

مقاله علمی-پژوهشی

## ارزیابی چندین مدل برنامه‌ریزی بیان ژنی و سری‌های زمانی برای تنظیم سناریوهای تعدیل سطح آب زیرزمینی دشت شبستر (حاشیه دریاچه ارومیه)

ابوالفضل ناصری<sup>۱\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۳

### چکیده

منابع آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع آب در تولید محصولات کشاورزی در کشور است. برداشت بی‌رویه و بهره‌برداری مداوم از این منبع، کاهش قابل توجه سطح آب زیرزمینی در دشت‌های مختلف را موجب گردیده است. با توجه به شرایط و وضعیت موجود دریاچه ارومیه، بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع آب زیرزمینی در حاشیه این دریاچه، از رویکرد مدیریت منابع آب، ضروری و مهم است. اولین گام برای آغاز استفاده پایدار، مدل‌بندی کمی وضعیت موجود مصرف و گام بعدی آینده‌نگاری بهره‌برداری از این منبع آب است. با توجه به قابلیت و توانمندی روش‌های مدل‌بندی و پیش‌بینی رفتار پدیده‌های مهندسی آب، این پژوهش با هدف تحلیل نوسانات سطح آب زیرزمینی و آینده‌پژوهی آن در حاشیه دریاچه ارومیه با ۲۰ مدل برنامه‌ریزی بیان ژنی و سری‌های زمانی انجام گردید. برای مدل‌بندی و آزمون از داده‌های ۳۵ سال استفاده گردید و آینده‌پژوهی برای ۱۰ سال از ۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰ صورت گرفت. پس از ارزیابی کارایی مدل‌ها با آماره‌های معتبر، برنامه‌ریزی بیان ژنی با سه زیردرخت (ژن) به عنوان مناسب‌ترین مدل تشخیص داده شد. آماره‌های سنجش مدل بهینه به صورت RMSE برابر ۰/۲۶، MSE برابر ۰/۰۷، RAE برابر ۰/۵۸، RSE برابر ۰/۲۸، RRSE برابر ۰/۵۲ و ضریب همبستگی برابر ۰/۸۷ و ضریب تعیین برابر ۰/۷۶ بود. نتایج نشان داد سطح آب زیرزمینی از سال ۱۳۶۵ تاکنون حدود ۱۱/۲ متر کاهش داشته است. برای کاهش اثرات روند نزولی سطح آب و مدیریت بهینه مصرف آب زیرزمینی، سناریوهای مختلف تعدیل و صرفه‌جویی با شروع از سال ۱۴۰۰ در نظر گرفته شد. افت تجمعی سطح آب در انتهای سال هدف (۱۴۱۰) نسبت به سال ۱۳۶۵ در صورت تداوم روند کنونی مصرف، ۱۲/۶ متر (معادل ۲۴۱ میلیون مترمکعب) و در صورت اجرایی نمودن برنامه صرفه‌جویی ۱۰ درصد، افت تجمعی برابر ۱۱/۴ متر، ۱۵ درصد ۱۰/۷ متر و سناریوی ۲۰ درصد برابر ۱۰/۱ متر خواهد بود. اصلاح الگوی کشت در دشت با رویکرد استفاده از گیاهان با نیاز آبی نسبتاً کم، تسطیح اراضی زراعی و استفاده از برنامه‌ریزی مناسب کم آبیاری از راهکارهایی است که می‌تواند افت سطح ایستابی در دشت را تعدیل نماید.

**واژه‌های کلیدی:** آب‌های زیرزمینی، بیان ژنی، دشت شبستر، مدل میانگین متحرک، منابع آب زیرزمینی، نوسانات آب زیرزمینی.

### مقدمه

از سال آبی ۱۳۵۱-۵۲ لغایت ۱۳۹۹-۱۴۰۰ از کم‌تر از یک میلیارد مترمکعب به بیش از پنج میلیارد مترمکعب در سال افزایش یافته است (نور، ۱۳۹۶).

مانند برخی از استان‌های کشور، وابستگی تولیدات کشاورزی به آب زیرزمینی در استان آذربایجان شرقی نیز قابل توجه است. منابع آب زیرزمینی در استان شامل ۳۴۸۰۹ حلقه چاه با تخلیه ۹۰۲ میلیون مترمکعب، ۱۸۹۹ رشته قنات با تخلیه ۲۷۳ میلیون مترمکعب و ۱۹۸۰ دهانه چشمه با تخلیه ۱۳۹ میلیون مترمکعب و در مجموع تخلیه کل سالانه از منابع آب زیرزمینی استان در سال آبی ۱۳۸۸-۸۹ برابر ۱۳۱۴ میلیون مترمکعب بوده است (بی‌نام، ۱۳۹۸). دشت شبستر که یکی از مناطق مهم کشاورزی استان آذربایجان شرقی و کشور است، به دلیل سهم زیاد آب زیرزمینی در تامین نیازآبی محصولات مختلف

یکی از مهم‌ترین منابع آب در تولید محصولات کشاورزی در کشور، منابع آب زیرزمینی است. میزان وابستگی تولیدات زراعی و باغی به این منبع طبیعی تا حدی است که برداشت بیش از حد مجاز و در برخی مواقع استفاده بی‌رویه موجب کاهش سطح آب زیرزمینی در بسیاری از نقاط کشور گردیده است (Siadat, 2000). آمار نشان می‌دهد میزان کسری مخزن سالانه منابع آب زیرزمینی سطح کشور

۱- دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران

\*- نویسنده مسئول: Email: Nasseri\_ab@yahoo.com

می‌توان از هر سه مدل استفاده نمود.

برخی از مهم‌ترین پژوهش‌ها و کاربردهای سری‌های زمانی در علوم و مهندسی آب و به‌ویژه در مسائل آب‌های زیرزمینی را می‌توان به شرح ذیل خلاصه نمود. یک سری زمانی از نوسانات سطح آب زیرزمینی مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌ها است که برحسب سال مرتب شده و هدف از تحلیل آن توصیف، تشریح و آینده‌پژوهی مقادیر آینده نوسانات سطح آب زیرزمینی است (Chatfield, 1996) و نیرومند، (۱۳۷۶). با استفاده از سری‌های زمانی دوگانه به صورت توابع همبستگی متقابل و تابع چگالی طیفی، چیت‌سازان و همکاران (۱۳۸۶) آبخوان دشت شهرکرد را به چهار منطقه با همبستگی و تاخیر فازهای مختلف تقسیم نموده‌اند. زاهدی و قویدل‌رحیمی با استفاده از مدل حالت-وینترز بارش در پهنه حوضه آبریز ارومیه را تا سال ۲۰۱۰ پیش‌بینی نموده‌اند (Zahedi and Ghavidel Rahimi, 2002). مناسب‌ترین مدل برای تحلیل مطالعات هیدرولوژی و اقلیمی را، سالاس و همکاران مدل ARIMA معرفی نموده‌اند (Salas et al., 1980). از سوی دیگر، سن، روش مدل‌بندی ARIMA را معتبرترین روش بررسی تغییرات اقلیمی معرفی نموده است (Sen, 1998). از جمله پژوهش‌های مربوط به مدل‌بندی و یا پیش‌بینی جریان‌های رودخانه‌ای که یکی از مولفه‌های تغذیه سطح آب زیرزمینی است، به موارد زیر می‌توان اشاره نمود. با استفاده از تبدیل باکس-کاکس و روش سری‌های زمانی، رحیمی و غیور برای پیش‌بینی دبی جریان رودخانه‌ای در ایستگاه‌های اماند و بارز مدل ARIMA و برای ایستگاه شالو مدل ARMA را پیشنهاد نموده‌اند (Rahimi and Gayoor, 2010). قهرمان و قره‌خانی با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و سری‌های زمانی دبی ماهانه طالقان رود را در گام زمانی آینده پیش‌بینی نموده‌اند و مناسب‌ترین مدل را ARIMA فصلی پیشنهاد نموده‌اند (Ghahraman and Gharekhani, 2011). ویسی‌پور و همکاران (۱۳۸۹) تغییرات بارش در منطقه کرمانشاه را از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۶ میلادی با استفاده از مدل سری زمانی ARIMA بررسی نموده و برای سال‌های آینده پیش‌بینی نموده‌اند. برای مدل‌بندی سری تبخیر- که یکی از مولفه‌های تخلیه سطح آب زیرزمینی به شمار می‌رود- در ایستگاه سینوپتیک شیراز، فتح‌آبادی و همکاران از مدل ARIMA(1,1,1) استفاده نموده و عملکرد آن را بسیار رضایت‌بخش اعلام نموده‌اند (Fathabadi et al., 2008). در سال‌های اخیر پژوهشگران متعدد از جمله ایروین و همکاران (Irvine et al., 2015)، واندراستاین و همکاران (Vandersteen et al., 2015)، جانسون و همکاران (Johnson et al., 2012)، آدیکاری و همکاران (Adhikary et al., 2012)، رائو و همکاران (Rau et al., 2012)، رخسندرو و امیری (Rakhshandehroo and Amiri, 2012)، پیترسون و همکاران (Peterson et al., 2010)، کوئبرت (Cuthbert, 2012).

زراعی و باغی در آن، نیازمند مدیریت ویژه منابع آب زیرزمینی است. در این دشت بیش از ۹۵ درصد از نیاز آبی محصولات زراعی و باغی با استفاده از منابع آب زیرزمینی تامین می‌شود (بی‌نام، ۱۳۹۸). بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع آب زیرزمینی در این دشت که با مدل‌بندی کمی مصرف و پیش‌بینی روند استفاده از این منابع امکان‌پذیر است، از اولویت‌ها و ضروریات مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب زیرزمینی به‌شمار می‌رود. از مناسب‌ترین روش مرسوم برای مدل‌بندی و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در دنیا استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی بیان‌ژنی و سری‌های زمانی است. استفاده از این روش‌ها در برخی از مسائل هیدرولوژی، هیدروژئولوژی، هواشناسی و حتی آبیاری در حال گسترش است. در ادامه به مهم‌ترین یا برجسته‌ترین پژوهش‌ها در خصوص کاربرد این دو روش پرداخته می‌شود.

برنامه‌ریزی بیان ژنی<sup>۱</sup> (GEP) جدیدترین روش از بین روش‌های الگوریتم‌گردشی است. از این روش برای مدل‌بندی فرآیندهای غیرخطی و پیچیده استفاده می‌شود. این روش از دو روش الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> (GA) و برنامه‌ریزی ژنتیک<sup>۳</sup> (GP) ترکیب یافته که اولین بار توسط فریرا<sup>۴</sup> در سال ۱۹۹۹ ابداع گردید. به دلیل کفایت دقت، این روش در مدل‌بندی فرآیندهای علوم و مهندسی کاربرد وسیعی یافته است. در تحلیل پدیده‌های آب و خاک، روش برنامه‌ریزی بیان ژنی برای برآورد دما در اعماق مختلف خاک (Samadianfard et al., 1998)، تبخیر و تعرق (Parasuraman et al., 2007a)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Parasuraman et al., 2007b) و دبی جریان رودخانه (Güven, 2009) به کار رفته و دقت و سازگاری این روش تایید شده است. همچنین عزیززی و همکاران (۱۴۰۰) برای برآورد بهینه نوسانات درازمدت چاه مشاهداتی سراب قنبر در یک دوره ۱۳ ساله از ترکیب مدل بیان ژنی با تبدیل موجک استفاده نموده‌اند. دقت مناسب مدل بیان ژنی با تبدیل موجک را تایید نموده‌اند. حسین‌آبادی و همکاران (۱۴۰۰) پهنه‌بندی هدایت الکتریکی آب زیرزمینی آبخوان دشت مشهد با استفاده از روش‌های درون‌یابی و ارزیابی مدل برنامه‌ریزی بیان ژنی برای پیش‌بینی این پارامتر با استفاده از داده‌های چاه‌های مشاهداتی متعدد را انجام داده و دقت مناسب کاربرد مدل برنامه‌ریزی بیان ژنی را تایید نموده‌اند. محمدرضا پور و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از آمار کیفی چاه‌های متعدد در استان گلستان، کیفیت آب را با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژنی، شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی - فازی بررسی نموده و گزارش کرده‌اند برای تحلیل و پیش‌بینی پارامترهای کیفی آب

- 1 - Genetic Expression Programming, GEP
- 2 - Genetic Algorithm, GA
- 3 - Genetic Programming, GP
- 4 - Ferreira

جوی سالانه در این دشت برابر ۲۵۶ میلی متر است است (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۰). سطح زیرکشت اراضی محصولات زراعی و باغی در شهرستان شبستر به ترتیب برابر ۱۸۴۰۰ و ۸۶۵۰ هکتار است که به ترتیب ۸۲ و ۹۵ درصد آن فاریاب است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۹). به همین جهت این منطقه از جمله مناطق مهم کشاورزی استان آذربایجان شرقی است که به دلیل سهم زیاد آب زیرزمینی (بیش از ۹۵ درصد) در تامین نیاز آبی محصولات مختلف زراعی و باغی در آن، نیازمند مدیریت ویژه منابع آب زیرزمینی است. علاوه می‌نماید برای حوزه دریاچه ارومیه از ۲۴۵۷ میلیون مترمکعب تخلیه سالانه، حدود ۸۰، ۱۰ و ۱۰ درصد آن به ترتیب به تخلیه از طریق چاه‌ها، قنات‌ها و چشمه‌ها تعلق دارد (بی‌نام، ۱۳۹۸). تخلیه سالانه دشت در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۸۸ از طریق چاه‌ها، قنات‌ها و چشمه‌ها به ترتیب برابر ۷۲، ۳۳ و ۰/۵ میلیون مترمکعب بود.

وسعت کل دشت و آبخوان شبستر به ترتیب برابر ۵۰۱ و ۳۸۳ کیلومترمربع است (بی‌نام، ۱۳۹۸). آبخوان شبستر از نوع تحت فشار-آزاد می‌باشد. میانگین ضریب ذخیره در این آبخوان پنج درصد برآورد شده است. بیشترین و کمترین مقدار ضریب قابلیت انتقال آب به ترتیب برابر ۸۵۰ و ۱۵۰ مترمربع برروز و در قلعه حسن آباد و اویقان گزارش شده است (بی‌نام، ۱۳۹۸). میانگین عمق برخورد به آب در پهنه آبخوان حدود ۳۶ متر برآورد شده است. به دلیل برداشت از آب زیرزمینی به‌طور میانگین هر سال نزدیک ۴۰ سانتی‌متر از سطح آب زیرزمینی کاسته می‌شود. کل برداشت و تخلیه سالانه از چاه، چشمه و قنات موجود در دشت حدود ۱۰۵/۴ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود که سهم بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت از منابع آب زیرزمینی به ترتیب برابر ۹۴/۷، ۹/۲ و ۱/۵ میلیون مترمکعب می‌باشد (بی‌نام، ۱۳۹۸). برای بررسی وضعیت سفره زیرزمینی دشت شبستر و تحلیل تغییرات زمانی آن از آمار آب‌های زیرزمینی وزارت نیرو استفاده شده است (بی‌نام، ۱۳۹۸). در این پژوهش از میانگین سطح آب زیرزمینی در ماه‌های مختلف سال به عنوان سطح میانگین سالانه در آبخوان دشت استفاده شد. داده‌های آب زیرزمینی به مدت ۳۵ سال از سال آبی ۱۳۶۵-۶۶ تا ۱۴۰۰-۱۳۹۹ بررسی شده و با توجه به هدف پژوهش، سطح آب زیرزمینی تا سال ۱۴۱۰ آینده‌نگاری گردید.

### نحوه کاربرد روش‌های سری‌های زمانی در مدل‌بندی نوسانات سطح آب زیرزمینی و آینده‌پژوهی آن

در این پژوهش از روش‌های مختلف سری‌های زمانی برای مدل‌بندی، آزمون و آینده‌پژوهی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت شبستر استفاده گردید.

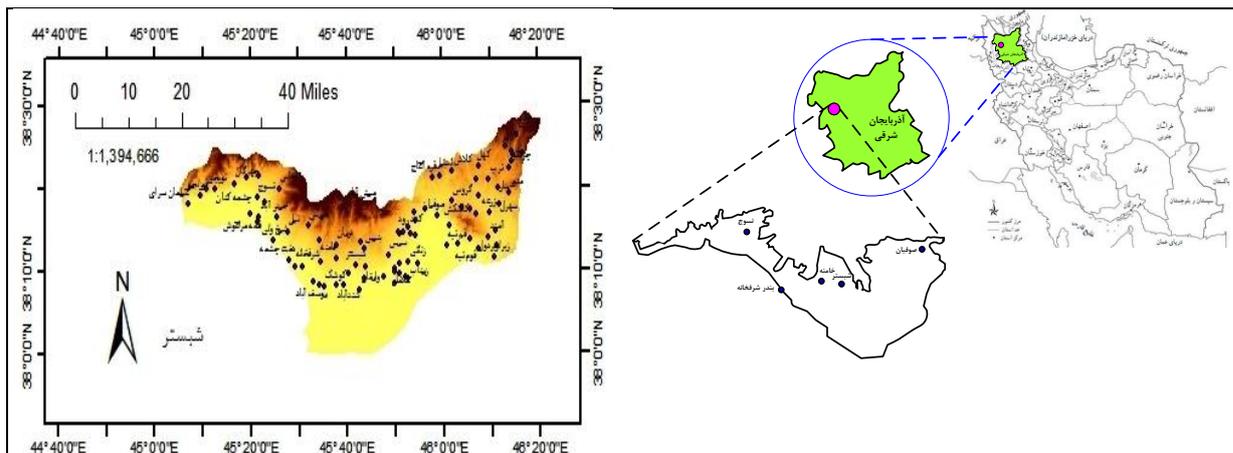
(2010)، هاج و همکاران (Hatch et al., 2010)، کریکل و همکاران (Cirkel et al., 2010) مطالعات آب‌های زیرزمینی را با استفاده از سری‌های زمانی تحلیل نموده و یافته‌های موفقیت‌آمیز را گزارش نموده‌اند. همچنین ناصری و حسن اقلی (۱۳۹۷) تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر با کاربرد الگوی اتورگرسیو تلفیقی میانگین متحرک فصلی را تحلیل نموده و دقت این مدل را در الگوبندی و پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی تأیید نموده‌اند. ناصری (۱۳۹۸) کاربرد الگوهای مختلف سری‌های زمانی برای بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت مرند را مقایسه نموده و الگوی اتورگرسیو تلفیقی میانگین متحرک به‌عنوان دقیق‌ترین الگو برای تحلیل و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در این دشت پیشنهاد شده است. ناصری و ناصری (۱۴۰۰) تغییرات سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند را با روش‌های سامانه استنتاج فازی عصبی، سری‌های زمانی و رگرسیونی بررسی نموده و روش سامانه استنتاج فازی عصبی را دقیق‌ترین روش برای الگوبندی و پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی گزارش نموده‌اند.

با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی در تامین بیش از ۹۵ درصد از نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی در دشت شبستر (در حاشیه دریاچه ارومیه) و اهمیت بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع آب زیرزمینی در این دشت که مستلزم مدل‌بندی کمی مصرف و پیش‌بینی روند استفاده از این منابع بوده و از سوی دیگر با عنایت به توانمندی، سازگاری و شایستگی روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژنی و سری‌های زمانی در تحلیل رفتار بسیاری از پدیده‌های مهندسی آب، هدف این پژوهش تحلیل و آینده‌پژوهی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت شبستر با مدل مناسب برنامه‌ریزی بیان ژنی و سری‌های زمانی بوده است. یافته‌های پژوهش قابلیت کاربرد داشته و در برنامه‌ریزی مدیریت پایدار و تعادل بخشی آب‌های زیرزمینی در حاشیه دریاچه ارومیه می‌تواند مفید و موثر باشد.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات جغرافیایی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه

دشت شبستر در شمال غربی استان آذربایجان شرقی در ۶۰ کیلومتری غرب شهرستان تبریز و در ساحل دریاچه ارومیه واقع شده است. این دشت در ارتفاع ۱۴۵۰ متری از سطح دریا و در موقعیت مابین ۳۸ درجه و ۳۸ درجه و ۴ دقیقه و ۴۸ ثانیه شمالی و نیز ۴۵ درجه و ۵ دقیقه و ۱۰ ثانیه و ۴۶ درجه و ۲۰ دقیقه و ۱ ثانیه شرقی واقع شده است. این دشت از شمال به حوزه آبریز دریای خزر، از جنوب و شرق به زیر حوزه آبی‌چای و از غرب به دریاچه ارومیه و زیر حوزه تسوج محدود می‌شود (شکل ۱). میانگین بلند مدت ریزش‌های



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت شهبستر در نقشه استانی و کشوری

بوده در تأخیر  $k$ ،  $\overline{GWL}_k$  میانگین سری سطح آب زیرزمینی و  $GWL_t$  مقدار سری در زمان  $t$  و  $n$  تعداد اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. تابع خودهمبستگی جزء (PACF) عبارت است از همبستگی بین سری سطح آب زیرزمینی در  $t+k$  و  $t$  وقتی که وابستگی خطی سری سطح آب زیرزمینی در  $t+1$  و  $t+2$  و ... حذف شده باشد، تابع خودهمبستگی جزء برای تغییرات سطح آب زیرزمینی از رابطه زیر محاسبه گردید (نیرومند، ۱۳۷۶):

$$\hat{\rho}_{k+1,k+1} = \frac{\hat{\rho}_{k+1} - \sum_{j=1}^k \hat{\rho}_{kj} \hat{\rho}_{k+1-j}}{1 - \sum_{j=1}^k \hat{\rho}_{kj} \hat{\rho}_j} \quad (2)$$

نمودار تغییرات ضرایب خودهمبستگی و خودهمبستگی جزء تا تأخیرهای به تعداد یک سوم تعداد کل مشاهدات با خودهمبستگی نگار و خودهمبستگی جزء نگار نشان داده شد. دامنه بحرانی  $\pm \frac{1.96}{\sqrt{n}}$  به صورت باندهای بالا و پایین رسم گردید. با عنایت به مدل نهایی و مناسب این پژوهش، مدل اتورگرسیو تلفیقی میانگین متحرک  $ARIMA(p,d,q)$  به صورت زیر تشریح می‌شود. در ادامه ملاحظه خواهد شد که سایر مدل‌ها از نظر دقت دارای اولویت نبوده و به همین دلیل در این بخش تشریح نگردید.

$$GWL_t = \rho_1 GWL_{t-1} + \rho_2 GWL_{t-2} + \dots + \rho_p GWL_{t-p} + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} \quad (4)$$

که در آن؛  $p$  و  $q$  به ترتیب مراتب الگوی اتورگرسیو و میانگین متحرک،  $d$  مرتبه تلفیق و  $n$  تعداد مشاهدات سری است. ضرایب الگو یعنی  $\rho$  و  $\theta$  با روش حداکثر درستنمایی با استفاده از نرم‌افزار MINITAB به دست آمد. برای انتخاب بهترین مدل از بین مدل‌های مختلف، از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، معیارهای آگاهی آکائیک (AIC)، هانن کوپین (HQC)

روش‌های سری‌های زمانی شامل گام تصادفی، برازش خطی، برازش درجه دوم، میانگین متحرک ساده دوجزئی، هموارسازی نمایی ساده، هموارسازی نمایی خطی براون<sup>۱</sup>، هموارسازی نمایی خطی حالت<sup>۲</sup>، هموارسازی نمایی کوادراتیک براون<sup>۳</sup>، هموارسازی نمایی وینتر<sup>۴</sup> و مدل‌های مختلف اتورگرسیو تلفیقی میانگین متحرک<sup>۵</sup> (ARIMA) بود. توصیف فرآیند شامل رسم نمودار داده‌ها، تشخیص ایستائی و نالیستائی آن و بررسی خودهمبستگی سری سطح آب زیرزمینی بود. آینده‌پژوهی شامل برآورد مقادیر آینده سری بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری شده بود. برای تشخیص مدل اولیه برای یک سری سطح آب زیرزمینی از تابع خودهمبستگی نمونه<sup>۶</sup> (ACF) و تابع خودهمبستگی جزء نمونه<sup>۷</sup> (PACF) استفاده گردید (Chatfield, 1996 و نیرومند، ۱۳۷۶).

تابع خودهمبستگی نمونه در سری‌های سطح آب زیرزمینی عبارت از همبستگی بین سری سطح آب با همان سری در تأخیر  $k$  است. مقدار ACF نمونه از رابطه زیر محاسبه گردید (Chatfield, 1996 و نیرومند، ۱۳۷۶):

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (GWL_t - \overline{GWL})(GWL_{t+k} - \overline{GWL})}{\sum_{t=1}^n (GWL_t - \overline{GWL})^2} \quad (1)$$

که در آن؛  $r_k$  ضریب خودهمبستگی سری سطح آب زیرزمینی

- 1 -Brown's linear exponential smoothing
- 2 -Holt's linear exponential smoothing
- 3 -Quadratic exponential smoothing
- 4 -Winter's exponential smoothing
- 5 - Autoregressive integrated moving average
- 6 - Autocorrelation function
- 7 -Partial autocorrelation function

را مشخص می‌کند.

قاعده سوم: جهت پر شدن سطر، از چپ به راست است.

قاعده چهارم: نقطه پایانی درخت بیان، وجود فقط ترمینال (نه تابع) است.

لازم به توضیح است برای استخراج ژن از روی درخت بیان، از بالا به پایین و از چپ به راست اقدام می‌شود.

برای برآورد و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با استفاده از این روش، در مرحله نخست جمعیت اولیه از مجموعه راه حل‌ها تشکیل می‌شود و با استفاده از مجموعه‌ای از توابع و ترمینال‌ها صورت می‌گیرد. در مرحله بعدی، کروموزوم‌ها به بیان درختی نشان داده می‌شوند. در مرحله بعد، با استفاده از تابع برازش، میزان سازگاری یا کارایی اعضای جمعیت کروموزوم‌ها تعیین می‌شود. به کمک توابع برازش با حفظ جواب‌های برتر و حذف جواب‌های ضعیف‌تر می‌توان به جواب مطلوب نزدیک‌تر شد. مراحل اصلی الگوریتم در شکل ۲ به صورت نمودار گردش نشان داده شده است.

در این بررسی، مدل‌ها و ترکیب‌های مختلف از داده‌های سطح آب زیرزمینی از ۲ تا ۷ سال (m از ۲ تا ۷) به عنوان ورودی‌های برنامه‌ریزی بیان ژن در نظر گرفته شد. تعداد ژن‌ها سه و اندازه سر ژن‌ها هفت در نظر گرفته شد. تابع اتصال ژنی به صورت ضربی بود. برای ارزیابی توانمندی برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی، ضریب تعیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا<sup>۴</sup> (RMSE) و ضریب کارایی ناش-ساتکلیف (NSE) و سایر آماره‌ها استفاده گردید.

$$R^2 = \frac{(\sum_{j=1}^n [GWL1 - \overline{GWL1}][GWL2 - \overline{GWL2}])^2}{\sum_{j=1}^n [GWL1 - \overline{GWL1}]^2 \sum_{j=1}^n [GWL2 - \overline{GWL2}]^2} \quad (8)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n [GWL1 - GWL2]^2}{\sum_{j=1}^n [GWL1 - \overline{GWL1}]^2} \quad (9)$$

که در آن؛  $GWL1$  و  $GWL2$  به ترتیب کاهش سطح آب

زیرزمینی اندازه‌گیری شده و برآورد شده است. مراحل عملیاتی نمودن مراحل این الگوریتم با استفاده از نرم‌افزار GeneXproTools 5.0 صورت گرفت. برای تحلیل سطح آب زیرزمینی با روش برنامه‌ریزی بیان ژنی از مجموع ۳۵ سال (از سال ۱۳۶۵ تا ۱۴۰۰) داده‌های موجود، داده‌های ۲۸ سال (۸۰ درصد داده‌ها) برای مرحله آموزش و داده‌های ۷ سال (۲۰ درصد داده‌ها) برای مرحله آزمون در چارچوب ترکیب‌های مختلف ورودی در نظر گرفته شد. مدل‌ها و ترکیب‌های مختلف از

و شوارز بیزین (SBIC) استفاده گردید. هریک از این معیارها به صورت برآورد گردید (نیرومند، ۱۳۷۶):

$$RMSE \quad (4)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (GWL1 - GWL2)^2}$$

$$AIC = \ln \sigma^2 + \frac{2}{T} (p+q) \quad (5)$$

$$SBIC = \ln \sigma^2 + \frac{\ln T}{T} (p+q) \quad (6)$$

$$HQC = \log(\sigma^2) + 2n \log(\log T)/T \quad (7)$$

که در آن؛  $GWL1$  و  $GWL2$  به ترتیب کاهش سطح آب

زیرزمینی اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل موردنظر است.

نحوه مدل‌بندی، آزمون و آینده پژوهی با سری زمانی به این صورت بود که در مجموع ۴۵ سال (از سال ۱۳۶۵ تا ۱۴۱۰) تغییرات سطح آب زیرزمینی تحلیل گردید. داده‌های ۳۵ سال برای مدل‌بندی و آزمون و ۱۰ سال بعدی (۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰) برای آینده‌پژوهی استفاده گردید.

### نحوه کاربرد برنامه‌ریزی بیان ژن در مدل‌بندی نوسانات سطح

#### آب زیرزمینی و آینده‌پژوهی آن

در روش برنامه‌ریزی بیان ژن، مشابه با الگوریتم ژنتیک، کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت و مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک، ساختارهای شاخه‌ای با اندازه و اشکال متفاوت ترکیب می‌گردند. معماری خطی کروموزوم‌ها سبب می‌شود کاربرد عملگرهای ژنتیک مانند جهش و ترکیب همواره معماری و ساختار معتبر و درستی ایجاد نماید. در این روش هر ژن یک سر و دنباله دارد و این معماری تضمین‌کننده تولید برنامه‌های معتبر و درست است. دلیل انتخاب روش برنامه‌ریزی بیان ژنی نسبت به سایر روش‌های الگوریتم گردش، داشتن برخی نقاط قوت آن است. از نقاط قوت و توانمندی GEP می‌توان به طبیعت چندژنی بودن آن اشاره نمود که برای ارزیابی مدل‌های پیچیده مناسب بوده و شامل چندین زیر مدل نیز می‌باشد.

کروموزوم‌ها از مجموعه‌ای توابع و ترمینال‌ها تشکیل می‌شوند. توابع برای بیان ارتباط بین متغیرها و ترمینال‌ها همان متغیرها هستند. به طور معمول از چهار قاعده زیر برای بیان درختی ۱ کروموزوم‌ها با زبان کاروا ۲ استفاده می‌شود:

قاعده اول: ریشه درخت بیان موقعیت نخست ژن است.

قاعده دوم: مجموع آرگومان سطر جاری، تعداد گره در سطر بعدی

3 - Head

4 - Root of Mean Square Error, RMSE

1 - Expression Tree Structure

2 - Karva language

خودهمبستگی جزء (PACF) تا هشت سال تأخیر نشان داده شده است. سهم هر دو مدل اتورگرسیو و میانگین متحرک کاهش سطح آب زیرزمینی تشخیص داده شد. برای دقیق سازی مدل مناسب برای نوسانات سطح آب زیرزمینی در این دشت، مدل‌های مختلف سری زمانی نیز ارزیابی گردید. در جدول ۱، مشخصات چهارده مدل مختلف سری زمانی قابل انتخاب برای تحلیل و آینده‌پژوهی کاهش تجمعی سطح آب زیرزمینی ارائه شده است. شاخص‌های مختلف برای انتخاب مناسب‌ترین مدل در این جدول درج شده است.

با در نظر گرفتن همه این شاخص‌ها، مدل  $ARIMA(0,2,1)$  مناسب‌ترین مدل برای بیان کاهش تجمعی سطح آب زیرزمینی دشت شبستر تشخیص داده شد. سن (۱۹۸۸) روش مدل‌بندی  $ARIMA$  را معتبرترین روش بررسی تغییرات اقلیمی معرفی نموده است. همچنین سالاس و همکاران (Salas et al., 1980) گزارش نموده برای مدل‌بندی زمانی رفتارهای پدیده‌های هیدرولوژیک و اقلیمی، مناسب‌ترین مدل  $ARIMA$  می‌باشد. بنابراین این یافته با گزارش این پژوهشگران سازگاری دارد. به نظر می‌رسد رفتار سری‌های کاهش تجمعی سطح آب زیرزمینی مشابه رفتار مؤلفه‌های تخلیه و تغذیه سطح آب زیرزمینی مانند نفوذ آب در خاک (ناصری، ۱۳۸۳) بود.

داده‌های سطح آب زیرزمینی از ۲ تا ۷ سال ( $m=2$  تا ۷) به عنوان ورودی‌های روش GEP به تفکیک در نظر گرفته شد. برای انتخاب بهترین مدل از بین مدل‌های مختلف، از آماره‌های مناسب استفاده گردید.

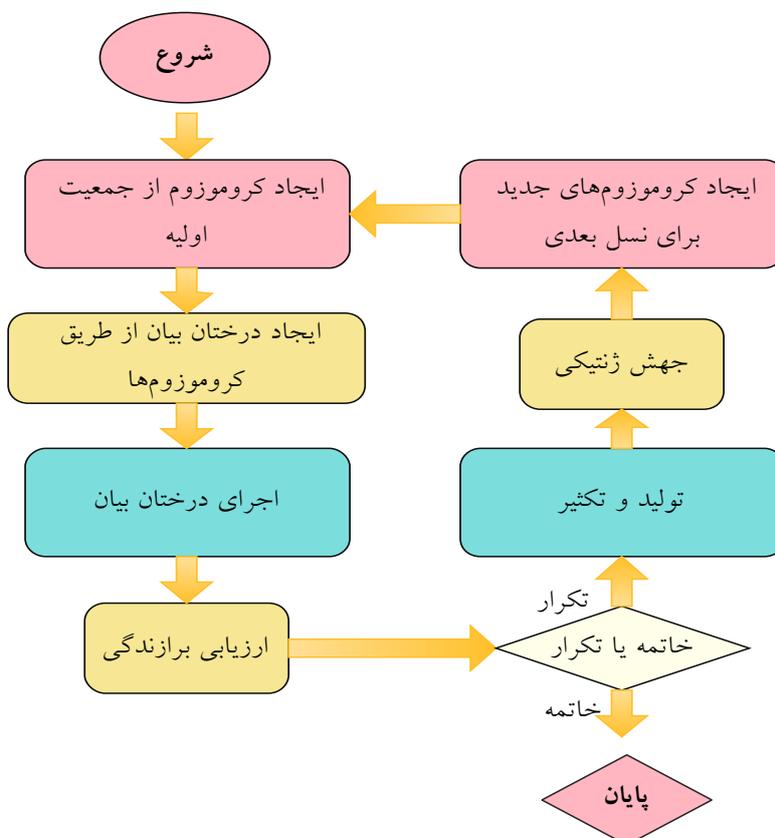
## نتایج و بحث

### نوسانات زمانی سطح آب زیرزمینی دشت شبستر

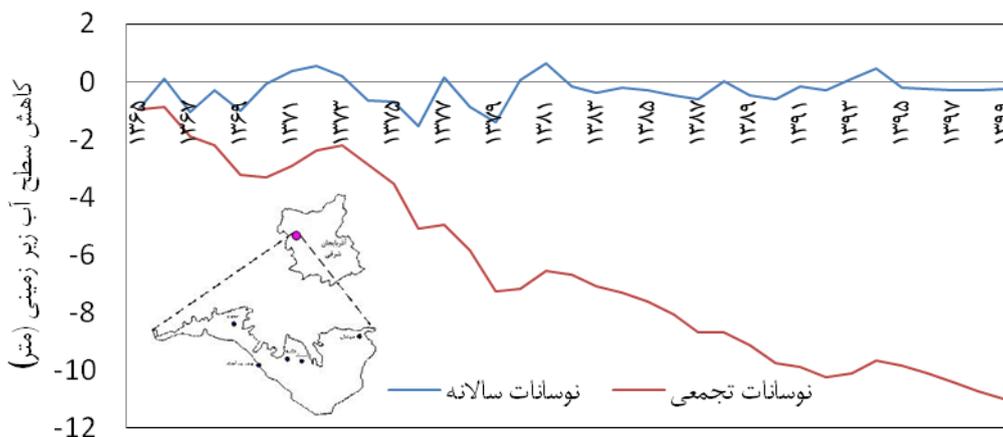
میانگین سری کاهش سالانه و تجمعی سطح آب زیرزمینی دشت نسبت به مقادیر سال آبی ۶۶-۱۳۶۵ (سال پایه) در شکل ۳ ارائه گردید. نتایج نشان داد در طول دوره آماری ۳۳ سال، سطح آب زیرزمینی همواره روند کاهشی داشته است. به‌طور میانگین، هر سال حدود ۳۲ سانتی‌متر از سطح آب زیرزمینی در این دشت کاسته شده است. بیش از ۱۰/۵ متر از سطح آب زیرزمینی از سال پایه تا انتهای سی و سومین سال کاهش یافته است.

### مدل‌بندی نوسانات سطح آب زیرزمینی با مدل‌های سری‌های زمانی

در شکل ۴، نمودار تابع خودهمبستگی (ACF) و تابع



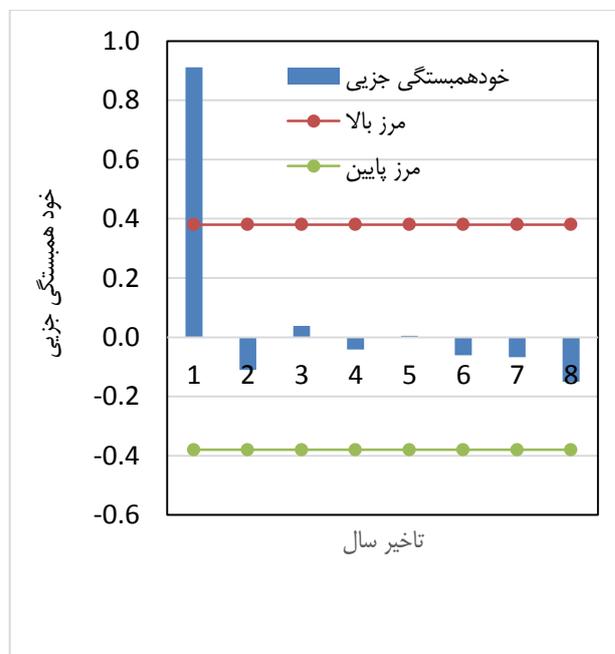
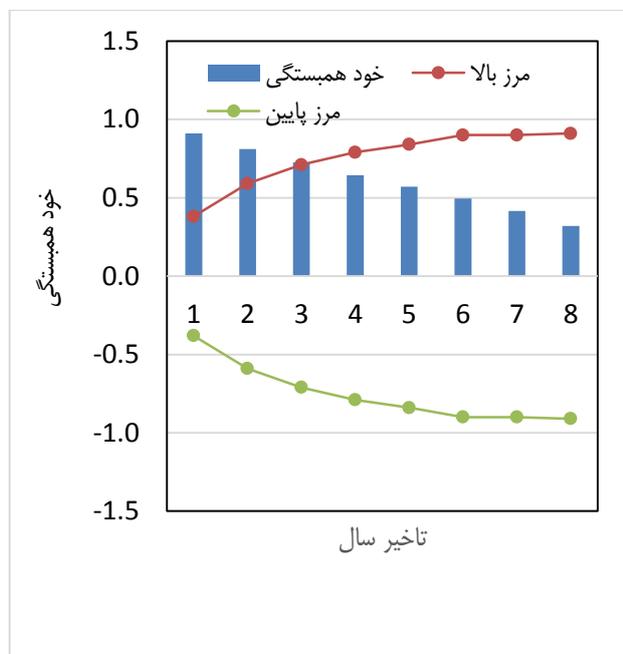
شکل ۲- الگوریتم برنامه‌ریزی بیان‌ژنی



شکل ۳- نوسانات سالانه و تجمعی سطح آب زیرزمینی دشت شبستر از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۸

مشخصات جدول ۲ تنظیم شد. نتیجه ارزیابی ضرایب مدل در جدول ۲ ارائه گردید. نتایج نشان داد ضریب میانگین متحرک بودن نوسانات سطح آب در سطح کمتر از یک درصد معنی‌دار بود. از مجموع ۴۵ سال آماری کاهش سطح آب زیرزمینی، ۳۵ سال اول برای مدل‌بندی و آزمون و ۱۰ سال بعداز آن برای آینده‌پژوهی سطح آب زیرزمینی استفاده گردید. مدل به‌دست‌آمده تا حدودی داده‌های کاهش سطح آب زیرزمینی در این دشت را برازش نموده است (شکل ۴).

دلیل این تشابه از آنجا ناشی می‌شود که همبستگی جزئی سری دارای مقادیری معنی‌دار بود و بنابراین سهم میانگین متحرک مدل برجسته بود. بنابراین علاوه بر سازگاری رفتار برخی از مؤلفه‌های تخلیه و تغذیه آب زیرزمینی با این یافته، مدل زمانی برازش شده به کاهش تجمعی سطح آب زیرزمینی در دشت شبستر نیز با این یافته سازگار تشخیص داده شد. بنابراین مدل انتخاب‌شده برای بیان سری زمانی سطح آب زیرزمینی دشت شبستر از نوع اتورگرسیو تلفیقی میانگین متحرک (ARIMA) و به‌صورت  $ARIMA(0,2,1)$  با



شکل ۴- خود همبستگی نگار و خود همبستگی جزئی نگار سری کاهش سطح آب زیرزمینی دشت شبستر در هشت تاخیر متوالی

جدول ۱- مدل‌های ممکن سری زمانی برای انتخاب مناسب‌ترین مدل کاهش تجمعی سطح آب در دشت شبستر

آماره‌های سنجش دقت مدل						روش‌های مدل بندی و آینده پژوهی
SBIC	HQC	AIC	ME	MAE	RMSE	
-۱/۰۵	-۱/۰۵	-۱/۰۵	-۳۰	۰/۴۶	۰/۵۹	گام تصادفی
۲/۴۰	۲/۳۷	۲/۳۵	۰/۰۰	۲/۷۵	۳/۱۴	میانگین ساده
-۰/۴۶	-۰/۵۲	-۰/۵۵	۰/۰۰	۰/۵۵	۰/۷۱	برازش خطی
-۰/۵۱	-۰/۶۰	-۰/۶۴	۰/۰۰	۰/۴۸	۰/۶۶	برازش درجه دوم
-۰/۴۰	-۰/۴۳	-۰/۴۴	-۰/۴۶	۰/۶۴	۰/۷۸	میانگین متحرک ساده دوجزئی
-۰/۹۴	-۰/۹۷	-۰/۹۹	-۰/۲۹	۰/۴۴	۰/۵۹	هموارسازی نمایی ساده
-۰/۹۰	-۰/۹۳	-۰/۹۴	-۰/۰۳	۰/۴۸	۰/۶۱	هموارسازی نمایی خطی براون
-۰/۶۰	-۰/۶۶	-۰/۶۹	۰/۰۰	۰/۵۱	۰/۶۷	هموارسازی نمایی خطی حالت
-۰/۶۲	-۰/۶۵	-۰/۶۷	-۰/۰۱	۰/۵۶	۰/۷۰	هموارسازی نمایی کوادراتیک براون
-۱/۲۱	-۱/۲۴	-۱/۲۶	۰/۰۰	۰/۳۸	۰/۵۰	ARIMA(0,2,1)
-۱/۱۰	-۱/۱۶	-۱/۱۹	۰/۰۰	۰/۳۹	۰/۵۲	ARIMA(1,2,1)
-۱/۱۰	-۱/۱۶	-۱/۱۹	۰/۰۱	۰/۳۹	۰/۵۲	ARIMA(1,2,2)
-۱/۰۹	-۱/۱۲	-۱/۱۴	-۰/۱۰	۰/۴۰	۰/۵۵	ARIMA(1,0,0)
-۱/۰۲	-۱/۰۸	-۱/۱۱	-۰/۰۹	۰/۳۹	۰/۵۴	ARIMA(1,0,1)

جدول ۲- مشخصات پارامترهای مدل برازش شده به داده‌های کاهش سطح آب زیرزمینی دشت شبستر

پارامتر	ضرایب	اشتباه استاندارد	آماره t	مقدار P
ARIMA(0,2,1)	۱/۰۲۴	۰/۰۲	۵۴/۹۵	نزدیک صفر درصد

جدول ۳- مدل‌های ممکن برنامه‌ریزی بیان ژنی برای انتخاب مناسب‌ترین مدل برای بیان کاهش تجمعی سطح آب در دشت شبستر

آماره‌های سنجش دقت مدل										
ردیف	ورودی مدل: m برابر با	MSE	RMSE	RAE	MAE	RSE	RRSE	NSE	r	R <sup>2</sup>
۱	۲	۰/۲۱	۰/۳۴	۰/۶۷	۰/۲۵	۰/۴۷	۰/۶۸	۰/۴۲	۰/۷۳	۰/۵۴
۲	۳	۰/۱۱	۰/۳۳	۰/۶۷	۰/۳۴	۰/۴۴	۰/۶۷	۰/۴۲	۰/۷۵	۰/۵۶
۳	۴	۰/۰۷	۰/۲۷	۰/۵۵	۰/۲۱	۰/۳۰	۰/۵۵	۰/۵۱	۰/۸۴	۰/۷۰
۴	۵	۰/۰۶	۰/۲۷	۰/۵۸	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۵۲	۰/۵۶	۰/۸۶	۰/۷۵
۵	۶	۰/۰۸	۰/۲۸	۰/۵۹	۰/۲۱	۰/۳۲	۰/۵۶	۰/۶۲	۰/۸۶	۰/۷۵
۶	۷	۰/۰۷	۰/۲۶	۰/۵۸	۰/۲۰	۰/۲۸	۰/۵۲	۰/۶۹	۰/۸۷	۰/۷۶

توضیح: m تعداد متغیر ورودی را نشان میدهد.

شاخص‌های آماری ارزیابی مدل‌ها و ترکیب‌های GEP در مرحله آزمون ارائه شده است.

بر اساس بررسی آماره‌های سنجش دقت مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژنی، مدل با m=7 با شاخص‌های MSE=0.07; RMSE=0.26; RAE=0.58; MAE=0.20; RSE=0.28; RRSE=0.52; r=0.87; R<sup>2</sup>=0.76 به عنوان مدل بهینه انتخاب گردید (جدول ۳). ساختار بیان درختی آینده پژوهی سطح آب زیرزمینی با مدل بهینه (m=7) به همراه رابطه ریاضی و معادله ژنی ساختار در جدول ۴ نشان داده شده است. معادلات ژنی مبتنی بر معادلات ضربی برای ژن‌های اول تا سوم به صورت

مدل بندی نوسانات سطح آب زیرزمینی با مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژنی

برای تحلیل سطح آب زیرزمینی با روش برنامه‌ریزی بیان ژنی از مجموع ۳۵ سال (از سال ۱۳۶۵ تا ۱۴۰۰) داده‌های موجود، داده‌های ۲۸ سال (۸۰ درصد داده‌ها) برای مرحله آموزش و داده‌های ۷ سال (۲۰ درصد داده‌ها) برای مرحله آزمون در چارچوب ترکیب‌های مختلف ورودی در نظر گرفته شد. مدل‌ها و ترکیب‌های مختلف از داده‌های سطح آب زیرزمینی از ۲ تا ۷ سال (m از ۲ تا ۷) به عنوان ورودی‌های روش GEP به تفکیک در نظر گرفته شد. در جدول ۳ مقادیر

نمود. با توجه به این که مدل‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی بیان ژنی یک روش حل صریح بین مولفه‌های ورودی و خروجی مدل ارائه می‌نمایند در مقایسه با سایر مدل‌ها از ارجحیت و برتری نسبی برخوردار است. یافته‌های قربانی و همکاران (Ghorbani et al 2010a, 2010b) و کاوه‌کار و همکاران (۱۳۹۲) دقت، سازگاری و ارجحیت استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژنی در تحلیل مسائل مهندسی آب را تایید نموده‌اند.

$Y=Y1*Y2*Y3$  به دست آمد. به عبارت دیگر بیان درختی ژن اول ( $Y1$ ) و ژن دوم ( $Y2$ ) و ژن سوم ( $Y3$ ) با عملگر ضربی بهم اتصال یافته‌اند.

مقادیر برآورد شده با مدل بهینه در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده سطح آب زیرزمینی در شکل‌های ۵ و ۶ و ۷ ارائه شده است. نتایج نشان داد مدل انتخاب شده از دقت رضایت‌بخشی برخوردار است و می‌توان برای تحلیل و آینده‌پژوهی سطح آب زیرزمینی از آن استفاده

جدول ۴- بیان درختی و رابطه ریاضی آینده‌پژوهی سطح آب زیرزمینی دشت شبستر

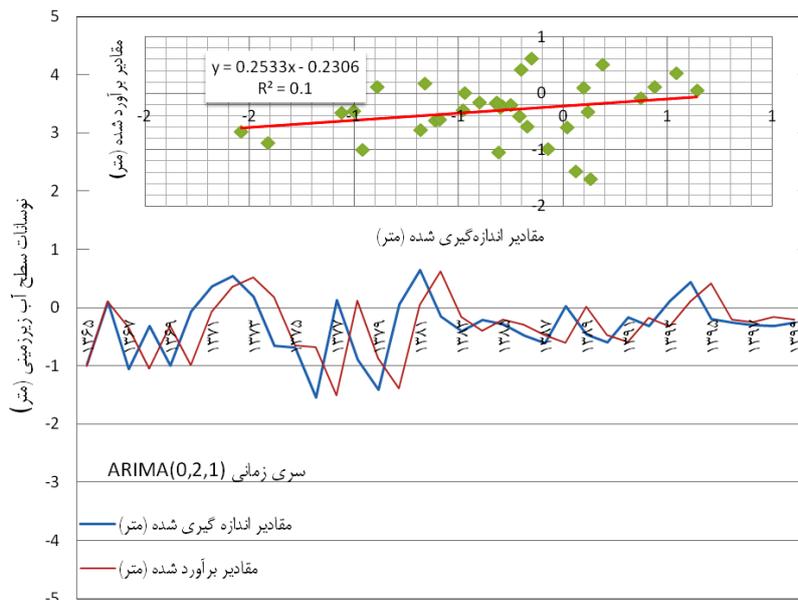
شماره ژن	ساختار درختی	رابطه ریاضی
ژن اول		$Y1 = (((G1C4+d(6))*(d(4)+G1C7)) * (d(4)-d(5)))+d(0))$
ژن دوم		$Y2 = (((d(0)+d(5))+d(5) ^ 5))-(Abs(d(4))+d(1)*d(6)))$
ژن سوم		$Y3 = (((d(2)/G3C7)*(G3C0+d(5)))- (-d(6)))+G3C2)$

$Y=Y1*Y2*Y3$

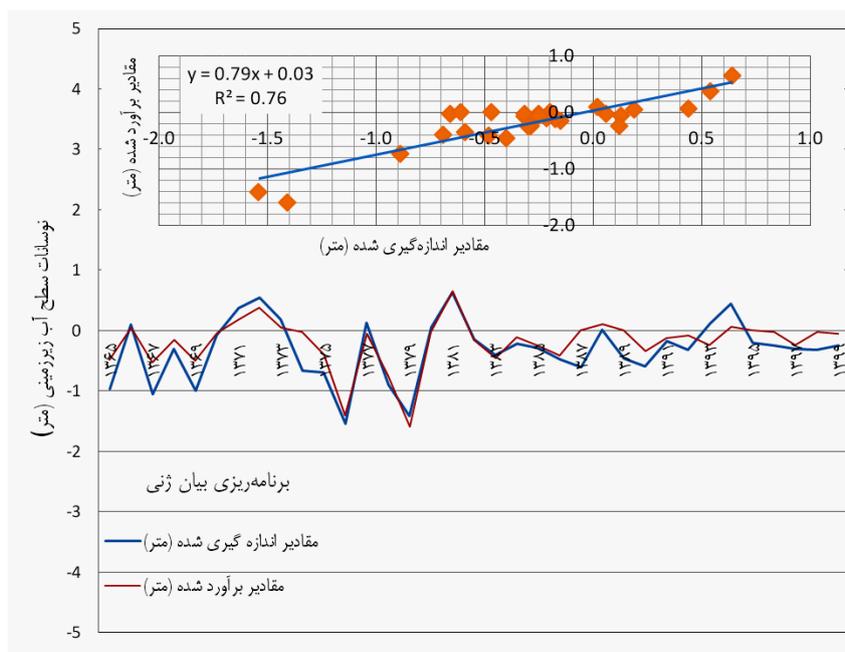
معادله ژنی: در واقع از اتصال سه ژن اول و دوم و سوم با تابع ضربی به دست آمده است.

توضیح:  $G1C4 = -0.22$ ;  $G1C7 = -1.10e-02$ ;  $G3C2 = 4.41e-02$ ;  $G3C7 = 6.78$ ;  $G3C0 = 1.29$

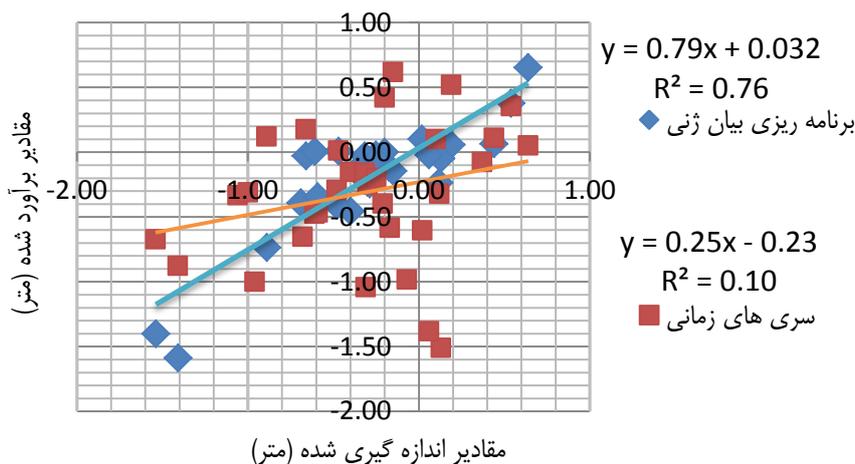
پارامتر C مقدار ثابت داشته و متغیر d در واقع ترمینال یا متغیر ورودی است.



شکل ۵ - تغییرات سطح آب اندازه گیری شده و برآورد شده با مدل های منتخب روش های سری زمانی



شکل ۶ - تغییرات سطح آب اندازه گیری شده و برآورد شده با مدل های منتخب برنامه ریزی بیان ژنی



شکل ۷ - سطح آب اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل‌های منتخب روش‌های سری‌های زمانی و برنامه‌ریزی بیان ژنی

### آینده‌پژوهی نوسانات سطح آب زیرزمینی

مرحله آینده‌پژوهی نوسانات سطح آب زیرزمینی برای ۱۰ سال آینده از ۱۴۰۰ تا ۱۴۱۰ صورت گرفت. این مرحله پس از مرحله مدل‌بندی داده‌ها و آزمون کارایی مدل بود. آینده‌پژوهی نشان داد برای سال‌های پیش‌بینی، روند تغییرات کاهش تجمعی در سال‌ها به صورت افزایشی و به طور تقریب خطی خواهد بود. با فرض تداوم شرایط موجود بهره‌برداری و روند کنونی الگوی مصرف آب زیرزمینی در دشت، برای سال پیش‌بینی ۱۴۱۰، میزان کاهش تجمعی برابر ۱۲/۶ متر (معادل ۲۴۱ میلیون مترمکعب) نسبت به سال پایه ۱۳۶۵ خواهد بود (شکل ۸). در حال حاضر (سال ۱۴۰۰) کاهش تجمعی سطح آب از سال پایه حدود ۱۱/۲ متر است. با توجه به این‌که در طول دوره آماری ۳۳ سال (از سال پایه تا ۱۴۰۰)، سطح آب زیرزمینی همواره روند کاهشی داشته و به‌طور میانگین، هر سال حدود ۳۲ سانتی‌متر از سطح آب زیرزمینی در این دشت کاسته شده است. با همین روند کاهشی انتظار می‌رود میزان کاهش تجمعی تا حدود ۱۴/۴ متر برسد. در حالی که با مناسب‌ترین مدل این میزان ۱۲/۶ متر پیش‌بینی گردیده و میزان تفاوت به احتمال به خطای برآورد با مدل مربوط می‌گردد. در هر حال، برای مدیریت بهینه مصرف این منبع ارزشمند آب، سناریو و شرایط مختلف مصرف نیز پیش‌بینی گردید.

سناریوها شامل ادامه روند بهره‌برداری (بدون برنامه تعدیل)، مصرف منبع آب زیرزمینی با چهار شرایط دیگر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد تعدیل در مصرف آب (با کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی) با شروع از سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹ خواهد بود که در آن صورت تغییرات کاهش حجم آب زیرزمینی در این دشت به صورت شکل ۸ خواهد بود. در صورت صرفه‌جویی به‌اندازه شرایط ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد، در سال ۱۴۱۰ سطح آب زیرزمینی به اندازه ۱۲/۰۰، ۱۱/۳۷، ۱۰/۷۴ و ۱۰/۱۱ متر نسبت به سال پایه افت خواهد داشت. این اندازه افت تجمعی

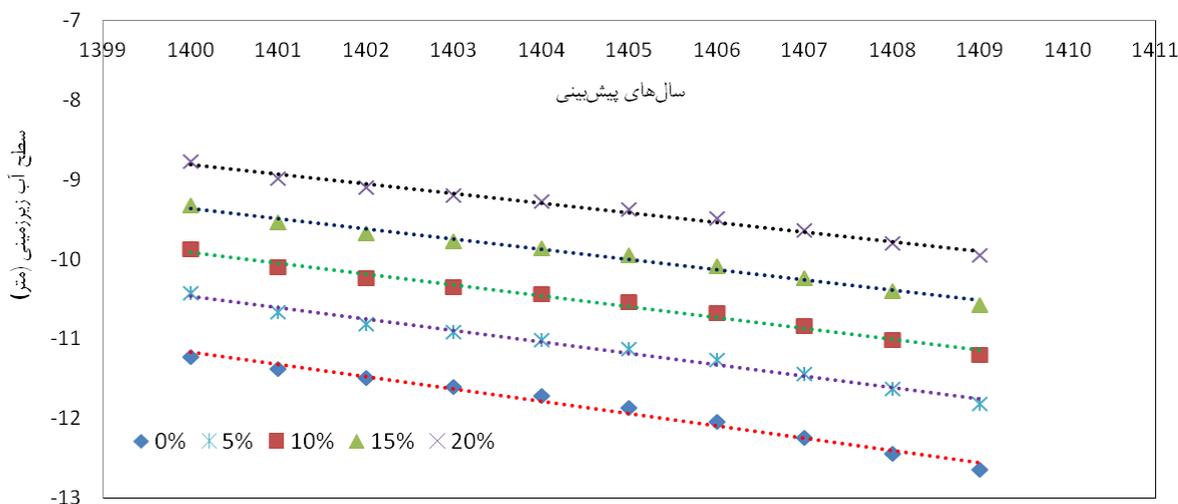
سطح آب زیرزمینی به ترتیب معادل ۲۲۹، ۲۱۷، ۲۰۵ و ۱۹۳ میلیون مترمکعب خواهد بود. به عبارت دیگر با کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی با سناریوهای ۱۵ و ۲۰ درصد در سال ۱۴۱۰، افت سطح آب زیرزمینی حتی نسبت به سال ۱۴۰۰ شرایط نسبتاً مناسب‌تری خواهد داشت. با افزایش بهره‌وری آب در تولید محصولات زراعی و باغی در منطقه می‌توان با کاهش برداشت از آب زیرزمینی، سناریوهای پیشنهادی را اجرایی نمود. تجربیات اخیر نشان داده در حاشیه دریاچه ارومیه می‌توان از راهکارهایی مانند برنامه‌ریزی مناسب آبیاری سطحی و تحت فشار، بهبود الگوی کشت در منطقه، استفاده از گیاهان زراعی و باغی با نیاز آبی کم، تسطیح اراضی زراعی و استفاده از روش‌های آبیاری گیاهان در دوره‌های حساس به تنش کمبود آب نسبت به صرفه‌جویی قابل‌ملاحظه در آب مصرفی کشاورزی در حاشیه دریاچه ارومیه اقدام نمود.

### نتیجه‌گیری

بیش از ۹۵ درصد از نیاز آبی محصولات مختلف زراعی و باغی در دشت شیبستر- به‌عنوان یکی از مناطق مهم کشاورزی استان آذربایجان شرقی- از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. در این پژوهش، نوسانات سطح آب زیرزمینی برای ۳۵ سال گذشته تحلیل شده و برای ۱۰ سال آینده پیش‌بینی گردید. نتایج نشان داد بر اثر بهره‌برداری نامناسب، سطح آب زیرزمینی از سال ۱۳۶۵ تاکنون بیش از ۱۱/۲ متر کاهش داشته است. این میزان افت سطح آب زیرزمینی، علاوه بر تخلیه سفره آب زیرزمینی و افزایش هزینه بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی دشت، به احتمال زیاد موجب خشک شدن مجاری خروجی طبیعی آب‌زیرزمینی مانند مظهر قنات‌ها و چشمه‌ها خواهد شد. با توجه به وابستگی شدید تولید محصولات زراعی و باغی به منابع آب‌های زیرزمینی و احتمال ورود آب شور از نواحی ساحلی

مدیریت بهینه مصرف آب زیرزمینی، سناریوهای مختلف تعدیل و صرفه‌جویی با شروع از سال ۱۴۰۰ در نظر گرفته شد.

دریاچه ارومیه به آبخوان‌ها، احتمال کاهش عملکرد محصولات کشاورزی، شورشیدن بیشتر اراضی کشاورزی در نتیجه کاربرد آب شور، نیازمندی اراضی به آب‌شویی و زهکشی اراضی وجود دارد. برای



شکل ۸- تأثیر سناریوها در تعدیل مصرف آب زیرزمینی دشت شبستر در سال‌های آینده

در صورت تعدیل و صرفه‌جویی به‌اندازه ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد، در انتهای سال هدف (دهم)، کاهش تجمعی سطح آب زیرزمینی نسبت به سال پایه به ترتیب ۱۲/۰، ۱۱/۴، ۱۰/۷، ۱۰/۱۰ متر خواهد بود. بنابراین با کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی با سناریوهای ۱۵ و ۲۰ درصد در سال ۱۴۱۰، افت سطح آب زیرزمینی حتی نسبت به سال ۱۴۰۰ شرایط نسبتاً مناسب‌تری خواهد داشت. مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی، اصلاح الگوی کشت در دشت با رویکرد استفاده از گیاهان با نیازآبی نسبتاً کم، تسطیح اراضی زراعی و استفاده از برنامه‌ریزی مناسب کم آبیاری از راهکارهایی است که می‌تواند افت سطح ایستابی در دشت را تعدیل نماید. ادامه پژوهش با تحلیل مناسب بیان آب زیرزمینی در سال پایه و سال‌های آتی با لحاظ مولفه‌های تغذیه و تخلیه آب زیرزمینی و نیز تحلیل کموگراف و تغییرات کیفی آب زیرزمینی دشت شبستر می‌تواند مفید باشد. تدقیق یافته‌ها با تحلیل تغییرات سطح آب زیرزمینی با فن‌های شبکه عصبی و منطق فازی نیز می‌تواند مفید باشد.

## تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله مؤلف مقاله از سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی برای تهیه امکانات و تأمین اعتبارات لازم برای اجرای این پژوهش سپاسگزاری می‌نماید.

## منابع

- احمدی، ک.، عبادزاده، حاتمی. ف.، عبدشاه، ه.، کاظمیان، آ. ۱۳۹۹. آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷. جلد اول: محصولات زراعی وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات. ۹۷ ص.
- بی‌نام، ۱۳۹۸. بررسی وضعیت منابع آب زیرزمینی کشور. شرکت مدیریت منابع آب ایران، معاونت مطالعات پایه و مدیریت حوضه‌های آبریز، وزارت نیرو. ایران
- چیت‌سازان، م، میرزائی، س. ی. و چینی‌پرداز، ر. ۱۳۸۶. منطقه‌بندی آبخوان شهرکرد با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی. مجله علوم. دانشگاه شهید چمران اهواز. ب: ۱-۱۵.
- حسین‌آبادی، س.، خزیمه نژاد، ح.، و خاشعی سیوکی، ع. ۱۴۰۰. ارزیابی مدل بیان ژن در پیش‌بینی مکانی شوری آب زیرزمینی و مقایسه آن با مدل‌های زمین‌آماری (مطالعه موردی: دشت مشهد). اکوهیدرولوژی. ۸(۳): ۸۵۵-۸۶۶.
- سازمان هواشناسی کشور. ۱۴۰۰. گزارش سالانه. آمار هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک آذربایجان شرقی. ۲۰ ص.
- عزیزی، ا.، رجیبی، ا.، یعقوبی، ب. و شعبانلو، س. ۱۴۰۰. تخمین نوسانات تراز آب زیرزمینی توسط مدل بهینه موجک-

- analysis. International Journal of Applied Science and Engineering Research. 1(2): 238-249.
- Chatfield, C. 1996. The analysis of time series: an introduction. 5th edition. Chapman and Hall. UK.
- Cirkel, D.G., Witte, J.P.M. and van der Zee S.E. 2010. Estimating seepage intensities from groundwater level time series by inverse modelling: A sensitivity analysis on wet meadow scenarios. Journal of hydrology. 385(1-4):132-142.
- Cuthbert, M.O. 2010. An improved time series approach for estimating groundwater recharge from groundwater level fluctuations. Water resources research. 46.9:1-11.
- Fathabadi, A., Salajegheh, A. and Mahdavi M. 2008. Forecasting River discharges by Neuro-Fazy and time series models. Iran-Watershed Management Science & Engineering. 2(5): 21-30.
- Ghahraman, N. and Gharekhani, A., 2011. Evaluation of Stochastic time series models in estimation of pan evaporation: case study in Shiraz station. (1): 75-81.
- Ghorbani, M. A., Khatibi, R., Aytak, A., Makarynsky, O. and Shiri, J. 2010a. Sea Water Level Forecasting Using Genetic Programming and Comparing the Performance with Artificial Neural Networks, Accepted for publication in Computers & Geosciences. 36: 620-627.
- Ghorbani, M. A., Makarynsky, O., Shiri, J., and Makarynska, D. 2010b. Genetic Programming for Sea Level Prediction in an Island Environment, International Journal of Ocean and Climate Systems.1: 27-35.
- Guyen, A. 2009. Linear genetic programming for time-series modeling of daily flow rate. J. Earth Syst. Sci. 118: 157-173.
- Hatch, C.E., Fisher, A.T., Ruehl, C.R. and Stemler, G. 2010. Spatial and temporal variations in streambed hydraulic conductivity quantified with time-series thermal methods. Journal of Hydrology. 389(3-4):276-288.
- Irvine, D.J., Cranswick, R.H., Simmons, C.T., Shanafield, M.A. and Lautz, L.K. 2015. The effect of streambed heterogeneity on groundwater-surface water exchange fluxes inferred from temperature time series. Water Resources Research. 51(1): 198-212.
- Johnson, T.C., Slater L.D., Ntarlagiannis, D., Day-Lewis, F.D. and Elwaseif, M., 2012. Monitoring groundwater-surface water interaction using time-series and time-frequency analysis of transient three-dimensional electrical resistivity changes. Water Resources Research. 48(7).
- برنامه‌نویسی بیان ژن . هیدروژئولوژی. ۶ (۱): ۶۸-۸۳.
- کاوه کار، ش.، قربانی، مع.، اشرف زاده، ا. و دربندی، ص. ۱۳۹۲. شبیه سازی نوسانات تراز آب با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست. ۴۳(۳): ۷۲-۷۹.
- محمد رضا پور، ا.، سراوانی، ز. و سیاستر، ه. ۱۴۰۱. پیش‌بینی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی استان گلستان با مدل‌های هوش مصنوعی. هیدروژئولوژی. ۷ (۲): آماده انتشار.
- مهندسین مشاور جاماب. ۱۳۷۲. طرح جامع آب کشور، سیمای توسعه دشت‌های ایران، حوزه‌های آبریز شمال و آذربایجان. جلد اول، ۲۸۸ ص.
- ناصری، ا. ۱۳۹۸. مقایسه کاربرد چهارده الگوی سری‌های زمانی برای تحلیل و پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت مرند (حاشیه شمالی دریاچه ارومیه). مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳ (۱): ۵۸-۶۸.
- ناصری، ا. ۱۳۸۳. تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی نفوذ و توزیع زمانی مکانی جریان سطحی در آبیاری جویچه‌ای. پایان‌نامه دکتری علوم و مهندسی آبیاری. دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.
- ناصری، ا. و حسن اقلی، ع. ۱۳۹۷. تحلیل تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر با کاربرد الگوی اتورگرسیو تلفیقی میانگین متحرک فصلی (SARIMA). نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران. ۹ (۳۴): ۹۶-۱۰۷.
- ناصری، ا. و ناصر، ا. ۱۴۰۰. پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند با کاربرد روش‌های سامانه استنتاج فازی-عصبی، سری‌های زمانی و رگرسیون. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴ (۶): ۲۱۸۸-۲۲۰۹.
- نور، ح. ۱۳۹۶. ارزیابی روند مصرف آب زیرزمینی و وضعیت کنونی آن در ایران، سامانه‌های سطوح آبیگیر باران. ۵ (۱۵): ۲۹-۳۸.
- نیرومند، ح. ۱۳۷۶. تحلیل سری‌های زمانی، روش‌های یک متغیری و چند متغیری (ترجمه). دانشگاه فردوسی مشهد.
- ویسی‌پور، ح.، معصوم‌پور سماکش، ج. ف.، صحنه، ب. و یوسفی، ی. ۱۳۸۹. تحلیل پیش‌بینی روند بارش و دما با استفاده از مدل‌های سری‌های زمانی (ARIMA) نمونه موردی: شهرستان کرمانشاه. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۸ (۲): ۲۱-۳۰.
- Adhikary, S.K., Rahman, M. and Gupta, A.D. 2012. A stochastic modelling technique for predicting groundwater table fluctuations with time series

- series. Water Resources publications. Littleton, Co.
- Samadianfard, S., Asadi E., Jarhan, S., Kazemi, H., Kheshtgar, S., Kisi, O., Sajjadi, Sh., Abdul Manaf, A. 2018. Wavelet neural networks and gene expression programming models to predict short-term soil temperature at different depths. *Soil & Tillage Research*. 175: 37-50
- Sen, Z. 1998. Small sample estimation of the time average in climate time series. *International Journal of Climatology*. 18: 1725-1732.
- Siadat, H. 2000. Iranian agriculture and salinity. Soil and Water Research Institute of Iran, Tehran, Iran.
- Vandersteen, G., Schneidewind, U., Anibas, C., Schmidt, C., Seuntjens, P. and Batelaan, O. 2015. Determining groundwater-surface water exchange from temperature-time series: Combining a local polynomial method with a maximum likelihood estimator. *Water Resources Research*. 51(2): 922-939.
- Zahedi, M., and Ghavidel Rahimi, Y. 2002. Recognition, classification and forecasting drought in Urmia watershed by time series model of Holt-Winters. *Geographical Space*. 6:19-48.
- Parasuraman, K., Elshorbagy, A. and Carey, S. K. 2007a. Modeling the dynamics of the evapotranspiration process using genetic programming. *Hydrol. Sci. J.* 52: 563-578.
- Parasuraman, K., Elshorbagy, A. and Si, B. C. 2007b. Estimating Saturated Hydraulic Conductivity Using Genetic Programming. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 1676-1684.
- Peterson, R.N., Santos I.R. and Burnett W.C. 2010. Evaluating groundwater discharge to tidal rivers based on a Rn-222 time-series approach. *Estuarine, coastal and shelf science*. 86.2:165-178.
- Rahimi, D. and Gayoor, H. 2010. Analysis of Karoon discharge with Box-Cox transformation and time series. *Geographical Research*. 25(4): 135-151.
- Rakhshandehroo, G.R. and Amiri, S.M. 2012. Evaluating fractal behavior in groundwater level fluctuations time series. *Journal of hydrology*. 464:550-556.
- Rau, G.C., Andersen, M.S. and Acworth R.I. 2012. Experimental investigation of the thermal time-series method for surface water-groundwater interactions. *Water Resources Research*. 48(3).
- Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V.M. and Lane, W.L. 1980. Applied modeling of hydrologic time

## Evaluation of Several models of Genetic Expression Programming and Time Series to Provide Groundwater Balancing Scenarios in Shabestar Plain (East of Urmia Lake)

Abolfazl Nasseri<sup>1\*</sup>

Received: Sep.04, 2022

Accepted: Feb.02, 2023

### Abstract

Groundwater is the main resources of irrigation water for various crops growing in the Iran. Continuous utilization of this resource has led to a significant decline in groundwater level. The optimal and sustainable application of groundwater resources in east the Urmia Lake is essential and important from the view point of water resource management. Quantifying the current and projecting consumption are the first step for the initiation of sustainable utilization of groundwater. Due to the potential of modeling and projecting behavior of phenomena in water engineering, this study aimed to analyze the fluctuation of groundwater level in the east of the Urmia Lake. In this study, groundwater levels for 45 years with methods of genetic expression programming (GEP) and time series (TS) were modeled and evaluated. Groundwater level data during 1986-2021 was applied for modeling and testing; during 2022-2031 applied for future study, respectively. Then, the model of GEP with three genes was recognized as the most appropriate model. Evaluation criterion for optimum model were as RMSE= 0.26, MSE= 0.07, RAE= 0.58, RSE=0.26, RRSE=0.52, r=0.87 and  $R^2= 0.76$ . Results showed that since 1986, the groundwater level was reduced about 11.2 m. Several scenarios for groundwater balancing scenarios starting from 2021 were considered to reduce the effects of the decreasing trend of water level and optimal management of groundwater consumption. Relative to the 1986, the cumulative reduction of the water levels at the end of year 1410 will be 12.6 m in case of current trend of consumption; and 11.4m, 10.7 m, 10.1 m in case of water balancing as 10%, 15% and 20%, respectively. Improving cultivation patterns with crops having relatively low water requirement, leveling of lands and suitable deficit-irrigation scheduling are the solutions that could balance the water levels in the region.

**Keywords:** Genetic expression, Groundwater, Groundwater fluctuations, Shabestar plain, Groundwater Resources, Moving average model.

---

1- Agricultural Engineering Research Department, East Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Tabriz, Iran.

Corresponding Author: E-mail: Nasseri\_ab@yahoo.com