

## مدل سازی تراز آب زیرزمینی دشت میاندوآب با استفاده از الگوریتم های انتخابات، ژنتیک و روش شبکه عصبی مصنوعی

سمیه امامی<sup>۱\*</sup>، یحیی چوپان<sup>۲</sup>، جواد پارسا<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری سازه های آبی دانشگاه تبریز

۲. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۱۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۷/۰۱)

### چکیده

پیش بینی تغییرات تراز آب زیرزمینی در دوره های آبی و امکان برنامه ریزی و مدیریت منابع آب برای بهبود شرایط آبخوان در آینده، بسیار مهم است. در پژوهش حاضر، برای اولین بار با استفاده از الگوریتم انتخابات که یک الگوریتم تکرارشونده است و از انتخابات ریاست جمهوری الهام گرفته و با مجموعه ای از راه حل های شناخته شده به عنوان جمعیت کار می کند، به پیش بینی تراز آب زیرزمینی دشت میاندوآب در استان آذربایجان غربی پرداخته شد و نتایج به دست آمده از این روش با نتایج روش های شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک مقایسه شد. داده های تراز سطح آب دشت میاندوآب، داده های هواشناسی مانند دما، بارش، رطوبت، تبخیر و داده های آب های سطحی در دوره آماری ۱۳۸۵-۱۳۹۵ در مقیاس ماهانه برای آموزش و آزمون مدل ها استفاده شد. براساس محاسبه های انجام شده و نتایج به دست آمده از پارامترهای آماری، الگوریتم انتخابات به ترتیب با مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و معیار نش-ساتکلیف (NSE)، ۰/۹۳ و ۰/۷۴ نسبت به دو روش شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک، توانایی درخور توجهی در پیش بینی تراز سطح آب زیرزمینی دارد و نتایج قابل اطمینانی را ارائه می دهد.

**کلیدواژگان:** آب زیرزمینی، الگوریتم انتخابات، مدل سازی، منابع آب.

## مقدمه

منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از منابع اصلی تأمین‌کننده آب شیرین در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران محسوب می‌شوند. حوضه آبریز دریاچه ارومیه یکی از مناطقی است که در آن بخش درخور توجهی از نیاز آبی با اتکا به منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود و طی دو دهه اخیر به دلیل نبود مدیریت صحیح منابع آب، با مشکلات بسیاری از جمله کاهش سطح آب دریاچه به علت کاهش آب ورودی از طریق رودخانه‌ها روبه‌رو شده است. سیستم آب سطحی و زیرزمینی در این حوضه آبریز به‌صورت مستقل از هم عمل نمی‌کنند و تأثیر متقابل بر یکدیگر دارند. از این‌رو، هرگونه بهبود در چگونگی بهره‌برداری از آبخوان‌های این حوضه می‌تواند به روند تأمین نیاز آبی دریاچه کمک کند [۱]. مدیریت صحیح منابع آب در دشت میاندوآب که به‌عنوان اصلی‌ترین دشت‌های حوضه آبریز دریاچه، حدود ۵۰ درصد از تمامی آب‌های سطحی واردشده به دریاچه ارومیه را از خود عبور می‌دهد، می‌تواند کارکرد مهمی در بهبود وضعیت دریاچه داشته باشد. بنابراین، ارزیابی تأثیر مدیریت مناسب منابع آب زیرزمینی در دشت میاندوآب ضروری به‌نظر می‌رسد [۲]. مدل‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های عددی، شناخت کافی از وضعیت آبخوان و ارتباط آن با سایر منابع آبی را در اختیار بهره‌برداران قرار داده و بررسی تأثیر عوامل مختلف روی تغییرات منابع آب زیرزمینی را آسان می‌کند. در سال‌های اخیر کاربرد سامانه‌های هوشمند برای پیش‌بینی و مدل‌سازی تراز آب زیرزمینی به سرعت رو به افزایش است که دلیل این امر به آسانی کاربرد و دقت زیاد این مدل‌ها در تقریب معادله‌های غیرخطی و پیچیده ریاضی برمی‌گردد [۳].

## پیشینه تحقیق

الگوریتم‌های فراابتکاری یا فراتکاملی (نوعی از الگوریتم‌های تصادفی هستند که برای یافتن پاسخ بهینه به‌کار می‌روند) یکی از انواع الگوریتم‌های برون‌رفت از نقاط بهینه محلی هستند و قابلیت کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل را دارند [۴ و ۵] و در شبکه‌های عصبی مصنوعی به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی وضعیت تراز سطح ایستابی و منابع آب‌های زیرزمینی به کار می‌روند. تا کنون مطالعات مختلفی توسط پژوهشگران در مناطق مختلف در این زمینه صورت گرفته است که به برخی از آنها اشاره می‌شود:

محتشم و همکارانش [۳] به‌منظور پیش‌بینی سطح ایستابی دشت بیرجند از شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد با استفاده از شبکه عصبی می‌توان تراز آب زیرزمینی را تا ۱۲ ماه بعد و با دقت بیشتر نسبت به روش‌های دیگر تخمین زد. یانگ و همکارانش [۶] برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در غرب چین از شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند و عملکرد این مدل را مناسب دانستند. شیری و کیسی [۷] به‌منظور بررسی نوسانات کوتاه‌مدت سطح آب زیرزمینی دو چاه در ترکیه، از روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و فازی-عصبی استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش ایشان بیان‌کننده مناسب بودن دو روش یادشده در بررسی نوسانات سطح ایستابی بود. رجائی و پور اصلان [۸] به پیش‌بینی زمانی و مکانی تراز آب زیرزمینی دشت داورزن با استفاده از روش‌های پرسپترون چند لایه شبکه عصبی و کریجینگ پرداختند. داده‌های ورودی شامل سری زمانی آب زیرزمینی به مدت هشت سال بود. نتایج مطالعه آنان نشان داد روش شبکه عصبی به ترتیب با میانگین ضریب انطباق و ضریب همبستگی ۰/۶۸۸ و ۰/۶۵۷ نتایج قابل قبولی را برای دشت داورزن ارائه داد. محمودی جم و همکارانش [۹] با استفاده از رویکرد ترکیبی الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و اطلاعات مکانی (GIS) به پتانسیل‌سنجی منابع آب زیرزمینی دشت مهران اقدام کردند. پس از حل معادلات بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO به این نتیجه رسیدند که نقشه‌های شیب، تراکم خطواره و تراکم زهکشی در هر دو حالت حل مسئله پتانسیل‌سنجی به روش PSO، کمترین ضرایب را به خود اختصاص دادند. حبیبی و همکارانش [۱۰] از مدل ترکیبی ژنتیک کریجینگ برای پیش‌بینی زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت هادی‌شهر استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد دقت مدل برنامه‌ریزی ژنتیک بیشتر از مدل نروفازی است به‌طوری که RMSE میانگین برای پیرومترهای منتخب در مرحله آزمایش در مدل برنامه‌ریزی ژنتیک ۱۹ سانتی‌متر و در مدل نروفازی ۲۳ به‌دست آمد.

موسوی و همکارانش [۱۱] برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی آبخوان مشهد، از روش‌های مختلف هوش مصنوعی استفاده کردند. نتایج پژوهش آنان نشان داد موجک نروفازی نسبت به روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، موجک شبکه

تطبیقی فازی- عصبی و برنامه‌ریزی بیان ژن بودند. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه آنها، بیان می‌کند که هر سه روش شبکه‌های عصبی، فازی- عصبی و برنامه‌ریزی بیان ژن می‌توانند به‌طور موفقیت‌آمیزی برای پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی استفاده شوند. محمدی و همکارانش [۱۷] کارایی الگوریتم هیبریدی ازدحام ذرات در شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی آبخوان دشت اردبیل را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها بیان‌کننده عملکرد خوب این الگوریتم با مجذور میانگین مربعات خطا ۰/۴۱۷ بود.

با بررسی مطالعات انجام‌شده، مشاهده شد که دامنه مطالعات در خصوص به‌کارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری در مدل سازی و پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی بسیار محدود بوده است. با توجه به آنچه گفته شد، تمامی این روش‌ها، روش‌های فراابتکاری هستند که از طبیعت الهام گرفته شده‌اند و استراتژی هر یک در رسیدن به جواب بهینه یا تابع هدف با هم متفاوت است. از این‌رو، پژوهش حاضر به‌منظور بررسی عملکرد و اثبات کارایی الگوریتم انتخابات (برای نخستین‌بار) به عنوان روش تکاملی نوین و همچنین سازگاری این الگوریتم با تعداد کمتری از پارامترها، در پیش‌بینی و مدل سازی تراز سطح آب زیرزمینی در دشت میاندوآب واقع در استان آذربایجان غربی انجام شده و نتایج به‌دست‌آمده از آن با نتایج روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و نیز الگوریتم ژنتیک مقایسه شد. هدف از انتخاب و کاربرد روش‌های یادشده در پژوهش حاضر، این بود که مشخص شود کدام یک از روش‌های فراابتکاری و استراتژی مربوط به آن توانایی بیشتری در حل مسئله (مدل سازی تراز آب زیرزمینی) دارند.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعه شده و داده‌ها

دشت میاندوآب در قسمت جنوبی دریاچه ارومیه و در استان آذربایجان غربی واقع شده است. موقعیت جغرافیایی دشت بین مدار ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شرقی است. توپوگرافی کلی دشت میاندوآب به‌صورت یکنواخت و هموار بوده و فقط تعدادی تپه کوچک در قسمت مرکزی آن قرار گرفته است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی دشت میاندوآب روی نقشه نشان داده شده است. متوسط ارتفاع دشت از سطح دریا برابر ۱۲۹۲ متر است،

عصبی مصنوعی و نروفازی می‌تواند پیش‌بینی درست‌تری از سطح آب زیرزمینی داشته باشد. تقی‌زاده و فریدونی [۱۲] تراز سطح آب زیرزمینی دشت ارسنجان را با به‌کارگیری دو روش موجک سیستم استنتاج فازی عصبی (ANFIS) و موجک - شبکه عصبی (MPL) شبیه‌سازی کردند. نتایج مطالعه یادشده نشان داد بهترین نتیجه شبیه‌سازی مربوط به الگوی (W-1) از روش موجک سیستم استنتاج فازی عصبی با ضریب همبستگی ۰/۹۷۸۶ بود. فریدونی و زاهدی [۱۲] به پیش‌بینی زمانی و مکانی تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (MLP) و سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) و تکنیک‌های زمین‌آمار (GIS) به روش کریجینگ در دشت ارسنجان پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (Gaussian) می‌تواند تراز آب زیرزمینی را در دو ماه آینده برای ۱۲ چاه مشاهده‌ای بهتر از شبکه عصبی مصنوعی (MLP) پیش‌بینی کند.

خاشعی سیوکی و همکارانش [۱۳] روش‌های مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، ANFIS و رگرسیون را در برآورد سطح ایستابی آبخوان دشت نیشابور مقایسه کردند. در تحقیق یادشده پارامترهای مؤثر بر تغییرات سطح ایستابی مانند بارندگی و تخلیه به‌صورت ماهانه تعیین شد و با استفاده از روش‌های زمین‌آمار نقشه‌های پهنه‌بندی شده ماهانه به‌دست آمد. نیک‌منش [۱۴] تراز آب زیرزمینی دشت خرامه را با روش‌های تلفیقی هوش مصنوعی (شبکه عصبی- الگوریتم ژنتیک) پیش‌بینی کرده و نتایج به‌دست‌آمده را با نتایج مشاهداتی مقایسه کرد. این مدل هوش مصنوعی با ترکیب ۸ نرون در لایه ورودی ۹ نرون در لایه پنهان و یک نرون در لایه خروجی توانست پیش‌بینی قابل قبولی از تراز آب زیرزمینی دشت خرامه ارائه دهد. اکبرزاده و همکارانش [۱۵] تراز آب زیرزمینی دشت شاهرود را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی تابع پایه شعاعی پیش‌بینی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل شبکه عصبی ارائه‌شده، تراز آب دشت شاهرود را برای سه سال پی‌پای با میانگین مربعات خطای ۰/۰۲۴۱ متر می‌تواند پیش‌بینی کند.

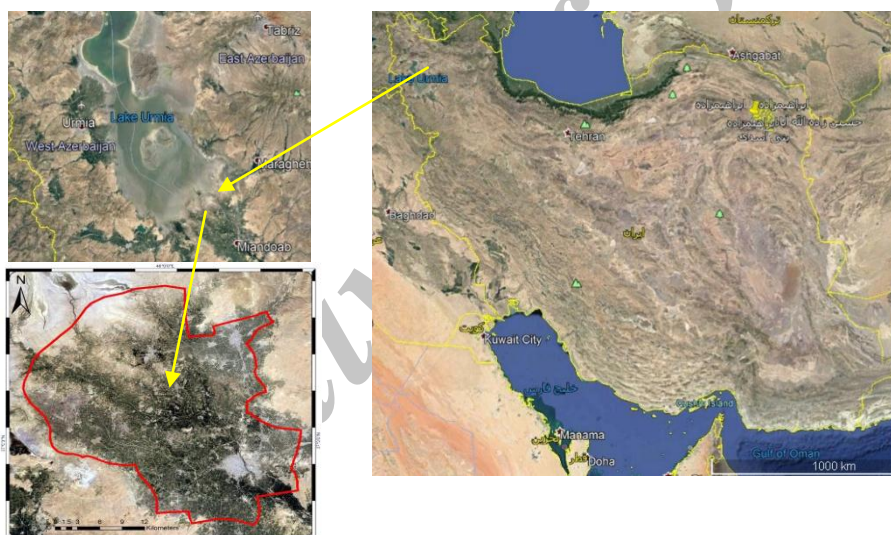
ابارشی و همکارانش [۱۶] عملکرد سه روش هوش مصنوعی برای پیش‌بینی نوسانات تراز سطح ایستابی در حوضه زرین‌گل استان گلستان را مقایسه کردند. این مدل‌ها شبکه‌های عصبی مصنوعی، سامانه استنتاج

زمین‌شناسی و ساختمان دشت

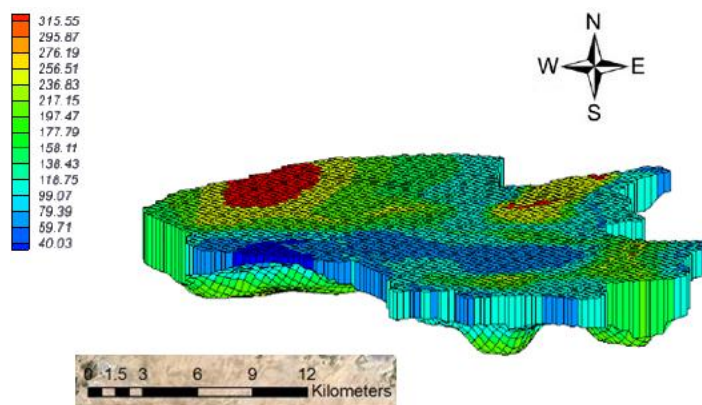
تشکیلات آبرفتی ساختمان اصلی دشت را تشکیل داده که به صورت مخروط افکنه و رسوبات رودخانه‌ای ظهور پیدا کرده‌اند. ضخامت آبرفت در گستره دشت متغیر است و از حدود چند متر در حوالی کوه‌های اطراف تا بیش از ۱۵۰ متر در حوالی شهرهای میاندوآب و ملکان می‌رسد. در شمال ناحیه در بستر رودخانه مردوق‌چای ضخامت رسوبات آبرفتی حداکثر به ۸۰ متر می‌رسد. در شرق میاندوآب ضخامت آبرفت حدود ۳۰ متر با لایه‌های ریز همراه با رس است و در شرق ناحیه به علت وجود رودخانه لیلان‌چای ضخامت در این ناحیه به ۱۶۰ متر می‌رسد. در شکل ۲، نقشه سه‌بعدی ضخامت آبخوان دشت میاندوآب روی نقشه نشان داده شده است [۱].

همچنین پست‌ترین نقطه دشت دارای ارتفاع ۱۲۹۷ متر از سطح دریا و ارتفاع معادل با ۱۴۰۰ متر از سطح دریا برای بلندترین نقطه دشت ثبت شده است (۳ و ۴).

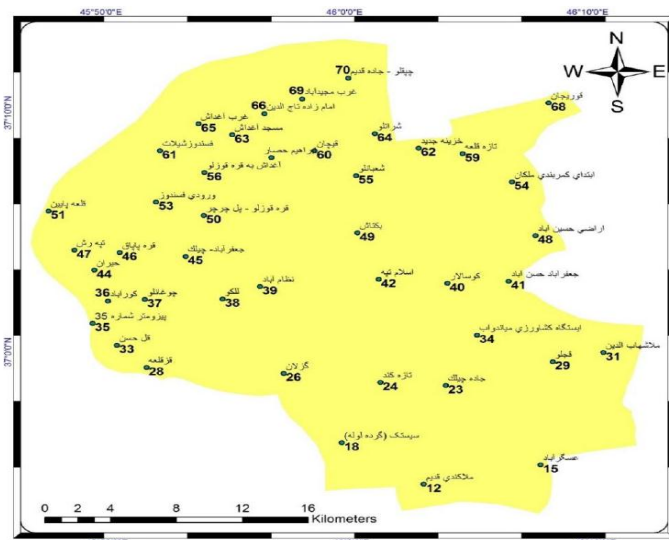
این دشت حدود نیمی از جریانات سطحی ورودی به دریاچه را از خود عبور داده است و نیز حدود ۲۰ درصد از کل برداشت‌های آب زیرزمینی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه به این منطقه اختصاص دارد. عمده‌ترین منابع آب‌های سطحی عبوری از دشت میاندوآب، رودخانه زرينه‌رود و سیمینه‌رود هستند که پس از سیراب کردن اراضی دشت یادشده، به دریاچه ارومیه تخلیه می‌ریزند [۱۸]. عمق آب زیرزمینی در منطقه به نسبت زیاد بوده و بین ۳ تا ۲۵ متر متغیر است و عملاً چگونگی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی دشت به صورت مستقیم روی آب‌دهی جریانات سطحی عبوری از آن تأثیر خواهد گذاشت.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی دشت میاندوآب



شکل ۲. نقشه سه‌بعدی ضخامت آبخوان دشت میاندوآب



شکل ۳. محل پیزومترها روی نقشه منطقه مطالعاتی

از کاندیدها نتواند اکثریت مطلق آرا را کسب کند، انتخابات به دور دوم کشیده می شود و بین دو کاندیدی که بیشترین رأی را کسب کرده باشند، صورت می گیرد. الگوریتم انتخابات یک الگوریتم تکرارشونده است که با مجموعه ای از راه حل های شناخته شده به عنوان جمعیت کار می کند. مبارزه تبلیغاتی هسته الگوریتم است و شامل سه گام تبلیغات مثبت، تبلیغات منفی و ائتلاف می شود. این فرایندها به قدری تکرار می شوند تا الگوریتم به بهینه سراسری همگرا شود [۲۰].

مراحل الگوریتم EA به صورت زیر است:

۱. تولید جمعیت اولیه؛
۲. ارائه ایده های نامزدها به رأی دهندگان (تبلیغات مثبت)؛
۳. آموزش ایده های بهتر نامزدها از رأی دهندگان و بهبود موقعیت خود؛
۴. انتخاب آگهی منفی توسط نامزدها (تبلیغات منفی)؛
۵. تجمیع ایده های مشابه؛
۶. بررسی معیار توقف الگوریتم، وگرنه برو به مرحله ۳؛
۷. اتمام.

#### شبیه سازی شبکه عصبی مصنوعی

تمامی مسائل بهینه سازی شامل دو مرحله مدل سازی و برنامه ریزی می شود که به ترتیب تشکیل تابع هدف، قیود و محدودیت ها (مرحله اول، مدل سازی) و تعیین شرایط بهینه در رسیدن به جواب ایده آل (مرحله دوم، برنامه ریزی) هستند [۲۱].

براساس نتایج آخرین آماربرداری های صورت گرفته، میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی میاندوآب برابر با ۳۵۰ میلیون مترمکعب در سال است که از طریق ۱۴۰۹۶ حلقه چاه انجام می شود. آبخوان دشت میاندوآب با وسعت ۱۲۵۰ کیلومترمربع، ۲۴۰ میلیون مترمکعب از این مقدار را به خود اختصاص داده که البته در محدوده در نظر گرفته شده است [۱۹].

#### الگوریتم انتخابات (EA)

یکی از الگوریتم های جست و جو و بهینه سازی جدید، الگوریتم انتخابات است که در سال ۲۰۱۵ توسط امامی ابداع شد. این الگوریتم از انتخابات ریاست جمهوری الهام گرفته شده است. در سطح ملی، رئیس جمهور به عنوان رئیس کشور به طور مستقیم توسط مردم انتخاب می شود. پس از اعلام اسامی کاندیدهای تأیید صلاحیت شده، تبلیغات انتخاباتی در یک محدوده زمانی مشخص آغاز می شود. تبلیغات شامل دو بخش تبلیغات مثبت و منفی است که تبلیغات مثبت به ارائه ایده های نامزدها به رأی دهندگان و تبلیغات منفی به صورت انتخاب آگهی منفی توسط نامزدها گفته می شود.

برنده شدن یک کاندیدا در مرحله اول انتخابات ریاست جمهوری، به کسب اکثریت مطلق آرای شرکت کنندگان در انتخابات نیاز دارد. یعنی برای برنده شدن در انتخابات، یک کاندیدا باید بیش از ۵۰ درصد آرای کسانی که در انتخابات مشارکت می کنند، را به دست آورد. در صورتی که هیچ یک

به صورت ورودی به شبکه داده شد و بر اساس ورودی‌های یادشده، تراز آب زیرزمینی پیش‌بینی شد.

### الگوریتم ژنتیک (GA)

این الگوریتم مبتنی بر تکرار بوده و اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس شده است. در الگوریتم ژنتیک (GA) ابتدا به طور تصادفی جامعه‌ای از کروموزوم‌ها ایجاد و سپس برازندگی آن‌ها محاسبه و تعیین می‌شود. در ادامه، به وسیله عملگرهای پیوند و جهش جامعه‌ای جدید با مقادیر برازندگی بیشتر تولید می‌شود [۲۲].

طرح کلی الگوریتم ژنتیک به صورت شکل ۵ است. هدف از پژوهش حاضر، پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در مقیاس ماهانه است. روش انجام کار به صورت زیر است:

- آماده‌سازی و آنالیز داده‌ها شامل بررسی همبستگی؛
- نرمال‌سازی داده‌ها؛
- پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم انتخابات، ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی.

### آماده‌سازی و آنالیز داده‌ها

به منظور پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی دشت میاندوآب، از چندین متغیر استفاده شد. این اطلاعات شامل داده‌های مربوط به میزان برداشت از آب زیرزمینی، مشخصات جریان‌ات سطحی، چاه‌های مطالعاتی، اطلاعات هواشناسی، خصوصیات پارامترهای آبخوان و نقشه سنگ‌شناسی و خاک‌شناسی منطقه هستند. داده‌های سطح ایستابی استفاده شده در این پژوهش برای یک دوره ۱۰ ساله (۱۳۸۵-۱۳۹۵) در مقیاس ماهانه هستند. مشخصات چاه‌های مشاهده‌ای و بیلان آب زیرزمینی دشت میاندوآب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

شبکه عصبی مصنوعی متشکل از مجموعه‌ای از نرون‌ها با ارتباطات داخلی بین یکدیگر است که می‌تواند بر اساس اطلاعات و داده‌های ورودی، جواب‌های خروجی را تهیه کند. شبکه‌های عصبی معمولاً به صورت لایه‌لایه و منظم ایجاد می‌شوند. اولین لایه که اطلاعات و داده‌های ورودی به آن وارد می‌شود، لایه ورودی است. لایه‌های میانی لایه‌های مخفی و آخرین لایه که جواب‌های خروجی از مدل را فراهم می‌کنند، لایه خروجی اند (۲۰).

مجموعه کل ورودی به نرون از رابطه ۱ به دست می‌آید:

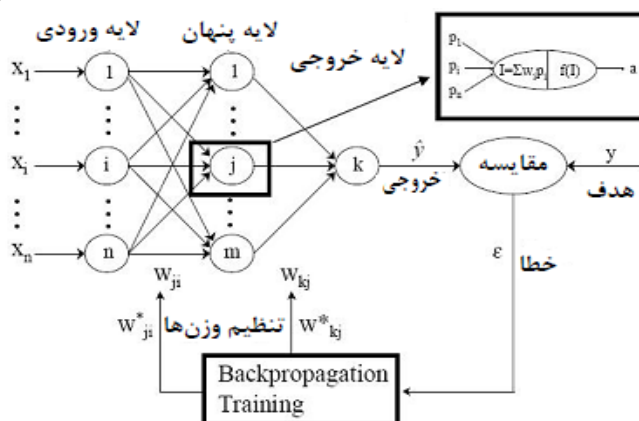
$$net_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} x_i \quad (1)$$

که در آن،  $net_j$  کل ورودی به نرون،  $x_i$  لایه ورودی و  $w_{ij}$  شدت اتصال نرون‌ها است که طی فرایند یادگیری مشخص می‌شوند. مرحله بعدی شامل تعیین سطح خروجی از نرون به روی جمع ورودی‌ها اعمال می‌شود. تابع فعالیت استفاده شده در تحقیق حاضر، تابع سیگموئید است و خروجی شبکه، صفر و یک است، که به صورت زیر تعریف می‌شود:

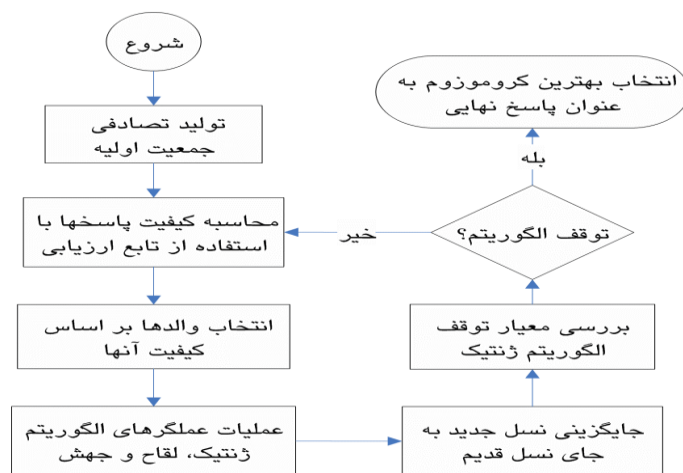
$$f(s_j) = \frac{1}{1 + e^{-s_j}} \quad (2)$$

در این رابطه،  $f(s_j)$  معرف تابع سیگموئید (تابعی حقیقی، کران‌دار و مشتق‌پذیر است که به‌ازای کلیه مقادیر حقیقی تعریف می‌شود و مشتق مثبت دارد. این تابع به لحاظ گرافیکی شبیه حرف S انگلیسی است)، است [۲۱].

برای ارزیابی روش شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی، پس از آموزش شبکه، داده‌های هواشناسی (دما، بارش، تبخیر و دبی ورودی رودخانه‌های زرينه‌رود و سیمینه‌رود) و نیز سطح آب زیرزمینی ماهانه



شکل ۴. شبکه عصبی سه لایه پیش رو با الگوریتم آموزش انتشار برگشتی



شکل ۵. طرح کلی الگوریتم ژنتیک

جدول ۱. مشخصات چاه های مشاهده ای دشت میاندوآب

کد پیزومتر	UTM Y	UTMX	نام پیزومتر	میانگین سطح آب (متر)
۱۲	۴۰۸۴۹۷۰	۵۹۳۵۱۵	ملاکندی قدیم	۱۲۸۶/۸۶
۱۵	۴۰۸۶۴۶۳	۶۰۰۶۲۹	عسگرآباد	۱۲۹۱/۹۵
۱۸	۴۰۸۸۱۶۹	۵۸۸۵۳۴	سیستک	۱۲۸۱/۵۸
۲۳	۴۰۹۲۵۹۰	۵۹۴۸۵۴	جاده چیلک	۱۲۸۷/۹۱
۲۴	۴۰۹۲۸۳۲	۵۹۰۸۷۳	تازه کند	۱۲۸۴/۲۵
۲۶	۴۰۹۳۵۳۶	۵۸۵۰۰۷	گزلان	۱۲۸۲/۲۲

جدول ۲. بیلان آب زیرزمینی آبخوان دشت میاندوآب (به صورت میانگین سالانه برحسب میلیون مترمکعب)

پارامتر مشارکت کننده در بیلان	ورود	خروج
جریان آب زیرزمینی	۲۷/۴۴	۲۸/۲۶
تغذیه و زهکشی از بستر رودخانه و مسیل ها	۵۲/۲۸	۱۸/۶۷
زهکشی از طریق شبکه زهکشی	۰	۱۶/۱۱
تبخیر سطحی از آبخوان	۰	۷۰/۸۵
چاه های بهره برداری	۰	۱۷۷۰/۲۱
نفوذ آب باران و آب برگشتی کشاورزی به آبخوان	۱۶۳/۰۲	۰
نفوذ آب رهاسازی شده در شبکه به منظور کنترل سیلاب	۶۴/۹۷	۰
جمع	۳۰۷/۷۲	۳۱۱/۰۹

$$Z_n = \frac{Z - Z_{min}}{Z_{max} - Z_{min}} \quad (3)$$

در این رابطه، Z معرف داده به صورت خام،  $Z_n$  داده های نرمالیزه شده،  $Z_{min}$  مینیمم داده ها،  $Z_{max}$  ماکزیمم داده هاست.

چگونگی ورود داده ها در الگوریتم های انتخابات و ژنتیک بررسی میزان وابستگی داده های ورودی در انتخاب آنها اهمیت دارد. روش های مختلفی برای بررسی مستقل یا

### نرمال سازی داده ها

هدف از نرمال سازی داده ها، یکسان سازی اهمیت ورودی های مختلف به مدل های استفاده شده است. از آنجا که وارد کردن داده ها به صورت خام سبب کاهش سرعت و دقت مدل می شود، ورودی ها و خروجی ها باید بین صفر و یک استاندارد شوند، از این رو داده های استفاده شده به مدل به صورت رابطه ۳ نرمالیزه شدند.

شدند. در ابتدای کار برای سنجش کارایی الگوریتم انتخابات و ژنتیک، به آموزش و صحت‌سنجی الگوریتم‌ها در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی اقدام شد. نتایج ارائه‌شده در جدول ۴ بیان‌کننده این مطلب است. به‌طور کلی، برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم انتخابات و ژنتیک، مقادیر تبخیر، بارش ماهانه، دبی رودخانه‌های زیرنه‌رود و سیمینه‌رود و سطح آب زیرزمینی ماهانه (جدول ۴) استفاده شد. پارامترهای استفاده‌شده در الگوریتم‌های انتخابات و ژنتیک در جدول ۵ آورده شده است. پس از انجام آنالیز حساسیت، درصد‌های مناسبی از داده‌ها برای آموزش و آزمایش استفاده شد که در نهایت ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۵ درصد باقی‌مانده به عنوان آزمایش مدل‌ها استفاده شد.

وابسته بودن داده‌ها وجود دارد که در پژوهش حاضر از بررسی همبستگی دو داده استفاده شد (جدول ۳). هر چه میزان همبستگی دو داده به یک نزدیک باشد، نشان‌دهنده وابستگی خطی بیشتری است. با توجه به نتایج (ارائه‌شده در جدول ۳)، پارامترهای رطوبت، دما و تبخیر به یکدیگر وابسته‌اند، بنابراین پارامتر تبخیر به عنوان نماینده این سه پارامتر انتخاب شد، به‌گونه‌ای که پارامترهای رطوبت و دما در آموزش شبکه شرکت داده نشدند. به‌منظور بررسی میزان کارایی هر یک از مدل‌های استفاده‌شده در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی، پارامترهای تبخیر، بارش ماهانه، دبی رودخانه‌های زیرنه‌رود و سیمینه‌رود در گام زمانی  $t_0$  و سطح آب زیرزمینی ماهانه در گام زمانی  $t_0-1$  در بازه زمانی مهر ۱۳۸۵ تا شهریور ۱۳۹۵ به عنوان ورودی مدل‌ها انتخاب

جدول ۳. همبستگی داده‌ها

بارش	رطوبت	دما	تبخیر	ملاکندی قدیم	عسگرآباد	سیستک	جاده چیلک	تازه‌کند	گزلان
۱	۰/۴۶	۰/۴۱	۰/۳۹	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۲۱	۰/۲۸	۰/۳۵	۰/۴۹
رطوبت	۱	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۳۲	۰/۳۰	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۲۵	
دما		۱	۰/۹۵	۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۲۹	۰/۲۴	۰/۶۱	
تبخیر			۱	۰/۴۱	۰/۳۷	۰/۳۱	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۴۰
ملاکندی قدیم				۱					
عسگرآباد					۱	۰/۷۲	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲۲
سیستک						۱	۰/۱۷	۰/۲۱	۰/۲۳
جاده چیلک							۱	۰/۲۰۵	۰/۲۴
تازه‌کند								۱	۰/۲۴۴
گزلان									۱

جدول ۴. انحراف از معیار نتایج به‌دست‌آمده از آموزش و صحت‌سنجی الگوریتم‌های انتخابات و ژنتیک

کد پیزومتر	UTM Y	UTMX	نام پیزومتر	انحراف معیار از مقادیر مشاهده‌ای (متر)
۱۲	۴۰۸۴۹۷۰	۵۹۳۵۱۵	ملاکندی قدیم	EA GA
۱۵	۴۰۸۶۴۶۳	۶۰۰۶۲۹	عسگرآباد	۱/۹۸ ۲/۱۹
۱۸	۴۰۸۸۱۶۹	۵۸۸۵۳۴	سیستک	۱/۳۵ ۱/۶۴
۲۳	۴۰۹۲۵۹۰	۵۹۴۸۵۴	جاده چیلک	۱/۸۱ ۲/۰۲
۲۴	۴۰۹۲۸۳۲	۵۹۰۸۷۳	تازه‌کند	۱/۲۴ ۱/۴۵
۲۶	۴۰۹۳۵۳۶	۵۸۵۰۰۷	گزلان	۱/۸۷ ۱/۹۳



### تعریف مسئله

در این روابط،  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8$  و  $C_9$  و  $C_{10}$  ضرایب وزنی و نمایی برای ورودی‌های مد نظر (این ضرایب برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در دو الگوریتم EA و GA متفاوت است)، MSE میانگین مربعات خطا،  $GL_{act}, WT_{act}, Q_r, P, E_T$  به ترتیب تراز آب زیرزمینی مشاهداتی، تعداد چاه‌ها، بارش، دبی رودخانه‌ها و تبخیر و  $n$  تعداد داده‌هاست.  $C_{10}$  مقدار ثابت معادله است. هدف از پژوهش حاضر، مینیمم کردن معادله ۷ و به دست آوردن  $C$  ها است که این کار توسط الگوریتم‌های انتخابات و ژنتیک انجام می‌شود.

پس از تعریف تابع هدف، برای قسمت‌های مختلف مدل‌های استفاده شده اعم از جمعیت اولیه، نسبت داده‌های آموزش و آزمایش و... باید مقادیر مناسب را انتخاب کرد که البته انتخاب صحیح این مقادیر تأثیر مستقیمی در چگونگی عملکرد و سرعت مدل‌ها در مسئله مد نظر خواهد داشت.

پارامترهای استفاده شده در الگوریتم‌های انتخابات و ژنتیک، در جدول ۵ ارائه شده است.

که  $N_e$  معرف تعداد افرادی است که در الگوریتم انتخابات به عنوان نامزد اول انتخاب می‌شوند،  $N_v$  تعداد باقی‌مانده رأی‌دهندگان است.

شایان یادآوری است، مقادیر عددی پارامترهای ارائه شده در جدول ۵ برای الگوریتم‌های EA و GA پس از بررسی مقادیر مختلف برای پارامترها و اجرای هر دو الگوریتم به ازای این مقادیر تا رسیدن به بهینه‌ترین جواب انتخاب شدند.

### معیارهای ارزیابی

برای مقایسه نتایج الگوریتم‌های EA، GA و روش شبکه عصبی مصنوعی با مقادیر مشاهداتی با یکدیگر و ارزیابی آنها، نیاز به شاخص‌هایی است که بتوانند کارکرد مدل را در کل مجموعه داده‌ها در مقایسه با نتایج تجربی، قضاوت کنند. در پژوهش حاضر از شاخص‌های ضریب همبستگی ( $R^2$ )، معیار نش-ساتکلیف (NSE) و جذر متوسط مربعات خطا (RMSE)، به صورت روابط ۱۰ تا ۱۲ استفاده شد.

### ضریب همبستگی

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (10)$$

در پژوهش حاضر، از مدل شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های انتخابات و ژنتیک در پیش‌بینی و بهینه‌سازی تراز آب زیرزمینی دشت میاندوآب با استفاده از چهار متغیر ورودی شامل پارامترهای همبسته با تراز آب زیرزمینی، بارش، تبخیر، دبی رودخانه‌های زرينه‌رود و سیمینه‌رود و تراز آب زیرزمینی هر یک از پیژومترها با تأخیر زمانی  $t_0-1$  (ماه قبل) در دوره آماری ۱۰ سال استفاده شد. داده‌های به‌کار گرفته شده در این نوشتار در مجموع ۶۰۰ داده است که ۴۵۰ نمونه شامل داده‌های آموزشی برای ساخت مدل و ۱۵۰ نمونه دیگر به منظور صحت‌سنجی این مدل توسط شرکت آب منطقه‌ای برداشت و آنالیز شده است.

با توجه به اینکه وارد کردن داده‌ها به صورت خام سبب کاهش سرعت و دقت مدل می‌شود، ورودی‌ها و خروجی‌ها باید طبق فرمول‌های زیر در بازه  $H, L$  که در پژوهش حاضر معادل یک و صفر انتخاب شد، استاندارد شوند. از این‌رو، داده‌های استفاده شده به مدل‌ها به صورت روابط ۴ تا ۶ نرمالیزه شدند [۲۳]:

$$X^* = mX_i + b \quad (4)$$

$$m = \frac{H - L}{\text{Max}(X) - \text{Min}(X)} \quad (5)$$

$$b = \frac{\text{Max}(X)L - \text{Min}(X)H}{\text{Max}(X) - \text{Min}(X)} \quad (6)$$

که  $X^*$  متغیر نرمال‌سازی شده و  $X_i$  متغیر اصلی است. برای الگوریتم‌های انتخابات و ژنتیک، کد عددی در نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> به‌کار گرفته شد که به منظور پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی به فرم رابطه ۷ و تابع هدف در رابطه ۸ و ۹ آورده شده است:

$$\min f = C_1 GL_{act}^{C_2} + C_3 WT_{act}^{C_4} + C_5 Q_r^{C_6} + C_7 P^{C_8} + C_8 ET^{C_9} + C_9 \quad (7)$$

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N} (Gl_{obs} - Gl_{EA})^2 \quad (8)$$

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N} (Gl_{obs} - Gl_{GA})^2 \quad (9)$$

جدول ۵. پارامترهای استفاده شده در الگوریتم‌های EA و GA

GA		EA	
۱۰۰	تعداد جمعیت اولیه	۱۰۰	تعداد جمعیت اولیه
۶۰	درصد تولید نسل	۰/۷	$N_c$
۱۰	درصد جهش	۰/۲	میزان ائتلاف
۳۰	درصد انتقال به نسل بعدی	۰/۳	میزان انتخاب
Cost weighting	روش انتخاب والدین	-	-

در مدل‌ها، مقدار تراز آب زیرزمینی که تنها خروجی مدل‌ها را شامل می‌شود، محاسبه شد. همچنین، برای پیش‌بینی و مدل‌سازی تراز سطح آب زیرزمینی، از تعداد تکرار ۱۰۰۰ استفاده شد که عملکرد مناسب و خطای کمتری برای مدل‌های به کار گرفته شده داشت. پس از نرمالیزه کردن داده‌ها، مراحل آموزش و صحت‌سنجی برای هر یک از پیرومترها اجرا شد.

به منظور صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از مدل‌سازی، با فرض ثابت بودن تمامی ضرایب و پارامترها، نتایج به دست آمده از مدل‌ها با داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای، مقایسه شد. نتایج به دست آمده از مقایسه مقادیر محاسبه شده با مقادیر مشاهده‌ای در نمودارهای ۶ تا ۱۱ نشان داده شده است.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۶، میانگین مقادیر به دست آمده از پارامترهای ارزیابی الگوریتم انتخابات،  $R^2$ ، RMSE و NSE به ترتیب برابر با ۰/۹۳، ۰/۰۲۷ و ۰/۷۴ به دست آمد که در محدوده ایده‌آل و رضایت‌بخش قرار دارند و روند خاصی در خطاها که بیان‌کننده تجمع خطا در مدل‌ها باشد، ملاحظه نمی‌شود.

جدول ۶. میانگین مقادیر به دست آمده از پارامترهای ارزیابی

نام پیرومتر	EA			GA			ANN		
	$R^2$	RMSE	NSE	$R^2$	RMSE	NSE	$R^2$	RMSE	NSE
ملاکندی قدیم	۰/۹۳	۰/۰۳۲	۰/۷	۰/۸۹	۰/۰۴۷	۰/۵	۰/۹	۰/۰۴۱	۰/۴۸
عسگرآباد	۰/۹۲	۰/۰۳۷	۰/۷۳	۰/۹۱	۰/۰۵۴	۰/۴۲	۰/۹۱	۰/۰۴۶	۰/۴۲
سیستک	۰/۹۱	۰/۰۲۵	۰/۸	۰/۹۰	۰/۰۴۲	۰/۵۵	۰/۹۳	۰/۰۵	۰/۳۸
تازه‌کند	۰/۹۳	۰/۰۲۱	۰/۷۷	۰/۸۸	۰/۰۴۹	۰/۳۷	۰/۸۹	۰/۰۴۲	۰/۵
جاده چیلک	۰/۹۵	۰/۰۲۳	۰/۷۴	۰/۸۴	۰/۰۵۳	۰/۴۱	۰/۹	۰/۰۳۹	۰/۵۲
گزلان	۰/۹۲	۰/۰۳۰	۰/۷۵	۰/۹	۰/۰۵۱	۰/۳۹	۰/۹۱	۰/۰۴۱	۰/۳۹

## مجذور مربعات خطا

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (11)$$

## معیار نش-ساتکلیف

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

که در این روابط،  $x_i$  مقادیر پیش‌بینی شده،  $y_i$  ها مقادیر مشاهده شده،  $\bar{x}$  میانگین  $x$  و  $\bar{y}$  میانگین  $y$  هاست.

مقدار ایده‌آل به ترتیب برای  $R^2$  و RMSE برابر یک و ۱-۱۰ درصد است. مقدار معیار نش-ساتکلیف (NSE) از یک تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند، به طوری که محدوده‌های ۰/۷۵-۱ و ۰/۳۶-۰/۷۵ و کمتر از ۰/۳۶ به ترتیب بیان‌کننده عملکرد بسیار خوب، رضایت‌بخش و ضعیف مدل استفاده شده است.

## نتایج و بحث

## صحت‌سنجی

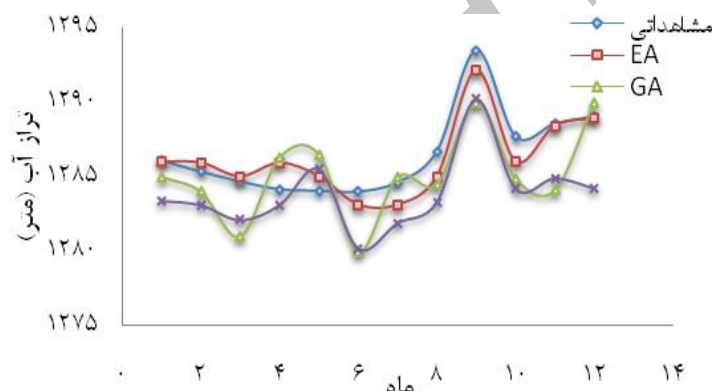
پس از معرفی تابع هدف و انجام تحلیل حساسیت و یافتن مقادیر بهینه پارامترهای مؤثر الگوریتم و به کارگیری آنها

با توجه به نتایج به دست آمده از سه روش استفاده شده، روند تغییرات زمانی تراز آب زیرزمینی در ماه‌های فروردین، دی، بهمن و اسفند به دلیل وجود بارندگی در این ماه‌ها، بیشتر از ماه‌های تابستان است که سطح آب کمترین مقدار خود را دارد.

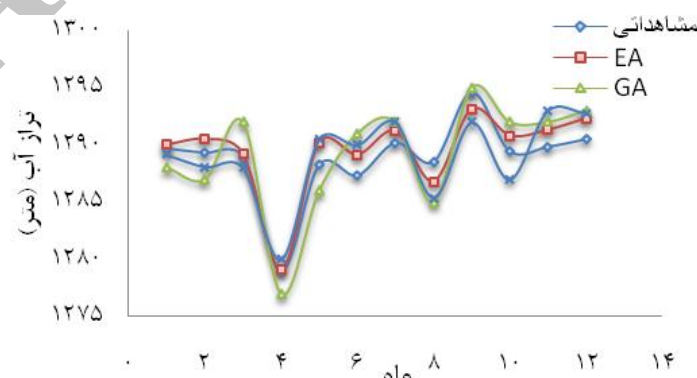
با توجه به شکل‌های ۶ و ۷، مشخص می‌شود که در پیژومتری که در نواحی نزدیک به سواحل رودخانه‌های اصلی عبوری از دشت میاندوآب واقع‌اند (چاه‌های مشاهده‌ای جاده چیلک و تازه‌کند)، وقوع سیلاب در رودخانه‌ها و نیز کاهش جریان آب در آنها، به علت تأثیرپذیری بسیار زیاد تراز سطح آب در این پیژومتری از جریان آب رودخانه‌ها، به افزایش میزان خطا منجر شده است.

مقایسه نتایج مدل سازی با ترازهای اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای به شرح شکل‌های ۶ تا ۱۱ است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، نتایج به دست آمده از الگوریتم انتخابات در مقایسه با الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی بسیار بهینه است و اختلاف بسیار ناچیزی با مقادیر مشاهده‌ای دیده می‌شود که این نشان‌دهنده کارایی و راندمان بسیار زیاد الگوریتم انتخابات است.

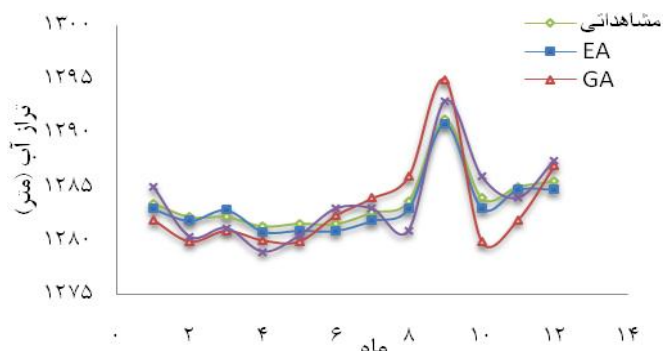
با توجه به شکل‌های ۶ تا ۱۱ مشاهده می‌شود که الگوریتم انتخابات در مقایسه با روش شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک توانسته است روند تغییرات سطح آب دشت میاندوآب را به خوبی شبیه‌سازی کند. در نتیجه، قادر است تغییرات تراز آب را در ماه‌های مختلف با توجه به تغییر در میزان تغذیه و تخلیه از آبخوان طی این مدت به درستی محاسبه کند.



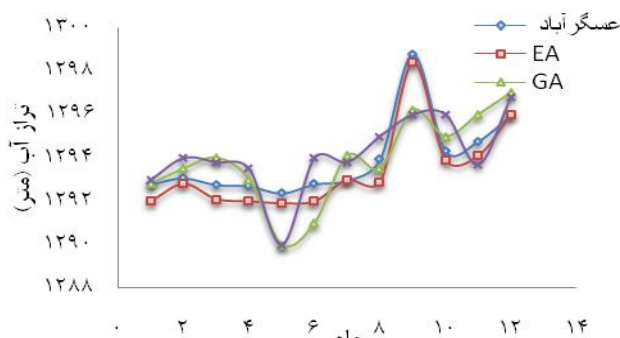
شکل ۶. مقایسه نتایج مدل‌ها در چاه مشاهده‌ای ایستگاه تازه‌کند



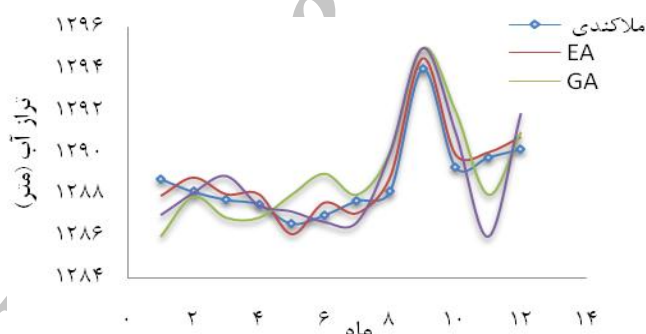
شکل ۷. مقایسه نتایج مدل‌ها در چاه مشاهده‌ای ایستگاه جاده چیلک



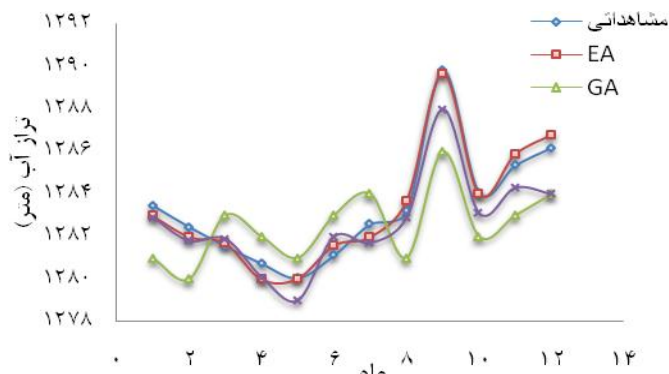
شکل 8. مقایسه نتایج مدل‌ها در چاه مشاهده‌ای ایستگاه سیستک



شکل 9. مقایسه نتایج مدل‌ها در چاه مشاهده‌ای ایستگاه عسگرآباد



شکل 10. مقایسه نتایج مدل‌ها در چاه مشاهده‌ای ایستگاه ملاکندی



شکل 11. مقایسه نتایج مدل‌ها در چاه مشاهده‌ای ایستگاه گلزان

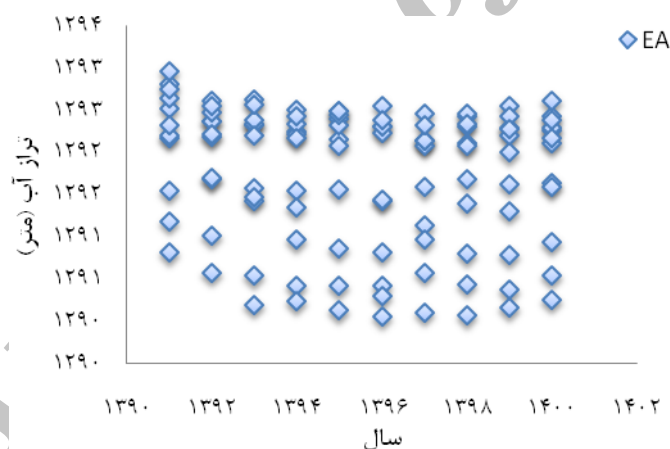
۱۲، تراز آب زیرزمینی برای سال های ۱۳۹۱-۱۴۰۰ توسط الگوریتم انتخابات پیش بینی شده است. همان طور که در شکل ۱۲ نیز مشاهده می شود، در صورت ادامه روند کنونی برداشت از آب زیرزمینی، میزان تغییرات تراز سطح آب در دشت تقریباً ثابت باقی مانده و ذخیره آب طی این ده سال فقط حدود ۲۰ میلیون مترمکعب (دو میلیون مترمکعب در هر سال) افزایش پیدا خواهد کرد که نشان دهنده تعادل نسبی آبخوان در وضعیت کنونی است.

**مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج سایر تحقیقات**  
با توجه به آنکه تا کنون مطالعات محدودی درباره مدل سازی و پیش بینی تراز آب های زیرزمینی توسط الگوریتم های فراابتکاری انجام شده است، نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر با نتایج پژوهش های محمدی و همکارانش (۱۳۹۶) و رجائی و همکارانش (۱۳۹۵) که مطالعاتی برای پیش بینی تراز آب زیرزمینی انجام دادند، مقایسه شد. در جدول ۷ و شکل ۱۳، نتایج ارزیابی مدل های الگوریتم هیبرید ازدحام ذرات، مدل ترکیبی موجک-عصبی و الگوریتم انتخابات ارائه شده است.

با توجه به شکل های ۸ تا ۱۱ مشخص می شود که کارایی هر سه مدل، در پیش بینی تراز سطح آب زیرزمینی در قسمت های مرکزی و شمالی دشت میاندوآب در مقایسه با بخش های جنوبی آن که بیشتر تحت تأثیر مرزهای ورودی هستند، قابل قبول تر است. این امر به دلیل عدم امکان برآورد دقیق میزان آب ورودی از مرزها روی داده و به بروز خطا در برخی از پیرومترهای حاشیه ای دشت میاندوآب در تعدادی از ماه های سال منجر شده است.

همچنین، نتایج به دست آمده از اجرای مدل ها نشان داد میزان آب پیش بینی شده در بیشتر پیرومترهای واقع در یک محدوده خاص (از جمله شکل های ۶ و ۹)، کمتر از مقدار مشاهداتی برای آنهاست، که این امر به دلیل تأثیر فرض های ساده کننده بر نتایج مدل سازی، به برخی از رویدادهای پیش بینی نشده در فرایند ساخت مدل برمی گردد.

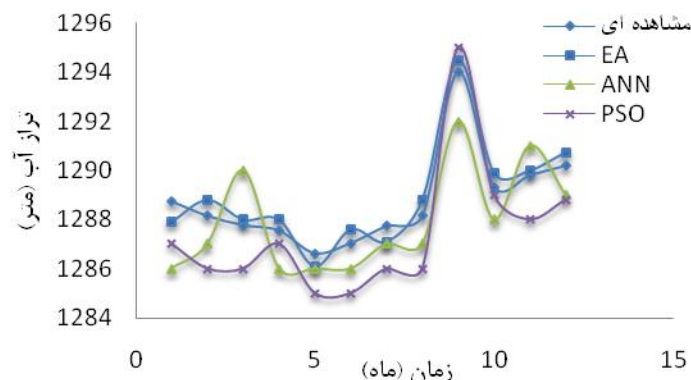
پس از اثبات کارایی و دقت الگوریتم انتخابات در پیش بینی تراز آب زیرزمینی دشت میاندوآب در مقایسه با روش شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک، در شکل



شکل ۱۲. پیش بینی تراز آب زیرزمینی برای سال های ۱۳۹۱-۱۴۰۰

جدول ۷. نتایج ارزیابی مدل های الگوریتم هیبرید ازدحام ذرات، مدل ترکیبی موجک-عصبی و الگوریتم انتخابات

روش شبکه عصبی رجائی و پوراصلان (۱۳۹۴)		الگوریتم هیبرید ازدحام ذرات (محمدی و همکاران ۱۳۹۶)		الگوریتم انتخابات (پژوهش حاضر)		ماه
RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	-
۰/۱۰	۰/۳	۰/۹۱	۰/۵۴	۰/۰۳۲	۰/۹۱	۲
۰/۰۶۱	۰/۷۳	۱۲/۱	۰/۴۳	۰/۰۳۷	۰/۹۲	۳
۰/۱۶	۰/۵۳	۱/۰۸	۰/۵۳	۰/۰۲۵	۰/۹۱	۴



شکل ۱۳. مقایسه مدل‌های الگوریتم هیبرید ازدحام ذرات، مدل ترکیبی موجک-عصبی و الگوریتم انتخابات در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی

RMSE و NSE،  $0.021$  و  $0.74$ ، دقت زیادی در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی دشت میاندوآب داشت. نتایج نشان داد الگوریتم انتخابات در قسمت‌های مرکزی دشت میاندوآب، شبیه‌سازی تراز سطح آب را با موفقیت بیشتری انجام داده است. در نتیجه، این مدل قادر است با دقت زیادی تراز آب زیرزمینی را در محدوده مطالعه شده پیش‌بینی کرده و از صرف زمان و هزینه‌های بیشتر برای حفر پیزومترهای زیادتر جلوگیری کند. همچنین، نتایج به دست آمده نشان داد کارایی الگوریتم انتخابات با کسب خطای کمتر در مقایسه با دو مدل دیگر، رضایت‌بخش است و برای بهبود نتایج از پژوهش حاضر توصیه می‌شود که الگوریتم پیشنهادی در مطالعات بعدی و برای مناطق دیگر استفاده شود.

#### منابع

- [1]. Hamzekhiani H, Aghaie M M. Modeling of groundwater in the Miandoab plain using remote sensing technology to verify the aquifer's effectiveness on surface currents. Remote Sensing Research Center (RSRC). Urmia Lake Restoration Program. Sharif University Technology. 2015; 150 pages. [Persian]
- [2]. Urmia lake restoration program. Remote Sensing Research Center. Sharif University Technology. 2015. [Persian]
- [3]. Mohtasham M, Dehghani AA, Akbarpour A, Meftah M, Etebari B. Groundwater level determination by using artificial neural network (Case study: Birjand Aquifer). Iran. J. Irrig. Drain. 2010; 1 (4): 1-10. [Persian]
- [4]. Merikh-Bayat F. Evolutionary optimization algorithms (with applications in electrical engineering). Jihad Academic Press. 2014. [Persian]

با توجه به مقایسه صورت گرفته، نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم انتخابات در مقایسه با نتایج پژوهش‌های محمدی و همکارانش (۱۳۹۶) و رجائی و پوراصلان (۱۳۹۴)، که به ترتیب عملکرد الگوریتم هیبرید ازدحام ذرات و روش شبکه عصبی را برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در دو دشت اردبیل و داورزن خراسان رضوی بررسی کرده بودند، بسیار رضایت‌بخش است، به گونه‌ای که الگوریتم انتخابات با میانگین مجذور مربعات خطا  $0.028$  و ضریب همبستگی  $0.91$  نسبت به دو روش یادشده نتایج قابل قبول تری ارائه داد.

#### نتایج

در پژوهش حاضر برای نخستین بار به منظور پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی دشت میاندوآب از الگوریتم انتخابات استفاده و نتایج به دست آمده از آن با نتایج روش شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک مقایسه شد. این مدل‌ها به دلیل توانایی و کارایی زیاد در مدل‌سازی قادر به حل بسیاری از مسائل پیچیده و پیش‌بینی پدیده‌های هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی‌اند. برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی از پارامترهای بارش، تبخیر و دبی رودخانه‌های زرينه‌رود و سیمینه‌رود در گام زمانی  $t_0$  و سطح آب زیرزمینی در گام زمانی  $t_0-1$  به عنوان ورودی‌های مدل‌ها استفاده شد. تجزیه و تحلیل‌های انجام شده با استفاده از شاخص‌های آماری بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده نشان داد الگوریتم انتخابات در مقایسه با روش شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک، با تعداد تکرار  $1000$  و به ترتیب با به دست آمدن مقادیر ضریب همبستگی بیش از  $90$  درصد ( $95$  درصد)،

- [5]. Yaghini M, Akhavan-Kazemzadeh M R. Evolutionary optimization algorithms. Jahad Academic Press of Amirkabir University. 2016. [Persian]
- [6]. Yang Z P, Lu W X, Long Y Q, Li P. Application and comparison of two prediction models for groundwater levels: a case study in Western Jilin Province, China. *J. Arid Environ.* 2009; 73: 487-492.
- [7]. Shiri J, Kisi O. Comparison of genetic programming with neurofuzzy systems for predicting short-term water table depth fluctuations. *Comput. Geosci.* 2011; 37: 1692-1701.
- [8]. Rajaie T, Pour-Aslan, F. Prediction of the time and local of the groundwater level of Davarzan plain. *Hydrogeomorphology.* 2015; 4: 1-19. [Persian]
- [9]. Mahmoodijam S, Ghoreyshi-Najafabadi S H, Vafaienejad A R, Khazayi S. Potentiometric analysis of groundwater resources using hybrid approach to particle swarm optimization algorithm and spatial information system (case study: Mehran plain, Ilam). *Ecohydrology.* 2017; 4(4): 1199-1213. [Persian]
- [10]. Habibi M H, Nadiri A A, Asghari-Moghaddam A. Spatio-temporal Groundwater Level Prediction Using Hybrid Genetic-Kriging Model (Case Study: Hadishahr Plain). *Iran Water Resources.* 2016; 11(3): 85-99. [Persian]
- [11]. Moosavi V, Vafakhah M, Shirmohammadi B, Behnia N. A wavelet-ANFIS hybrid model for groundwater level forecasting for different prediction periods. *J Water Resour Manage* 2013; 27: 1301-1321.
- [12]. Taghizadeh S A, Fereydony M. Simulation of groundwater level by applying two methods of wavelet-neural fuzzy inference and wavelet-neural network and comparing them with each other. *International Conference on Civil Engineering, Architectural and Urban Development.* Tehran. 2017; 1-11. [Persian]
- [13]. Khashei-Siuki A, Ghahreman B, Kochakzadeh M. Comparison of Artificial Neural Network Models, ANFIS and regression in estimation of Neyshabour plain aquifer level. *Iran. J. Irrig. Drain.* 2013; 7(1): 10-22. [Persian]
- [14]. Nikmanesh M R. Application of artificial intelligence integration methods in prediction of groundwater levels in Khorameh plain of Marvdasht in Fars province. *Iranian Water Resources Management Conference.* AmirKabir Politechnic University. 2011. [Persian]
- [15]. Akbarzadeh F, Hasanpour H, Emamgholizadeh S. Groundwater Level Prediction of Shahrood Plain using RBF Neural Networks. *Journal of Watershed Management Research.* 2014; 7(13): 104-118. [Persian]
- [16]. Abareshi F, Meftah Halghi M, Sanikhani H, Dehghani A A. Comparison of three intelligence techniques for predicting water table depth fluctuations (Case study: Zarringol plain). *J. Water and Soil Conservation.* 2014; 21(1): 163-180. [Persian]
- [17]. Mohammadi B, Biazar S M, Asadi, E. Performance of hybrid particle swarm algorithm to simulate water level (Case study: Ardabil aquifer). *Stained Rainfall Systems.* 2017; 5(15): 77-87. [Persian]
- [18]. Zarrinehrood drainage and irrigation project. *Groundwater Studies of Miandoab Plain, Mahab Ghods Engineering Advisory Company, West Azarbaijan Regional Water Organization.* 1990. [Persian]
- [19]. Report of the status and execution of Zarrinehrood projects. *Mahab Ghods Engineering Advisory Company, West Azarbaijan Regional Water Organization.* 2009. [Persian]
- [20]. Emami H, Derakhshan F. Election algorithm: A new socio-politically inspired strategy. *AI Communications.* 2015; 28: 591-603.
- [21]. Menhaj M B. *Computational Intelligence, No. 1. The Basic of Artificial Neural Networks.* Amirkabir University. 1998. [Persian]
- [22]. Goldberg D E. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning.* Addison-Wesley, Reading, Mass. 1989.
- [23]. Larose D T. *Discovering knowledge in data: an introduction to data mining.* Jhon Wiley & Sons Inc. 2005; 240 p.