومتر که انطباق خوبی با شرایط هیدروژئولوژیکی و داده ها داشت، استفاده شد. در این تحقیق، متوسط تبخیر و بارش ماهانه و سطح آب زیرزمینی ماهانه در بازه زمانی مهرماه ۱۳۸۲ تا شهریورماه ۱۳۹۱، به عنوان ورودی های مدل های نروفازی و برنامه ریزی ژنتیک استفاده شدند. تبخیر و بارش ماهانه توسط ایستگاه سینوپتیک جلفا و سطح آب زیرزمینی ماهانه پیژومترهای انتخاب شده توسط سازمان آب منطقه ای استان آذربایجان شرقی اندازه گیری شده است. پس از آنالیز حساسیت و انتخاب ورودی های مختلف در گام های مختلف زمانی در نهایت از بارش و تبخیر در گام زمانی t_0 و سطح آب زیرزمینی در گام زمانی t_{0-1} به عنوان ورودی های مدل های زمانی استفاده شد.

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

۳-۳- روش زمین آمار

یکی از ساده ترین روش های تخمین مکانی زمین آماری، کریجینگ است، در این روش با توجه به نحوه توزیع مکانی متغیر مورد نظر به تخمین مقادیر مجهول در موقعیت های مکانی مطلوب و معلوم پرداخته می شود (Isaaks and Srivastava, 1989). از انواع روش های کریجینگ می توان به کریجینگ ساده^۱، کریجینگ عادی^۲ و کریجینگ عمومی^۳ اشاره کرد. به طوری که کریجینگ ساده از دیگر روش های کریجینگ ساده تر می باشد 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 داده هایی که دارای روند محلی یا مقطعی هستند می تواند مورد استفاده قرار گیرد. در کریجینگ عمومی مقدار میانگین متغیر و نامعلوم است. این روش در واقع تلفیق روش کریجینگ با روند محلی می باشد و برخلاف کریجینگ عادی که فرض می شد روند تغییرات میانگین در تمام ناحیه ثابت است، میانگین نقاط تابعی از مختصات جغرافیای مکان ها می باشد (ASCE, 1990). توضیحات و اطلاعات بیشتر در مورد روش های تخمین مکانی زمین آماری را می توان در تحقیقات (Isaaks and Srivastava, 1989) و (ASCE, 1990) به دست آورد.

۳-۴- ارزیابی دقت مدل

در این تحقیق از دو معیار جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) به منظور ارزیابی کارایی و توانایی مدل ها استفاده شد. RMSE اختلاف مابین مقدار مشاهده شده و مقادیر محاسبه شده را نشان می دهد. کمترین مقدار RMSE بالاترین صحت پیشگویی را نشان می دهد. RMSE به صورت رابطه ۱ محاسبه می شود:

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

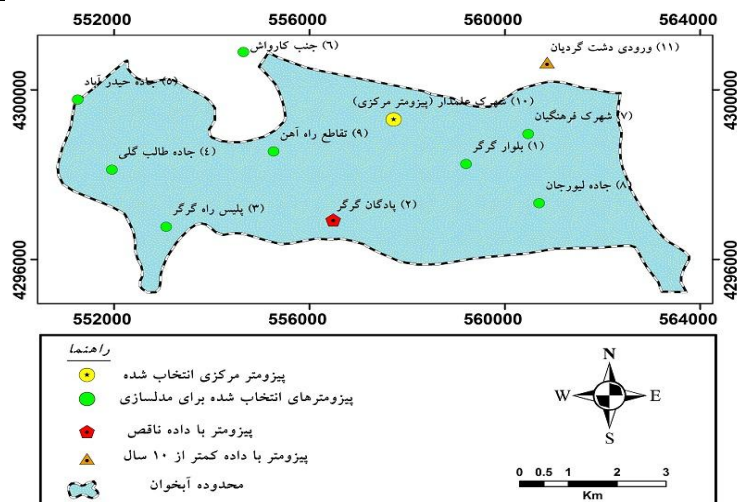
مرحله اول پیش‌بینی زمانی سطح آب زیرزمینی استفاده از روش نروفازی بود. این روش ترکیبی از روش فازی و شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد که از مزایای هر دو روش استفاده می‌کند به طوری که از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای بهینه‌سازی مدل فازی استفاده می‌شود.

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) که 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

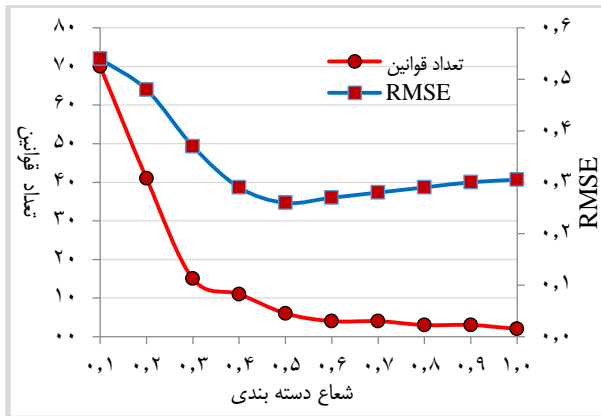
جدول ۲- مشخصات آماری متغیرهای استفاده شده

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 راه آهن (متر)	۹۶۰/۷۳	۹۶۵/۵۳	۹۶۳/۸۶	۱/۳۹
تراز آب پیزومتر پلیس راه 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

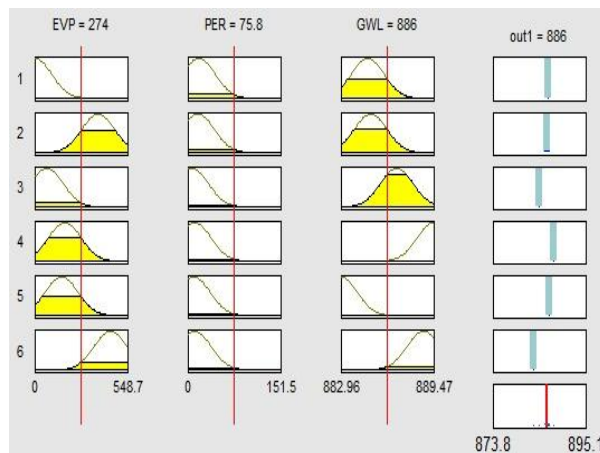


شکل ۳- موقعیت پیزومترهای منتخب و پیزومتر مرکزی انتخاب شده

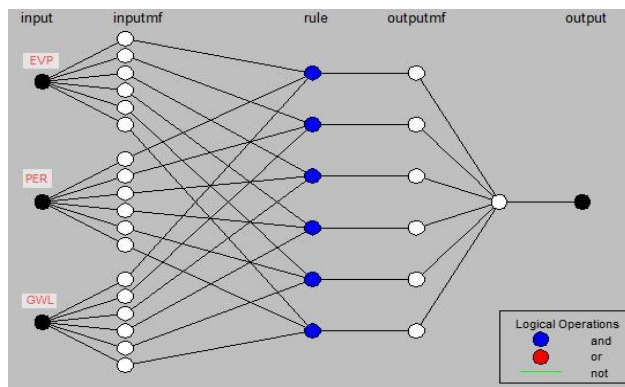
زیرزمینی در گام زمانی t_{0-1} به عنوان ورودی‌های مدل‌های GP استفاده شد. برای تعیین بهتر پارامترها و عمل‌گرها در مدل برنامه‌ریزی ژنتیک یکی از پیرومترها که معرف ویژگی‌های کلی دشت باشد به عنوان پیرومتر مرکزی دشت انتخاب شد. در اجرا و مدل‌سازی به روش GP انتخاب و تعیین توابع و عمل‌گرهای مختلف ریاضی بسیار حائز اهمیت است چون این توابع و عمل‌گرها در



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



شکل ۵- قوانین فازی ایجاد شده برای ورودی‌های مدل



شکل ۶- مدل نروفازی به دست آمده برای پیرومتر مرکزی دشت

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 شود که در این تحقیق نیز از مدل فازی ساگنو با دسته‌بندی کاهشی^{۱۱} 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 پیرومتر مرکزی دشت به دست آمد، بنابراین شعاع بهینه برای مدل‌سازی پیرومترهای 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 پیرومتر 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 به دست آمده برای پیرومتر مرکزی دشت را نشان می‌دهد.

۴-۲- مدل برنامه‌ریزی ژنتیک

۴-۲-۱- پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در پیرومتر مرکزی و پیرومترهای منتخب

به‌مانند روش NF، از بارش و تبخیر در گام زمانی t_0 و سطح آب

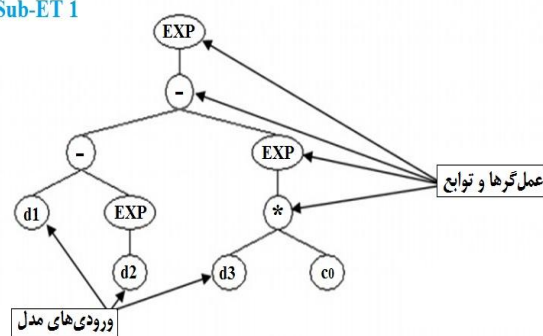
جدول ۳- نتایج مدل NF برای پیژومترهای منتخب منطقه مورد مطالعه

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

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

از گام‌های مهم و اساسی در توسعه و ساخت مدل GP، انتخاب تعداد کروموزوم‌ها، اندازه هد^۱، تعداد ژن^۳ 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 آزمون و خطا برای پیژومتر 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 روش GP و روش آزمون و خطا در این تحقیق از عملیات جمع به منظور تابع اتصال برای برقراری ارتباط بین ژن‌ها استفاده شده است.

Sub-ET 1



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

رابطه‌ای که بین ورودی‌های مدل در درخت بیان (ET) به وجود 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 پیژومتر مرکزی آورده شده که برای مقایسه نتایج و تعیین بهترین حالت از RMSE و R² استفاده شده است. با توجه به نتایج مشخص شد که بهترین دسته تابع، دسته اول است.

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

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

آمده نشان‌دهنده‌ی کارایی مناسب و دقت قابل قبول روش GP در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی است.

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

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

از فواید استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک تولید درخت بیان می‌باشد که در این تحقیق نیز برای پیرومتر مرکزی دشت در شکل ۱۰ آورده شده است. با استفاده از عبارت درختی، تابع نگاشتی برای پیرومتر 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)

$$t_0 = d_2 + \left[\frac{((d_2/c_3) - (c_7))}{((d_2 + d_1) + (d_1 + d_0))} \right] + \left[\frac{((c_5) - (2d_0))}{((d_0 + d_2) - (c_8))} \right]$$

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

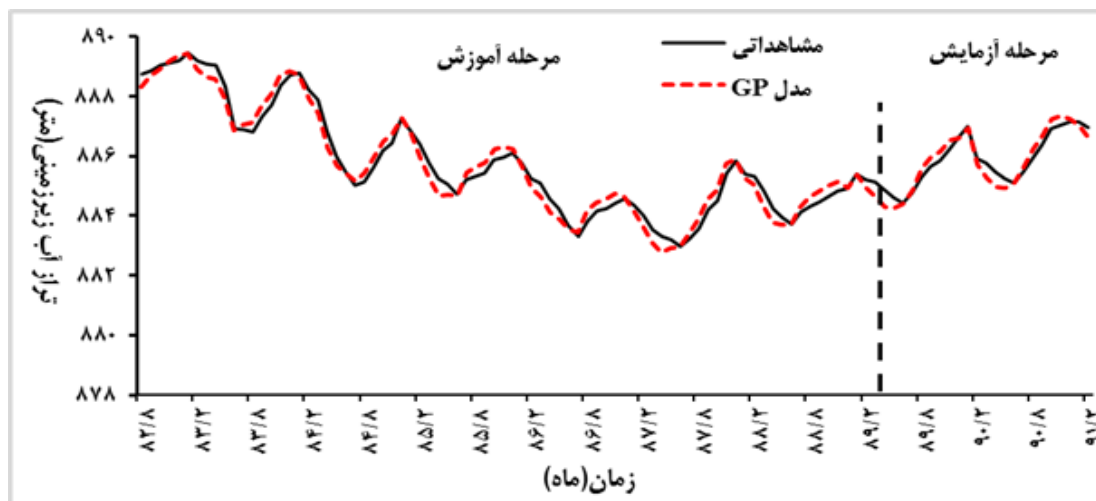
مرحله آزمایش		مرحله آموزش		UTM X	UTM Y	نام محل
R ²	RMSE	R ²	RMSE			
۰/۸۱	۰/۱۰	۰/۹۵	۰/۰۶	۵۵۱۹۵۲	۴۲۹۸۱۱۵	جاده طالب گلی
۰/۹۴	۰/۱۰	۰/۹۷	۰/۰۹	۵۵۵۲۶۲	۴۲۹۸۵۴۶	تقاطع راه آهن
۰/۷۶	۰/۲۰	۰/۹۸	۰/۰۵	۵۵۳۰۶۵	۴۲۹۶۷۷۰	پلیس راه گرگر
۰/۸۹	۰/۳۷	۰/۹۸	۰/۴۲	۵۶۰۷۰۲	۴۲۹۷۳۲۶	جاده لیورجان
۰/۹۴	۰/۱۰	۰/۹۲	۰/۲۴	۵۵۹۲۰۵	۴۲۹۸۲۵۰	بلوار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

انتخاب چند عمل‌گر به‌طور هم‌زمان موجب پیچیده شدن روابط (افزایش عمق درخت بیان) می‌شود که به این امر پدیده پف کردن^{۱۵} 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 پیرومتر مرکزی در جدول ۵ آورده شده است.

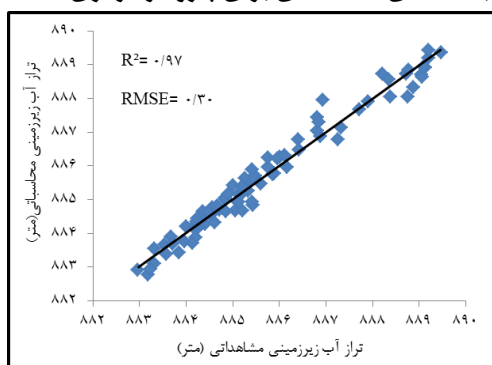
جدول ۵- نوع و نرخ بهینه پارامترها و عمل‌گرهای به‌دست آمده برای مدل‌سازی پیرومتر مرکزی دشت هادیشهر

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
جابه‌جایی IS	۰/۱
جابه‌جایی RIS	۰/۱
تابع برازش	RMSE
توابع و عمل‌گرها	{+, -, ×, ÷}

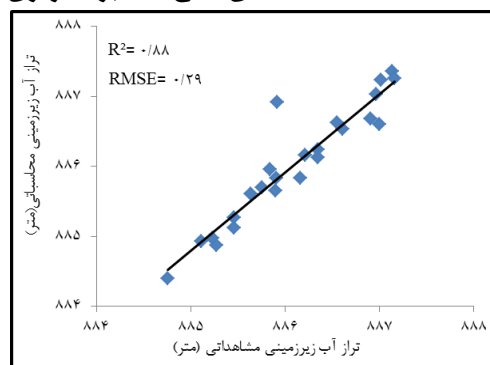
با توجه به نوع و نرخ بهینه پارامترها و عمل‌گرهای به‌دست آمده، مدل سطح آب زیرزمینی برای پیرومتر مرکزی و پیرومترهای منتخب تهیه شد که نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است. نتایج به‌دست



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



الف



ب

شکل ۹- نتایج مدل برنامه‌ریزی ژنتیک با داده‌های مشاهده‌ای برای پیژومتر مرکزی،

الف: مرحله آموزش ب: مرحله آزمایش

زمانی سطح آب زیرزمینی دارند اما نتایج مدل برنامه‌ریزی ژنتیک اندکی از مدل نروفازی بهتر است به طوری که میانگین RMSE برای پیژومترهای 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 زمین‌آماري استفاده شد.

۴-۴- مدل ژنتیک - کریجینگ

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

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:

$$c_8 = -9/123687, \quad c_7 = -0/69281, \quad c_5 = -1/454742, \\ c_3 = 2/881806$$

از رابطه ۳ می‌توان به‌منظور پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در پیژومتر مرکزی دشت هادیشهر استفاده کرد به طوری که ضریب تبیین این رابطه برابر با $R^2 = 0.88$ و $RMSE = 0.29$ m است. در جدول ۷ رابطه چند متغیره پیش‌بینی سطح آب در زمان t_0 برای پیژومترهای منتخب آمده است به طوری که d_0 ، d_1 و d_2 به ترتیب نشان‌دهنده پارامترهای تبخیر در زمان t_0 ، بارش در زمان t_0 و تراز آب زیرزمینی در زمان $t_{0.1}$ است.

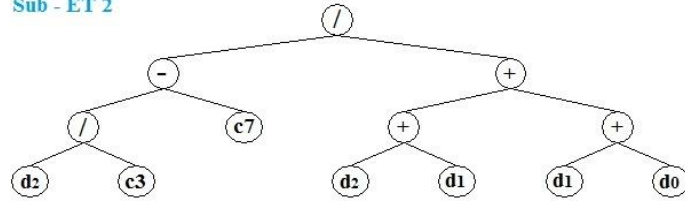
۴-۳- مقایسه نتایج مدل‌های نروفازی و برنامه‌ریزی ژنتیک

مقایسه نتایج به‌دست آمده از مدل‌های نروفازی و برنامه‌ریزی ژنتیک نشان داد که هر دو مدل قابلیت بالایی در پیش‌بینی و مدل‌سازی

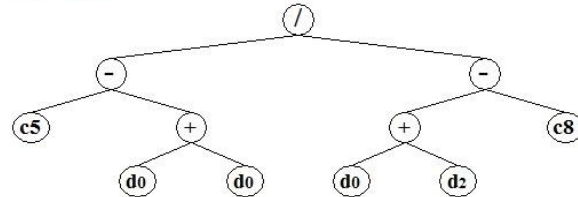
Sub - ET 1

(d2)

Sub - ET 2



Sub - ET 3



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

جدول ۷- رابطه چند متغیره بدست آمده برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در زمان t_0 برای پیرومترهای منتخب

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

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 به صورت رابطه ۴ بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \gamma(h) = c \left(\frac{h}{a} - 0.5 \frac{h^2}{a^2} \right) & h < a \\ \gamma(h) = c(h) & h > a \end{cases} \quad (4)$$

در این تحقیق برای بسط دادن نتایج به کل دشت و انجام پیش‌بینی زمانی - مکانی سطح آب زیرزمینی در کل دشت از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک به دلیل این که 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 زمین‌آماري مانند کریجینگ استفاده شد و مدل ژنتیک- کریجینگ برای منطقه مورد مطالعه تهیه شد.

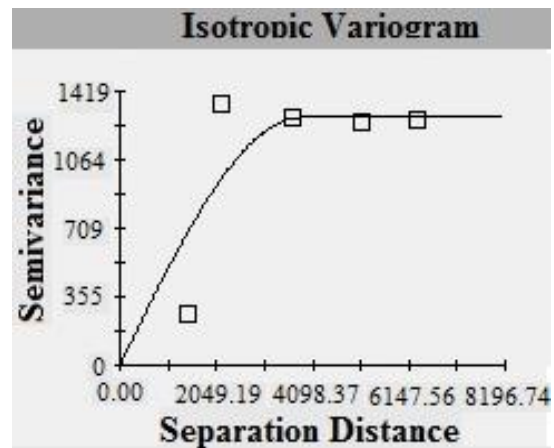
در این تحقیق ابتدا روند داده‌ها بررسی و حذف شد و به دلیل شرایط و داده‌ها با کریجینگ عادی بیشترین تطابق را داشت از روش کریجینگ عادی استفاده شد. در هر مدل زمین‌آماري اولین مرحله رسم نیم‌تغییرنما می‌باشد؛ بنابراین برای رسم آن نیاز به تعیین نوع توزیع داده است لذا از آزمون کولمولگروف و اسمیرنوف^{۱۶} برای بررسی آماره‌های (مانند متوسط، واریانس، چولگی و غیره) داده‌ها استفاده شد. این آزمون نشان داد که داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت

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

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.

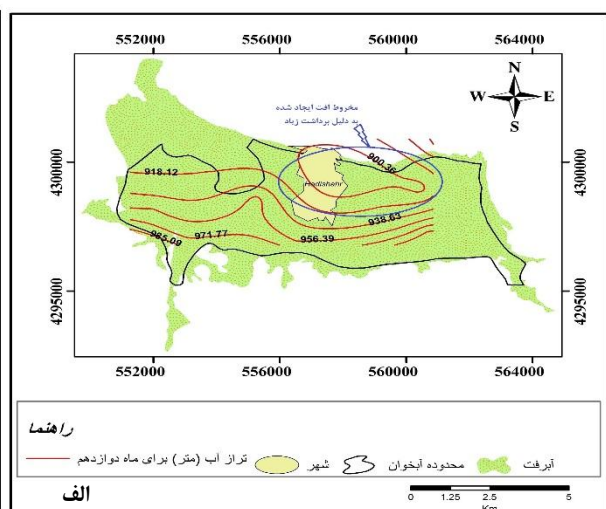
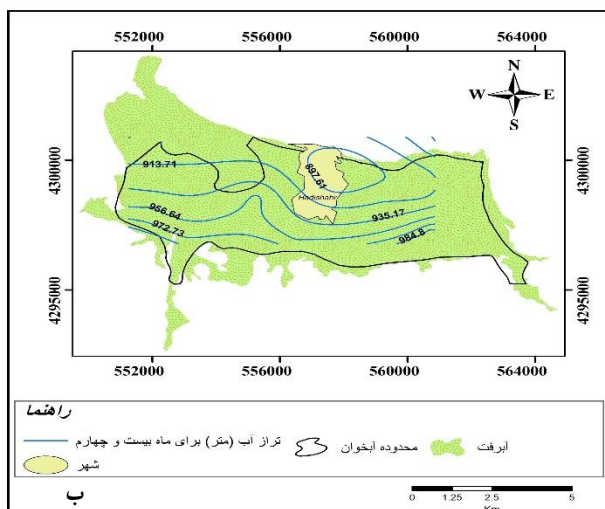
بالاترین تراز آب زیرزمینی در جنوب شرق دشت و در پیژومتر جاده لیوارجان و پایین‌ترین سطح تراز در نزدیکی شهر هادیشهر و قسمت شرقی شهر هادیشهر (به دلیل تمرکز اکثر چاه‌های بهره‌برداری) می‌باشد. از نکات جالبی که نقشه تراز آب زیرزمینی نشان می‌دهد وقتی از ناحیه دره‌دیزه‌چای (قسمت جنوب غربی دشت) آب زیرزمینی وارد 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 می‌یابد. در مابین این دو مسیر جریان، یک خط تقسیم وجود دارد که روند آن در جهت شمال شرق - جنوب غرب است؛ در این قسمت سنگ کف رس و مازنی بسیار بالاتر قرار گرفته و حتی در سطح زمین نیز بروز دارد.



شکل ۱۱- نیم‌تغییرنا مدل کریجینگ

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.

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



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

ترکیب روش‌های هوش مصنوعی مختلف در مطالعات بعدی استفاده شود.

پی‌نوشت‌ها

- 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 آب‌و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، جلد ۱۶، شماره ۴: ۶۳-۷۸.

فربودفام ن، قربانی م، اعلمی م (۱۳۸۸) پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک. دانش آب‌و خاک، جلد ۱۹، شماره ۱.

ندیری ع، 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 م، رخسندرو غ (۱۳۸۴) تخمین بار رسوبی معلق با استفاده از زمین‌آمار مطالعه‌ی موردی

با توجه به خطوط هم‌پتانسیل نشان داده شده برای ماه‌های دوازدهام و بیست و چهارم مرحله پیش‌بینی بیشترین تغییرات خطوط تراز در محل پیژومترهای شهرک فرهنگیان و شهرک علمدار (نزدیکی شهر هادیشهر) است که یک مخروط افت بزرگی به وجود 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 قابل قبول می‌باشند به طوری که مقدار RMSE مدل نروفازی و مدل برنامه‌ریزی ژنتیک 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 به طوری که RMSE میانگین برای پیژومترهای منتخب در مرحله آزمایش در مدل برنامه‌ریزی ژنتیک ۱۹ سانتی‌متر و در مدل نروفازی ۲۳ سانتی‌متر به دست آمد؛ بنابراین مدل ترکیبی کریجینگ - ژنتیک ایجاد و برای پیش‌بینی زمانی - مکانی به دست آمد و نتایج شبیه‌سازی شده به کل دشت و مناطق فاقد پیژومتر 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 به دست آمده از مدل ژنتیک - کریجینگ تا حدودی قابل قبول است؛ و برای بهبود این نتایج توصیه می‌شود که

- 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, Aytok 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 University 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*. Cambridge, 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) EGIPSY: 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.
- 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.
- Aytok 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: A comparison 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 University 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, Mourelle, 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

- 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 meteorol* 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.