

## مقایسه روش برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه عصبی بیزین در مدل سازی تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت ارومیه)

مرضیه صادقیان آقکندی<sup>۱</sup>، حسین رضایی<sup>۲</sup>، جواد بهمنش<sup>۳</sup> و ندا خان محمدی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه ارومیه

۲- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه

۳- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه

۴- دکترای مهندسی منابع آب دانشگاه ارومیه

marziye.saadeghian@yahoo.com

### خلاصه

اساس برنامه‌ریزی‌های منابع آب بر پایه حجم آب قابل استحصال در آبخوان است و برآورد دقیق این حجم از آب زیرزمینی کمک شایانی به توسعه می‌کند. در این مطالعه، از مدل شبکه عصبی بیزین و روش برنامه‌ریزی بیان ژن برای مدل سازی سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت ارومیه استفاده شده است. در تحلیل حاضر مدل سازی تراز سطح آب زیرزمینی در مقیاس زمانی ماهانه در نظر گرفته شد تا بهترین حالت ممکن جهت مدل سازی انتخاب گردد. مدل سازی‌ها با استفاده از داده‌های تراز آب زیرزمینی دشت ارومیه در دوره زمانی ۱۳۹۴-۱۳۶۰ انجام پذیرفت. کارایی مدل‌ها با استفاده از معیار خطای، ضریب تبیین ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) محاسبه شد. مقایسه مدل‌ها نشان داد که شبکه عصبی بیزین با ضریب تبیین (۰/۹۲۳) و جذر میانگین مربعات خطا (۰/۳۳۷۴) بهترین نتیجه را از داده‌های هیدرو گراف ماهانه تراز آب زیرزمینی نسبت به مدل برنامه‌ریزی بیان ژن داشته است.

کلمات کلیدی: دشت ارومیه، شبکه عصبی بیزین، تراز آب زیرزمینی، برنامه‌ریزی بیان ژن.

### مقدمه

منابع آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین و ارزان‌ترین منابع آب به شمار می‌روند که شناخت صحیح و بهره‌برداری اصولی از آن‌ها می‌تواند در توسعه پایدار فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی یک منطقه، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش به‌سزایی داشته باشد. تاکنون مدل‌ها و روش‌های مختلف در زمینه برآورد سطح آب زیرزمینی و به تبع آن حجم آبخوان ارائه شده است. مدل‌های عددی با روش‌های تفاضل محدود<sup>۱</sup> و اجزای محدود<sup>۲</sup> استفاده از ابزارها و الگوریتم‌های فراکاوی توانسته‌اند تا حدودی عدم قطعیت موجود در برآورد سطح آب زیرزمینی را کاهش دهند. شناسایی رفتار و الگوی تغییرات سطح آب زیرزمینی می‌تواند راهکار مناسبی برای برنامه‌ریزی باشد. برنامه‌ریزی بیان ژن یک فن برنامه‌ریزی خودکار است که راه‌حل مسئله را با استفاده از برنامه‌ریزی کامپیوتر ارائه کرده و عضوی از خانواده الگوریتم تکاملی می‌باشد [1]. در مطالعه‌ای از مدل‌های بیزین با استفاده از دو ساختار خوشه‌بندی و صریح برای شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی آبخوان بیرجند استفاده شد، [2]. در پژوهشی کاربرد شبکه عصبی بیزین را در ایستگاه جاتیسرونو واقع در اندونزی جهت تخمین بارش ساعتی مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که شبکه عصبی بیزین دقت بالا و خطایی ناچیز نسبت به شبکه‌های عصبی مصنوعی دارد [3] بهمنش و مهدی زاده [4] در تحقیقی به تخمین درجه حرارت خاک در مناطق نیمه‌خشک ایران، با سه روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و رگرسیون خطی چند متغیره (MLR) پرداختند و به این نتیجه رسیدند که هر سه روش قادر به مدل‌سازی بوده و از بین آن‌ها شبکه عصبی مصنوعی بهترین پاسخ را می‌دهد. کاوه کار و همکاران در پیش‌بینی نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه، از ساختار درختی برنامه‌ریزی بیان ژن و همچنین از شبکه عصبی مصنوعی در مقیاس زمانی مختلف استفاده شده است.

<sup>1</sup> Finite difference method

<sup>2</sup> Finite element method

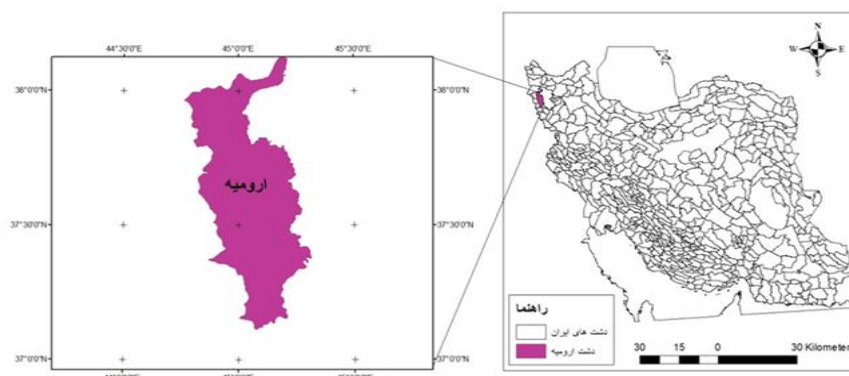
نتایج حاصل، حاکی از دقت مطلوب برنامه‌ریزی بیان ژن در شبیه‌سازی می‌باشد [5]. قزلباش و همکاران در مقایسه عملکرد دو روش برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه عصبی مصنوعی به تخمین ضریب یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که هر دو روش از دقت بالایی در مدل‌سازی برخوردارند. ولی از آنجایی که مدل GEP قادر به ارائه رابطه صریح برای تخمین ضریب یکنواختی است، جنبه کاربردی بیشتری دارد [6]. در مجموع با توجه به پژوهش‌های انجام شده و ذکر این نکته که دشت ارومیه یکی از مهمترین و وسیع‌ترین دشت‌های استان آذربایجان غربی می‌باشد، اهمیت مدل‌سازی و شبیه‌سازی تراز سطح آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه ضروری است. لذا هدف این تحقیق بررسی روش‌های جدید و ارزیابی عملکرد و دقت آنها در مدل‌سازی و پیش‌بینی تراز سطح آب زیرزمینی می‌باشد.

## روش تحقیق

**منطقه مورد مطالعه:** منطقه مورد مطالعه دشت ارومیه با طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۳ دقیقه و ۳۹ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲ دقیقه و ۱۷ ثانیه در شمال غرب ایران با متوسط بارندگی ۲۰۵ در سال دارای اقلیم سرد و خشک است. این دشت با مساحت ۲۶۴۵۱۰/۷۲۷ هکتار در اراضی ساحلی و کم‌شیب ضلع غربی دریاچه ارومیه واقع شده است، دارای دو نوع سفره آزاد و تحت فشار بوده که بیش‌ترین وسعت دشت را سفره آزاد تشکیل می‌دهد. جهت جریان آب زیرزمینی از غرب به شرق می‌باشد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و قرارگیری آن در کنار دریاچه ارومیه، به اهمیت پژوهش و ارزیابی تراز آب‌های زیرزمینی غرب دریاچه ارومیه می‌افزاید. این تغییرات و پایین آمدن سطح آب دریاچه ارومیه تأثیر بسیاری در حرکت آب‌های زیرزمینی داشته و باعث تغییرات فراوانی در کیفیت آب‌های زیرزمینی مناطق مختلف غرب دریاچه ارومیه شده است. به‌منظور انجام مدل‌سازی در این پژوهش، از داده‌های ماهانه ۳۵ سال (۱۳۶۰-۱۳۹۴) تراز آب زیرزمینی هیدروگراف دشت ارومیه در استان آذربایجان غربی استفاده گردیده است. ۲۸ سال (۸۰ درصد داده‌ها) اول این داده‌ها به‌منظور مدل‌سازی و ۷ سال (۲۰ درصد داده‌ها) انتهایی آن برای پیش‌بینی در نظر گرفته شده است. جدول ۱ خصوصیات آماری این داده‌ها را نشان می‌دهد. شباهت خصوصیات آماری داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی بیانگر انتخاب مناسب این دو دوره است. همچنین شکل ۱ موقعیت جغرافیایی دشت ارومیه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌های بکار گرفته شده در تحقیق حاضر

دوره	تعداد داده	میانگین $H_{avg}(m)$	حداقل داده $H_{min}(m)$	حداکثر داده $H_{max}(m)$	انحراف معیار $S_d$	ضریب تغییرات $C_v$
واسنجی	۳۳۶	۱۳۰۲/۱۴۳	۱۲۹۸/۹۸	۱۳۰۳/۹	۰/۹۵۲۷۰	۰/۰۰۰۷۳۱
اعتبارسنجی	۸۴	۱۲۹۹/۴۷۶	۱۲۹۷/۱۷	۱۳۰۱/۱۲	۰/۹۸۲۹۵	۰/۰۰۰۷۵۶
کل	۴۲۰	۱۳۰۱/۶۰۹۵	۱۲۹۷/۱۷	۱۳۰۳/۹۰	۱/۴۳۴۴۳	۰/۰۰۱۱۰۲



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

## شبکه عصبی بیزین

این روش یکی از روش‌های سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری می‌باشد که ابزار قدرتمندی در مدل کردن روابط علی و معلولی در قالب شبکه‌ای از احتمالات است. نکته بسیار مهم در مورد روش شبکه عصبی بیزین این است که این روش به اطلاعات دقیق و تاریخچه کامل یک واقعیت نیاز ندارد بلکه می‌تواند با استفاده از اطلاعات ناقص و غیردقیق نیز به نتایج بسیار قانع‌کننده‌ای در زمینه تخمین وضعیت فعلی یا آینده یک سیستم دست یابد. شبکه بیزین نوع مدل گرافیک احتمالات بین متغیرها و احتمالات به صورت گراف مستقیم و بدون چرخه در ارتباط است. مبنای این روش احتمالات وابسته (تئوری بیز) است که توماس بیز در قرن هجده بنا گذاشته است. لاپلاس این تئوری را گسترش داد و منطق تئوری احتمالات را تعیین کرد. اگر E و F دو رویداد مفروض باشند؛ به گونه‌ای که  $P(F) \neq 0$  و  $P(E) \neq 0$  باشند؛ آنگاه داریم:

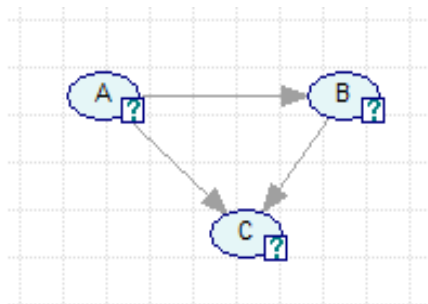
(۱)

$$P(E|F) = \frac{P(F|E)P(E)}{P(F)}$$

شبکه‌های بیزین امکان محاسبات روبه‌جلو و رو به عقب را برای تحلیلگر ایجاد می‌کنند. در واقع، نه تنها از تجمیع وضعیت پارامترهای علت می‌توان به وضعیت معلول رسید، بلکه در این روش با در اختیار داشتن وضعیت معلول یا همان پارامتر پیش‌بینی شده، با فرایند بازگشت به عقب، امکان محاسبه وضعیت عوامل تأثیرگذار وجود دارد به بیان دیگر می‌توان تعیین کرد که میزان تأثیرگذاری هر عامل بر خروجی نهایی چقدر خواهد بود. استفاده از شبکه بیزین با توجه به رویکرد احتمالات برای مدل‌سازی عدم قطعیت کاربرد قوی دارد. شبکه بیزین از مجموعه گره‌های متصل به هم تشکیل شده است که دو حالت وقوع و عدم وقوع هر فرایند را بررسی می‌کنند. مطابق شکل متغیرهای A و B نقش مهمی در پیش‌بینی با وقوع متغیر وابسته C دارند. A و B علت وقوع C هستند و افزایش یا کاهش آن، معلول آن دو است. همچنین متغیر B خود وابسته به متغیر A است. احتمال توأم آن‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید

(۲)

$$P(A, B, C) = P(A).P(B|A).P(C|A, B)$$



شکل ۲- نمونه ساده‌ای از شبکه بیزین

شبکه بیزین در دهه اخیر در مطالعات مختلف به دلیل سرعت زیاد، نمایش گرافیکی، قرار نداشتن حداقل برای داده‌ها، سادگی در به کارگیری، ترکیب منابع مختلف داده و مدیریت عدم قطعیت‌ها رشد رو افزونی داشته است. به منظور مدل‌سازی برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با توجه به ساختارهای آموزش موجود سناریوهای مختلفی طرح‌ریزی می‌شود که مبنای نتایج نهایی طرح است. طرح‌ریزی سناریوها بر اساس متغیرهای ورودی به شبکه بیزین به صورت صریح و خوشه‌بندی تقسیم‌بندی شد. در ورود داده‌ها به مدل بیزین در حالت صریح از تابع توزیع احتمال داده‌ها طی بازه زمانی مدل‌سازی استفاده می‌شود و با توجه به احتمال رخداد فرایند مقدار موردنظر پیش‌بینی می‌شود. خوشه‌بندی یکی از شاخه‌های یادگیری بدون نظارت است و فرایند خودکاری است که طی آن نمونه‌ها به دسته‌هایی تقسیم می‌شوند که اعضای آن مشابه یکدیگرند؛ به این دسته‌ها خوشه گفته می‌شود. دو الگوریتم  $PC^1$  و  $NPC^2$  با توجه به سادگی، بیشترین استفاده را در آموزش شبکه بیزین برای آموزش ساختار مدل‌سازی دارند. در این مطالعه از الگوریتم PC برای آموزش در شبکه‌های بیزین بر اساس طرح اسپیرت<sup>۳</sup> با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری مبتنی بر محدودیت عمل می‌کند. ایده اصلی در این الگوریتم استخراج مجموعه‌ای از استقلال و وابستگی عبارات شرطی توسط آزمون‌های آماری است که در آن استقلال

<sup>1</sup> Path condition

<sup>2</sup> Necessary path condition

<sup>3</sup> Spirites

شرطی بین هر جفت متغیر وجود ندارد و جهت کمان‌ها بر اساس استقلال شرطی تعیین می‌شود. پس از نهایی شدن ساختار شبکه بیزین برای محاسبه احتمال سطح آب زیرزمینی با احتمال مشخص به آموزش پارامترهای مدل و در واقع استخراج جداول احتمال شرطی متغیرهای مختلف موجود در شبکه با استفاده از داده‌های موجود پرداخته می‌شود که در پایگاه داده‌های کالیبراسیون تنظیم شده‌اند. در این پژوهش، برای آموزش پارامترها از الگوریتم PC استفاده شده است. این روش ابزاری منعطف برای تخمین بیشینه احتمال در مسائل مختلف شامل داده‌های ناقص ارائه می‌دهد. در این الگوریتم فرایند آموزش احتمالات شرطی بین متغیرها با استفاده از داده‌های ورودی مشاهدات انجام می‌گیرد؛ برای به کارگیری روش شبکه بیزین از نرم‌افزار GenIE 2.0 استفاده گردید.

## برنامه‌ریزی بیان ژن

روش برنامه‌ریزی بیان ژن، در سال 1999 توسط فریرا<sup>۱</sup> ارائه شد [7] این روش ترکیبی از روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و الگوریتم ژنتیک بوده که در آن، کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، مشابه با آنچه در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت، مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک، ترکیب می‌شوند. از آنجایی که در این روش تمام ساختارهای شاخه‌ای با اندازه شکل‌های متفاوت، در کروموزوم‌های خطی با طول ثابت کدگذاری می‌شوند، معادل این است که در این روش فنوتیپ و ژنوتیپ از هم جدا می‌شوند و سیستم می‌تواند از تمام مزایای تکاملی به سبب وجود آن‌ها بهره‌مند شود. اکنون با وجود اینکه فنوتیپ در برنامه‌ریزی بیان ژن، همان نوع از ساختار-های شاخه‌ای مورد استفاده در برنامه‌ریزی ژنتیک را شامل می‌شود، اما ساختارهای شاخه‌ای که به وسیله برنامه‌ریزی بیان ژن استخراج می‌شوند (که بیان درختی<sup>۲</sup> نیز نامیده می‌شود) مبین تمامی ژنوم‌های مستقل هستند به طور خلاصه می‌توان گفت در برنامه‌ریزی بیان ژن بهسازی‌ها در یک ساختار خطی اتفاق افتاده و سپس به صورت ساختار درختی بیان می‌شود و این موجب می‌شود تنها ژنوم اصلاح شده به نسل بعد منتقل شده و نیازی به ساختارهای سنگین برای تکثیر و جهش وجود نداشته باشد [8]. در این روش پدیده‌های مختلف با استفاده از مجموعه‌ای از توابع و مجموعه‌ای از ترمینال‌ها، مدل‌سازی می‌شوند. مجموعه توابع معمولاً شامل توابع اصلی حسابی {+, -, ×, /}، توابع مثلثاتی یا هر نوع تابع ریاضی دیگر {log, exp, x2, √}، {sin, cos, ...} یا توابع تعریف شده توسط کاربر است که معتقد است، می‌تواند برای تفسیر مدل مناسب باشند. مجموعه ترمینال‌ها، از مقادیر ثابت و متغیرهای مستقل مسئله تشکیل شده‌اند [8] برای به کارگیری روش برنامه‌ریزی بیان ژن از نرم‌افزار GenXproTools 4.0 استفاده گردید.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای به کار گرفته شده در مدل GEP

مقدار	پارامتر
۳۰	تعداد کروموزوم‌ها
۷	اندازه سر
۳	تعداد ژن در هر کروموزوم
Addition (جمع)	تابع پیوند
RMSE	معیار خطای تابع برازش

## نتایج و بحث

داده‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر شامل مقادیر تراز آب زیرزمینی دشت ارومیه می‌باشد که طی یک دوره ۳۵ ساله، از سال ۱۳۶۰ تا ۱۳۹۴ و با اختصاص ۸۰ درصد اول داده‌ها (۲۸ سال) برای دوره آموزش و ۲۰ درصد داده‌ها (۷ سال) انتهایی آن برای دوره آزمون به عنوان ورودی به مدل‌ها در نظر گرفته شده است.

مقدار عددی معیارهای مورد نظر برنامه‌ریزی بیان ژن بکار گرفته در تحقیق حاضر در جدول (۲) نشان داده شده است. از مدل شبکه عصبی بیزین با الگوریتم PC جهت آموزش شبکه، آستانه گسستگی ۲۰ و حداکثر اندازه همسایگی ۸ در سطح معنی دار ۹۵ درصد بهره برده شده است. جدول (۳)

<sup>1</sup> ferreira

<sup>2</sup> Expression tree structure

مقادیر مربوط به هر یک از شاخص‌های آماری مربوط به دو مدل پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی را در دوره آزمون نشان می‌دهد. برای ارزیابی مدل‌ها از نمایه‌های ضریب تبیین ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بهره برده شده است.

(۳)

$$R^2 = \frac{\sum (X_O - \bar{X}_O) (X_P - \bar{X}_P)}{\sqrt{\sum (X_O - \bar{X}_O)^2 + \sum (X_P - \bar{X}_P)^2}}$$

(۴)

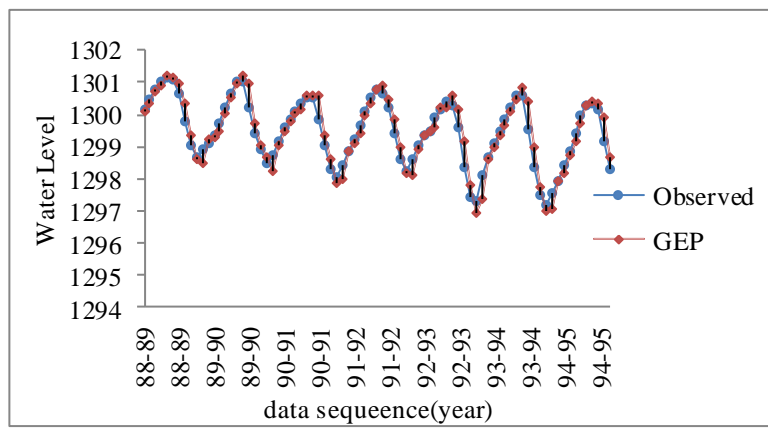
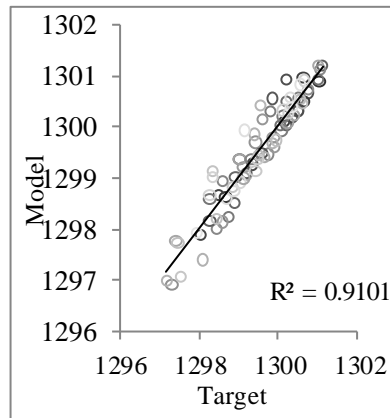
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_O - X_P)^2}{n}}$$

در روابط فوق،  $X_O$  مقدار مشاهده‌ای،  $X_P$  مقدار پیش‌بینی شده،  $\bar{X}_O$  میانگین مقادیر مشاهده‌ای،  $\bar{X}_P$  میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد. در شکل (۵) ساختار درختی پیش‌بینی سطح تراز آب زیرزمینی دشت ارومیه در مقیاس زمانی سه‌ماهه که به‌عنوان مدل بهینه انتخاب گردید، نشان داده شده است.

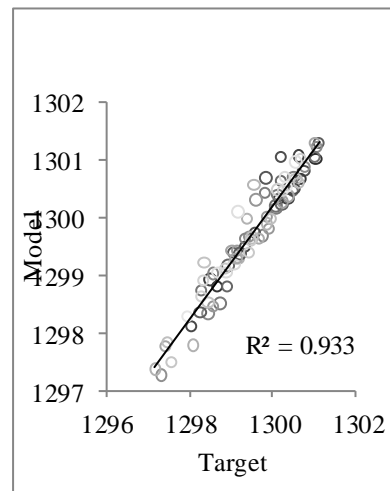
جدول ۳- مؤلفه‌های آماری مربوط به دو مدل پیش‌بینی تراز سطح آب زیرزمینی در دوره آزمون

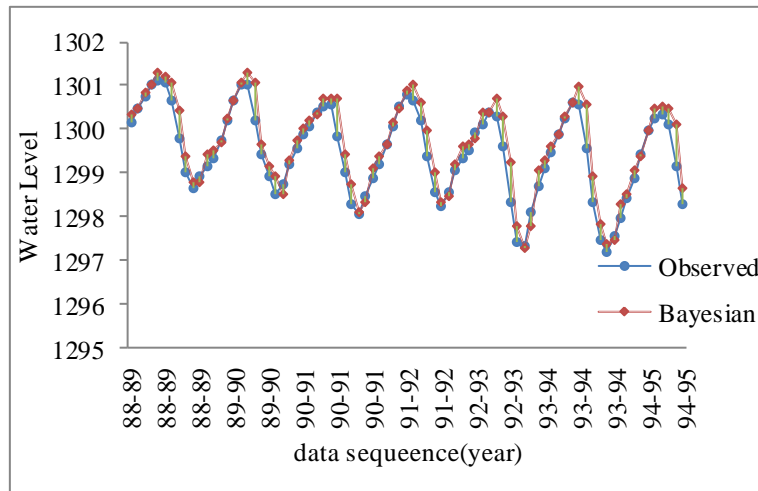
شبکه عصبی بیزین		برنامه‌ریزی ژنتیک		ورودی مدل
RMSE(m)	$R^2$	RMSE(m)	$R^2$	
0.5131	0.7425	0.518	0.736	$H(t) = f\{h(t-1)\}$
0.3854	0.926	0.350	0.889	$H(t) = f\{h(t-1), h(t-2)\}$
<b>0.3374</b>	<b>0.923</b>	<b>0.322</b>	<b>0.910</b>	$H(t) = f\{h(t-1), h(t-2), h(t-3)\}$
0.2984	0.9298	0.387	0.880	$H(t) = f\{h(t-1), h(t-2), h(t-3), h(t-4)\}$
0.2925	0.9283	0.485	0.751	$H(t) = f\{h(t-1), h(t-2), h(t-3), h(t-4), h(t-5)\}$

شکل‌های (۳) و (۴) مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی سطح تراز آب زیرزمینی را درحالی‌که از داده‌های آماری در طی سه ماه قبل به‌عنوان ورودی مدل استفاده گردد، نشان می‌دهند. با توجه به جدول (۲) و شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) می‌توان دریافت که هر دو مدل از دقت قابل قبولی برخوردارند و لذا می‌توان آن‌ها را در پیش‌بینی و مدل‌سازی سطح تراز آب زیرزمینی بکار بست. از سوی دیگر مدل‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی بیان ژن دارای ارجحیت نسبی در مقایسه با سایر مدل‌ها می‌باشند و آن عبارت از ارائه یک روش حل صریح بین مؤلفه‌های ورودی و خروجی مدل می‌باشد. به‌بیان‌دیگر، برنامه‌ریزی بیان ژن قادر به ارائه معادله تقریبی موجود بین ورودی‌ها و خروجی مدل و ساختار درختی بهینه می‌باشد (شکل ۶) و این ویژگی، آن را از سایر مدل‌ها نظیر شبکه عصبی بیزین متمایز می‌سازد.

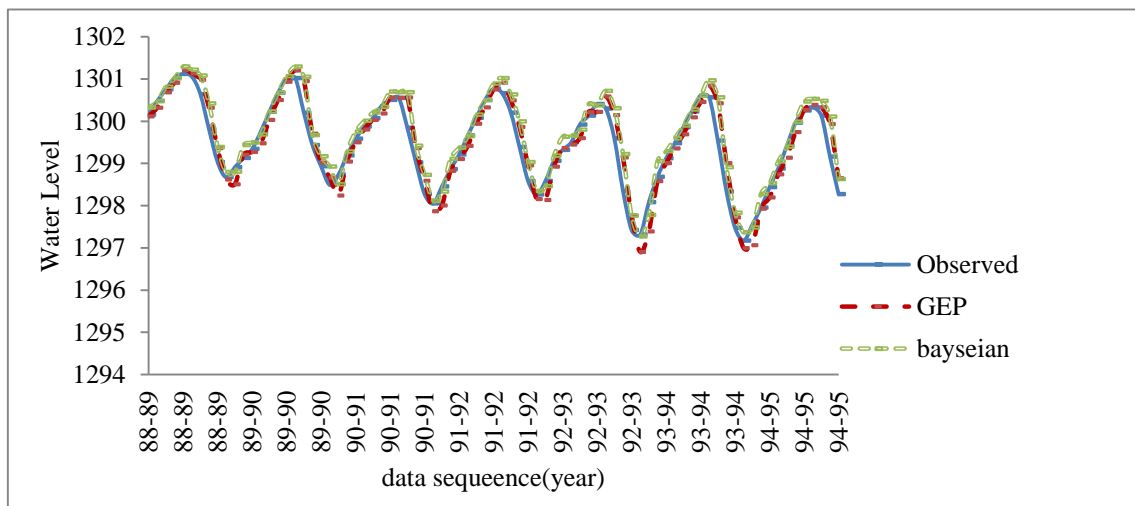


شکل ۳- دیاگرام پراکنش و نمودار مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده سطح آب زیرزمینی (متر) با کاربرد مدل GEP.





شکل ۴- دیاگرام پراکنش و نمودار مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده سطح آب زیرزمینی (متر) با کاربرد مدل شبکه عصبی بیزین



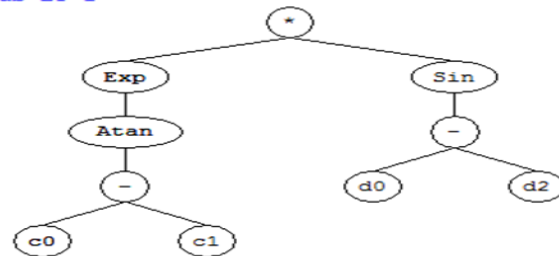
شکل ۵- دیاگرام مقایسه ای داده های مشاهداتی در مقابل بینه ترین مدل شبکه عصبی بیزین و برنامه ریزی بیان ژن برای داده های ثبت شده بخش آزمون

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی بر آن شد که عملکرد مدل‌ها جهت پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در دشت ارومیه با استفاده از داده‌های ماهانه مورد ارزیابی قرار گیرد. مقادیر تراز سطح آب مشاهداتی با تراز سطح آب پیش‌بینی شده در مدل‌های مذکور با استفاده از معیارهای ارزیابی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود: نتایج نشان داد که در هر دو روش ساختاری که در آن ورودی مدل در ۳ تأخیر زمانی تشکیل شده، از دقت قابل قبولی برخوردار است. همچنین با توجه به معیارهای ارزیابی نتیجه شد که هر دو روش مورد بررسی، می‌توانند با دقت نسبتاً بالایی میزان تراز آب زیرزمینی را پیش‌بینی نمایند. در این میان، مدل شبکه عصبی بیزین با توجه به خطای کمتر و نیز استفاده از قانون بیز جهت بینه‌سازی پارامترهای تنظیم و اضافه شدن مجموع مربعات وزن‌ها در تابع هدف عملکرد بهتری نسبت به مدل برنامه‌ریزی بیان ژن از خود نشان داده است. همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، بیشترین اختلاف مدل‌های GEP و BNN در مقادیر حداقل و حداکثر تراز آب زیرزمینی می‌باشد و مدل BNN توانسته است مقادیر حداکثر و حداقل را با خطای کمتری نسبت به مدل GEP برآورد نماید. در مدل GEP مقادیر تراز آب

زیرزمینی بیشتر از مقدار مشاهده شده است. با توجه به اینکه در طرح‌های آبی مقدار حداکثر و حداقل تراز سطح آب زیرزمینی مبنای محاسبات ظرفیت طراحی سیستم‌های ذخیره، انتقال و پخش آب می‌باشد، پیش‌بینی حداکثر و حداقل تراز آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

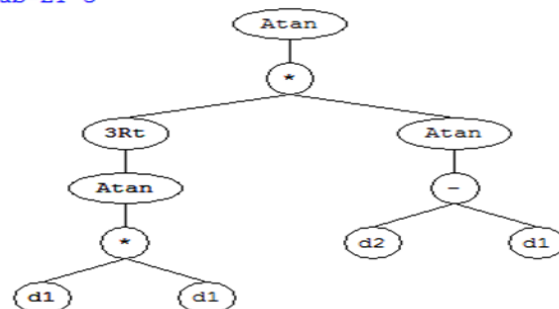
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



شکل ۶- بیان درختی GEP

## مراجع

۱. قربانی، م. ع و صالحی ا. ۱۳۹۰. استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن در بررسی تغییرات داده‌های کیفی آب زیرزمینی با نوسانات سطح آب در دشت برخوردار اصفهان. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران.
۲. کاردان مقدم، ح و روزبهانی، ع. ۱۳۹۴. ارزیابی مدل شبکه‌های بیزین در پیش‌بینی ماهانه سطح آب زیرزمینی ( مطالعه موردی: آبخوان بیرجند). مدیریت آب و آبیاری، دوره ۵، شماره ۲، ص: ۱۵۱-۱۳۹.
3. Fithriasari, K. N. Brodjol, U. Sutikno, H.Kuswanto. 2013. Prediction of Hourly Rainfall using Bayesian Neural Network with Adjusting Procedure. The Third Basic Science International Conference.



4. Behmanesh, J. Mehdizadeh, S. 2017. Estimation of soil temperature using gene expression programming and artificial neural networks in a semiarid region. *Environ Earth Sci* 76:76. 1-15.
۵. کاوه کار، ش. قربانی، م.ع. اشرف زاده، ا و دربندی، ص. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی نوسانات تراز آب با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن. نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، جلد ۴۲، شماره ۳، ص ۷۵:۶۹.
6. Ferreira, C. 2001. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *Complex Systems*, 13(2): 87-129.
۷. قربانی، م.ع و دهقانی، ر. ۱۳۹۵. کاربرد شبکه‌های عصبی بیزین، ماشین بردار پشتیبان و برنامه‌ریزی بیان ژنی در تحلیل بارش رواناب ماهانه (مطالعه موردی: رودخانه کاکا رضا). علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی - پژوهشی)، جلد ۳۹، شماره ۲، ص: ۱۳۸-۱۲۵.
۸. قزلباش، ز. ذاکری نیا، م. هزارجریبی، ا و دهقانی، ا.ا. ۱۳۹۳. مقایسه عملکرد دو روش برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه عصبی مصنوعی به منظور تخمین ضریب یکنواختی توزیع آب در آبیاری بارانی. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک جلد بیست و یکم، شماره ششم، ص: ۱۱۴-۹۵.