

شبیه‌سازی نوسانات تراز آب با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن

شهاب کاوه کار^۱، محمدعلی قربانی^{۲*}، افشین اشرف‌زاده^۳ و صابره دربندی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

^۲ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

^۳ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان

^۴ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

چکیده

دریاچه ارومیه به عنوان یکی از بزرگ‌ترین دریاچه‌های ایران، مقصد نهایی مجموعه‌ای از رودخانه‌های شمال غرب کشور است. با توجه به تغییرات زیاد بارندگی و همچنین تغییرات دمای هوا، تراز آب نوسانات زیادی داشته است. آگاهی از این نوسانات در بررسی مسائل مرتبط، از جمله ریسک‌پذیری تأسیسات و سازه‌های وابسته، تغییرات ذخیره آبی دریاچه، ساخت و سازه‌های ساحلی، محیط زیست و بسیاری از عوامل دیگر اهمیت دارد. روش‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌ریزی بیان ژن برای پیش‌بینی سطح آب دریاها کاربرد دارند. ساختار درختی کرموزوم‌ها در روش برنامه‌ریزی بیان ژن، این الگوریتم را به ابزاری قوی و مناسب برای حل مسائل مدل‌سازی تبدیل می‌کند. در تحلیل حاضر از ساختار درختی برنامه‌ریزی بیان ژن و همچنین از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب در مقیاس‌های زمانی مختلف در نه ترکیب متفاوت، شامل مقادیر نوسانات تراز آب یک تا نه روز قبل به صورت ورودی در نظر گرفته شد تا بهترین حالت ممکن جهت پیش‌بینی انتخاب و ساختار درختی مدل بهینه معرفی گردد. پیش‌بینی‌ها با استفاده از داده‌های نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه انجام پذیرفت و تراز سطح آب در دوره زمانی آذر ۱۳۷۵ تا آذر ۱۳۸۶ برای شبیه‌سازی به کار گرفته شد. نتایج حاصل، حاکی از دقت مطلوب برنامه‌ریزی بیان ژن در شبیه‌سازی نوسانات سطح آب می‌باشد و مدل‌های درختی حاصل، شامل سه زیر درخت (ژن) در مقیاس روزانه در جدولی ارائه شده است.

واژگان کلیدی: برنامه‌ریزی بیان ژن، دریاچه ارومیه، ساختار درختی، شبکه عصبی مصنوعی، نوسانات سطح آب.

۱- مقدمه

مصنوعی نیز قادرند هر تابع ریاضی غیر خطی را به صورت تقریب معینی در آورند و این خاصیت سبب می‌شود که پیش‌بینی سطح آب با استفاده از این شبکه‌ها به خوبی انجام شود [۱]. برنامه‌ریزی ژنتیک جزء الگوریتم‌های فراکاوشی محسوب می‌شود که مبنای تمامی آن‌ها بر اساس نظریه تکامل داروین استوار است. الگوریتم‌های یاد شده اقدام به تعریف یک تابع هدف در قالب معیارهای کیفی نموده و سپس تابع یاد شده را برای اندازه‌گیری و مقایسه روش‌های مختلف حل، در یک فرآیند گام به گام تصحیح ساختار داده‌ها به کار می‌گیرند و در نهایت، روش حل مناسب را ارائه می‌نمایند.

پژوهش Khu و همکاران [۲] در مورد پیش‌بینی رواناب در حوضه اورگوال فرانسه، Liong و همکاران [۳] روی بارش- رواناب و بررسی پدیده حمل رسوب توسط Aytac و همکاران [۴] از جمله تحقیقاتی هستند که با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک انجام شده و برتری آن نسبت به سایر روش‌ها به اثبات رسیده است.

Alvisi و همکاران [۵] اقدام به پیش‌بینی سطح آب با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی نموده

مطالعه نوسانات تراز آب دریاچه‌ها از دیرباز مورد توجه متخصصان و دانشمندان علوم مختلف بوده است. چرا که مدیریت اراضی خط ساحلی جهت ساخت و ساز و کشاورزی، حمل و نقل آبی، مدیریت سفره‌های آب زیرزمینی منطقه، اکولوژی منطقه، مسائل زیست‌محیطی، تعیین حجم آب موجود در دریاچه به شکلی متأثر از نوسانات تراز آب دریاچه‌ها است. دریاچه ارومیه که یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین دریاچه‌های ایران می‌باشد از این امر مستثنی نیست. تغییرات بارندگی و دمای هوا، ساخت سدهای متعدد در منطقه و بسیاری از عوامل دیگر سبب ایجاد نوسانات زیاد در تراز سطح آب و خط ساحلی آن گردیده است. از این‌رو رسیدن به یک تخمین قابل قبول از روند نوسانات در آینده بر اساس کلیه این عوامل با استفاده از روش‌های نوین و به روز دنیا امری اجتناب‌ناپذیر است. به منظور بررسی و پیش‌بینی نوسانات سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها می‌توان از روش‌های مختلفی نظیر الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی، برنامه‌ریزی ژنتیک و ... بهره برد. شبکه‌های عصبی

این دریاچه حدود ۶ متر و وسعت آن نیز معادل ۵۵۰۰ کیلومتر مربع تخمین زده می‌شود که در این صورت حجم آب آن معادل ۳۳ میلیارد متر مکعب خواهد بود.

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌های به کار گرفته شده در

تحقیق حاضر

| | |
|--------------|----------|
| تعداد | ۴۲۰۷ |
| میانگین | ۱۲۷۴/۵۱۱ |
| انحراف معیار | ۱/۵۶۹ |
| حداکثر | ۱۲۷۷/۷۷ |
| حداقل | ۱۲۷۲/۵۵ |
| ضریب تغییرات | ۰/۰۱۲۳ |

۳- برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

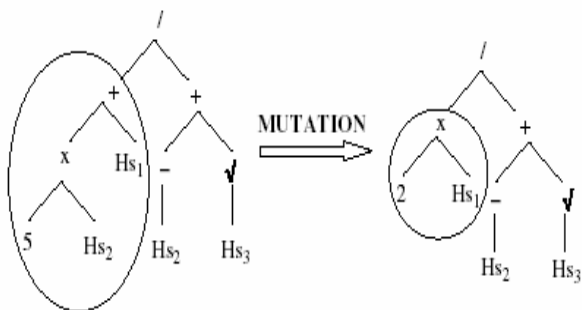
این روش جزء روش‌های الگوریتم‌گردشی محسوب می‌شود که مبنای تمامی آن‌ها بر اساس نظریه تکامل داروین استوار است. الگوریتم‌های یاد شده اقدام به تعریف یک تابع هدف در قالب معیارهای کیفی نموده و سپس تابع یاد شده را برای اندازه‌گیری و مقایسه روش‌های مختلف حل، در یک فرآیند گام به گام تصحیح ساختار داده‌ها به کار می‌گیرند و در نهایت، روش حل مناسب را ارائه می‌نمایند. برنامه‌ریزی بیان ژن جدیدترین شیوه از بین روش‌های الگوریتم‌گردشی می‌باشد که به دلیل دارا بودن دقت کافی، به عنوان مرسوم‌ترین شیوه بوده و از کاربرد بیشتری برخوردار است. زمینه اصلی برنامه‌ریزی بیان ژن، همان الگوریتم ژنتیک است، با این تفاوت که در این روش از شاخه‌های مجزا به جای نوارهای بیت استفاده می‌شود. هر شاخه نیز از یک مجموعه پایانه‌ها (متغیرهای مسأله) و مجموعه توابع (عملگرهای اصلی) تشکیل می‌شود [۱۱]. فرآیند گام به گام برنامه‌ریزی بیان ژن به صورت مراحل زیر است:

- ۱) یک جمعیت اولیه از توابع مرکب نشان دهنده مدل‌های پیش‌بینی، به صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شود،
- ۲) هر یک از افراد جمعیت مذکور با استفاده از توابع برازش، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند،
- ۳) در هر تولید، مراحل زیر برای انتخاب یک جمعیت جدید دنبال می‌شود:
 - الف) یکی از عملگرهای عبور، جهش و کپی انتخاب می‌شود.
 - ب) تعداد مناسبی از افراد جمعیت حاضر انتخاب می‌شوند.
 - ج) از عملگر انتخابی برای تولید فرزند استفاده می‌شود.

و بدین نتیجه دست یافتند که در مواردی که از اطلاعات ورودی دقیق‌تری استفاده به عمل آید، دقت روش شبکه عصبی مصنوعی نسبت به منطق فازی بیشتر خواهد بود. Rahmstorf [۶] اقدام به ارائه یک روش نیمه‌تجربی جهت پیش‌بینی نوسانات سطح آب دریاها بر اساس تغییرات درجه حرارت کره زمین نمود. Makarynskyy و همکاران [۷] با پیش‌بینی نوسانات سطح آب اقیانوس در استرالیا بدین نتیجه دست یافتند که استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی سبب حصول مقادیر واقعی‌تری می‌گردد. Ustoorkar و Deo [۸] با بکارگیری ساختار درختی برنامه‌ریزی بیان ژن در تخمین داده‌های ناقص مربوط به ارتفاع امواج در خلیج مکزیک دریافتند که این ساختار از دقت بسیار مطلوبی در پیش‌بینی داده‌های مربوط به سری‌های زمانی برخوردار است. قربانی و همکاران [۹] پیش‌بینی نوسانات تراز آب در بندر هیلاری استرالیا را با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار دادند که ساختار درختی برنامه‌ریزی ژنتیک برای تمام مقیاس‌های زمانی نسبت به شبکه‌های عصبی از دقت بالایی برخوردار بود. قربانی و همکاران [۱۰] تغییرات ۱۲ و ۱۴ ساعتی سطح دریا را با استفاده از داده‌های تراز آب ۱۲ الی ۱۲۰ ساعت قبل و با بکارگیری مدل‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی در جزایر کوکوس واقع در اقیانوس هند پیش‌بینی نمودند. نتایج نشان داد که ساختار درختی برنامه‌ریزی بیان ژن می‌تواند به طور موفقیت‌آمیزی جهت پیش‌بینی تغییرات سطح دریا به کار رود. هدف از تحقیق حاضر مدل‌سازی نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه با استفاده از ساختار درختی برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه نتایج حاصل با داده‌های مشاهداتی و نتایج حاصل از کاربرد دو روش مذکور و ارائه ساختار درختی مدل بهینه جهت شبیه‌سازی نوسانات تراز آب می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر بر اساس نوسانات روزانه تراز آب دریاچه ارومیه از تاریخ ۱۳۷۵/۹/۱۱ تا ۱۳۸۶/۹/۱۰ انجام گرفته است. اندازه‌گیری‌ها در فواصل زمانی روزانه از سال ۱۳۷۵ تا آذر سال ۱۳۸۶ صورت گرفته است. جدول (۱) مشخصات آماری داده‌های به کار رفته در این تحقیق را نشان می‌دهد. حوضه آبریز دریاچه ارومیه در بخش شمال غرب ایران بین مدارهای ۴۰" و ۳۵° درجه‌ی شمالی تا ۲۹" و ۳۸° و نصف‌النهار ۱۳" و ۴۴° شرقی تا ۵۳" و ۴۷° قرار گرفته است. ارتفاع سطح آب دریاچه ارومیه، حدود ۱۲۷۴ متر از سطح آزاد دریاست. عمق متوسط



شکل ۳- جهش

حال با توجه به مراحل چهارگانه فرآیند برنامه‌ریزی بیان ژن که در بخش قبل مورد بررسی قرار داده شد، روند حل برنامه نشان داده شده در شکل (۱) به صورت زیر خواهد بود:

تولید نسل: حال یک جمعیت از درخت‌های نشان دهنده برنامه به صورت اولیه تشکیل گردیده و فرآیند ژنتیک بر روی این درختان عمل می‌نماید تا افراد جامعه با کمک سری پایانه‌ها (T) و سری توابع (F) تولید شوند. بر این اساس برای شکل (۱) می‌توان نوشت:

$$F \subseteq \{-, +, \sqrt{\quad}, / \}$$

$$FT \subseteq \{H_{S3}, 3, H_{S1}, H_{S2}\}$$

به منظور تولید یک درخت تصادفی بایستی به نحوی اقدام به گزینش تصادفی از مجموعه نمود تا تمامی شاخه‌ها به پایانه‌ها منتهی شوند.

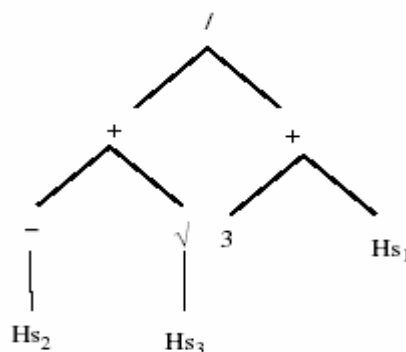
تلاقی: از درون برنامه اخیر اقدام به انتخاب دو گره تصادفی (والد) گردیده و سپس زیر درخت‌های حاصل شده از دو والد تعویض می‌گردند و بدین ترتیب یک برنامه جدید نظیر آن چه در شکل (۲) دیده می‌شود به دست می‌آید.

جهش: یک زیر درخت به طور تصادفی با یک زیر درخت دیگر جابه‌جا می‌شود (شکل (۳)).

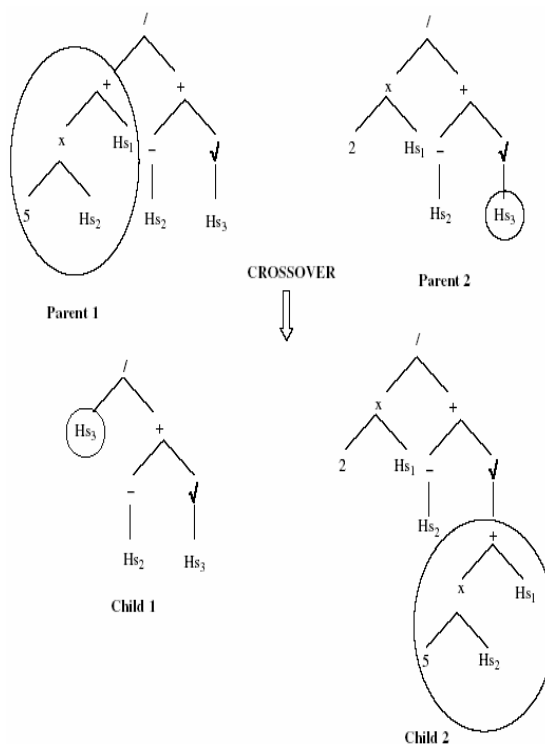
تولید مثل: این مرحله به معنی اجرای مجدد برنامه است و این امر در صورتی انجام می‌پذیرد که معیارهای برازش، صحت برنامه را تأیید نمایند.

(د) فرزند یاد شده در یک جمعیت جدید وارد می‌شود.
(ه) مدل مورد نظر با استفاده از برازش‌های مختلف مورد ارزیابی واقع می‌شود.

(۴) گام سوم تا نیل به حداکثر تعداد تولید، تکرار خواهد شد. در این روش در ابتدای فرآیند هیچ‌گونه رابطه تابعی در نظر گرفته نشده و این روش قادر به بهینه‌سازی ساختار مدل و مؤلفه‌های آن می‌باشد. کاربرد برنامه‌ریزی بیان ژن در مدل‌سازی نوسانات سطح آب دریا در شکل‌های (۱) تا (۳) نشان داده شده است. فرض کنیم H_{S1} ، H_{S2} و H_{S3} سه متغیر ورودی مربوط به ارتفاع سطح آب دریا در سه نقطه مکانی مجاور باشند. ساختار درختی برنامه ساده $[(-H_{S2}+H_{S3})^{0.5}]/(3+H_{S1})$ در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- ساختار درختی برنامه $[(-H_{S2}+H_{S3})^{0.5}]/(3+H_{S1})$



شکل ۲- تلاقی

- 1- Generation
- 2- Crossover
- 3- Mutation
- 4- Reproduction

مقدار عددی معیارهای مورد نظر برنامه‌ریزی بیان ژن به کار رفته در تحقیق حاضر شامل: حداکثر تعداد اجرا ۱۵۰، اندازه جمعیت ۲۰۰، نرخ جهش ۰.۵٪ و نرخ تزویج ۰.۲٪ و در مدل شبکه عصبی مصنوعی نیز از الگوریتم پس انتشار خطا جهت آموزش شبکه شامل سه لایه‌ی شبکه، یک لایه‌ی پنهان، حداکثر تکرار ۱۰۰۰۰، نرخ یادگیری ۰/۰۱ و تابع محرک سیگموئید بهره‌برده شده است. جدول (۲) مقادیر مربوط به هر یک از شاخص‌های آماری مربوط به مدل‌های مختلف نوسانات تراز آب را در دوره آزمون نشان می‌دهد. برای ارزیابی مدل‌ها از نمایه‌های ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بهره‌برده شده است. در جدول (۳) ساختارهای درختی پیش‌بینی نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه در مقیاس زمانی دو روزه که به عنوان مدل بهینه انتخاب گردید، نشان داده شده و فرم ریاضی ساختارهای حاصل به منظور پیش‌بینی نوسانات تراز آب برای مقیاس زمانی دو روزه ارائه گردیده است.

در جدول (۳) پارامتر ژنی $d0=SL_{t-1}$ مقادیر ثابت به صورت $G3C0=6.560608$ و $G2C0=-8.69104$ ، $G1C0=-1.66037$ می‌باشند (که $G1C0$ معرف مقدار ثابت محاسباتی در ژن اول می‌باشد). بر این اساس، معادله نهایی کاربردی مربوط به تخمین نوسانات تراز آب در حالتی که از مقادیر نوسانات تراز آب در یک دوره دو روزه استفاده شود به صورت زیر خواهد بود:

$$SL_t = SL_{t-1} - 3.7908 \quad (2)$$

که در آن، SL_t نوسانات تراز آب در روز t ام و SL_{t-1} نیز مقادیر نوسانات تراز آب در یک روز قبل می‌باشند. و این امر نشان می‌دهد که افزایش حافظه تأثیر چندانی در افزایش دقت مدل نداشته است.

شکل‌های (۴) و (۵) مقادیر مشاهداتی و تخمینی نوسانات تراز آب را در حالتی که از داده‌های آماری در طی دو روز قبل به عنوان ورودی مدل استفاده گردد، نشان می‌دهند. با توجه به جدول (۲)، ساختارهای درختی نشان داده شده در جدول (۳) و شکل‌های (۴) و (۵) می‌توان دریافت که هر دو مدل از دقت قابل قبولی برخوردارند و لذا می‌توان آن‌ها را در تخمین نوسانات تراز آب به کار 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.

در این تحقیق از برنامه‌ریزی بیان ژن برای پیش‌بینی نوسانات تراز آب با استفاده از داده‌های موجود نوسانات استفاده می‌گردد. شکل ریاضی را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$H_{t+\delta\Delta t} = f(H_t, H_{t-\Delta t}, \dots, H_{t-\omega\Delta t}) \quad (1)$$

در رابطه اخیر، H ارتفاع سطح آب دریاچه نسبت به نقطه مرجع (متر) بوده و δ (که $\delta=1,2,3,\dots$) عبارت از مدت زمانی است که پیش‌بینی سطح آب در آن صورت خواهد گرفت. ω (با مقادیر $\omega=1,2,3,\dots$) نیز نشانگر گام‌های زمانی است که از داده‌های آن‌ها برای پیش‌بینی سطح آب استفاده می‌شود.

در تحقیق حاضر از برنامه GeneXproTools برای توسعه و اجرای مدل‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده به عمل آمد. برنامه یاد شده بر اساس برنامه‌ریزی صریح ژنتیک (GEP) استوار است. GEP ویرایش جدیدی از برنامه‌ریزی ژنتیک می‌باشد که به استنتاج برنامه‌های رایانه‌ای با اندازه‌ها و شکل‌های مختلف می‌پردازد. یکی از نقاط قوت GEP آن است که معیار تنوع ژنتیکی بسیار ساده بوده و لذا عملگرهای ژنتیک در سطح کروموزومی عمل می‌نمایند. همچنین یکی دیگر از نقاط قوت این روش، عبارت از طبیعت منحصر به فرد چند ژنه آن است که زمینه ارزیابی مدل‌های پیچیده‌ای را که شامل چندین زیر مدل می‌باشند فراهم می‌آورد [۱۲].

در این تحقیق علاوه بر استفاده از برنامه‌ریزی ژن، از مدل مرسوم شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مقایسه دقت تخمین استفاده شده است و برای جلوگیری از طولانی‌تر شدن مقاله از ذکر توضیحات بیشتر در خصوص شبکه عصبی مصنوعی خودداری می‌شود.

۴- نتایج و بحث

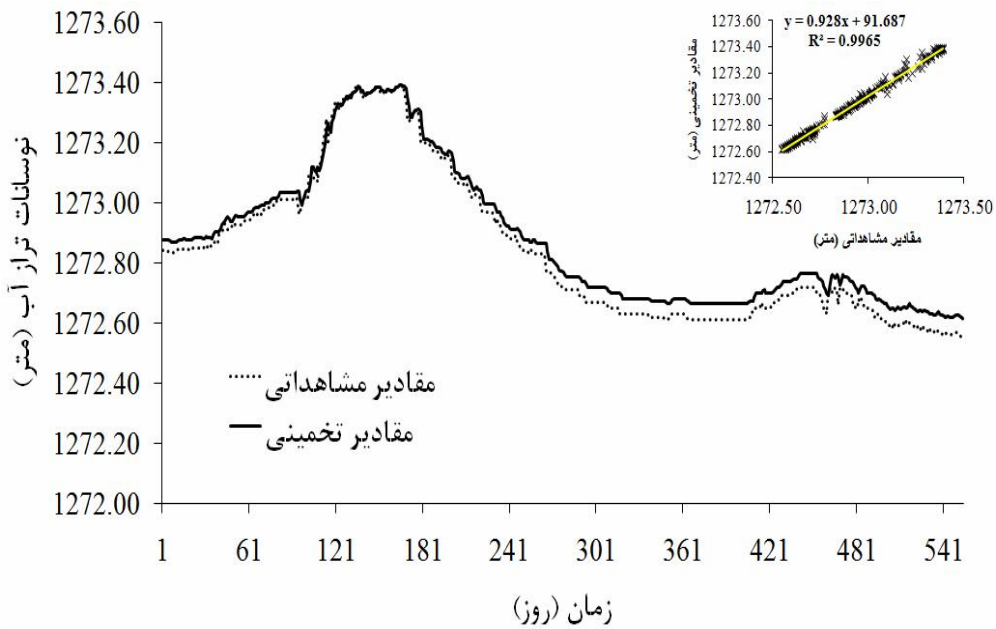
داده‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر شامل مقادیر نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه می‌باشند که در طی یک دوره آماری ۱۱ ساله، از ۱۳۷۵/۹/۱۱ تا ۱۳۸۶/۹/۱۰ و با اختصاص ۸۰ درصد داده‌ها (حدود ۹ سال) برای دوره آموزش و ۲۰ درصد (حدود ۲ سال) برای دوره آزمون، در ترکیب‌های مختلف ورودی به مدل‌ها وارد گردیدند. به منظور بررسی دقت هر یک از روش‌های یاد شده، ترکیب‌های مختلفی از نوسانات تراز آب تا نه روز قبل تشکیل گردیده و به عنوان ورودی‌های این مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲- مؤلفه‌های آماری مربوط به دو مدل تخمین نوسانات تراز آب در دوره آزمون

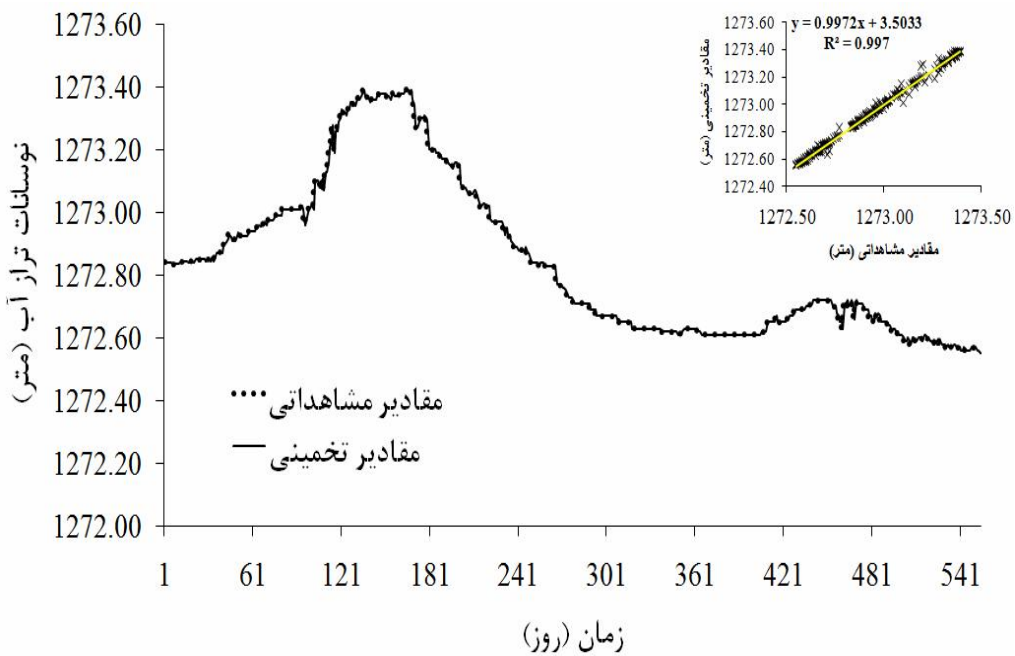
| شبکه عصبی مصنوعی | | برنامه‌ریزی ژنتیک | | ورودی مدل |
|------------------|----------------|-------------------|----------------|---|
| RMSE (m) | R ² | RMSE (m) | R ² | |
| ۰/۰۳۳ | ۰/۹۵۶ | ۰/۰۱۳ | ۰/۹۷۵ | SL _{t-1} |
| ۰/۰۱۵ | ۰/۹۶۶ | ۰/۰۱۳ | ۰/۹۷۵ | SL _{t-1} , SL _{t-2} |
| ۰/۰۲۰ | ۰/۹۴۲ | ۰/۰۱۳ | ۰/۹۷۳ | SL _{t-1} , SL _{t-2} , SL _{t-3} |
| ۰/۰۳۵ | ۰/۹۵۱ | ۰/۰۱۳ | ۰/۹۷۵ | SL _{t-1} , SL _{t-2} , SL _{t-3} , SL _{t-4} |
| ۰/۰۲۳ | ۰/۹۴۳ | ۰/۰۱۳ | ۰/۹۷۵ | SL _{t-1} , SL _{t-2} , SL _{t-3} , SL _{t-4} , SL _{t-5} |
| ۰/۰۷۷ | ۰/۸۴۰ | ۰/۰۱۳ | ۰/۹۷۵ | SL _{t-1} , SL _{t-2} , SL _{t-3} , SL _{t-4} , SL _{t-5} , SL _{t-6} |
| ۰/۰۱۸ | ۰/۹۳۴ | ۰/۰۱۳ | ۰/۹۷۵ | SL _{t-1} , SL _{t-2} , SL _{t-3} , SL _{t-4} , SL _{t-5} , SL _{t-6} , SL _{t-7} |
| ۰/۰۲۳ | ۰/۹۱۵ | ۰/۰۱۳ | ۰/۹۷۵ | SL _{t-1} , SL _{t-2} , SL _{t-3} , SL _{t-4} , SL _{t-5} , SL _{t-6} , SL _{t-7} , SL _{t-8} |
| ۰/۲۲۱ | ۰/۶۲۷ | ۰/۰۱۳ | ۰/۹۰۳ | SL _{t-1} , SL _{t-2} , SL _{t-3} , SL _{t-4} , SL _{t-5} , SL _{t-6} , SL _{t-7} , SL _{t-8} , SL _{t-9} |

جدول ۳- بیان درختی و رابطه‌ی ریاضی مدل پیش‌بینی نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه

| شماره ژن | ساختار درختی | رابطه‌ی ریاضی |
|------------|---------------------------|-----------------------------|
| ۱ | | $((G1C0 - d0) - d0)$ |
| ۲ | | $((d0 + G2C0) + (d0 + d0))$ |
| ۳ | | G3C0 |
| معادله ژنی | $d0 - G1C0 + G2C0 + G3C0$ | |



شکل ۴- دیاگرام پراکنش و نمودار مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی نوسانات تراز آب (متر) با کاربرد مدل شبکه عصبی مصنوعی



شکل ۵- دیاگرام پراکنش و نمودار مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی نوسانات تراز آب (متر) با کاربرد مدل برنامه‌ی بی‌ان ژن

- Sediment Modeling", *Journal of Hydrology*, 2008, 351, 288-298.
- [5] Alvisi, S., Mascellani, G., Franchini, M., Bardossy, A., "Water Level Forecasting Through Fuzzy Logic and Artificial Neural Network Approaches", *Hydrology Earth Systems Science Discussion*, 2005, 2, 1107-1145.
- [6] Rahmstorf, S., "A Semi Empirical Approach to Projecting Future Sea Level Rise", *Science*, 2007, 315, 368-370.
- [7] Makarynskyy, O., Makarynska, D., Kuhn, M., Featherstone, W. E., "Predicting Sea Level Variations with Artificial Neural Networks at Hillary Harbour, Western Australia. *Estuaries*", *Coastal and Shelf Science*, 2004, 61, 351-360.
- [8] Ustoorikar, K., Deo, M. C., "Filling up Gaps in Wave Data with Genetic Programming", *Marine Structures*, 2008, 21, 177-195.
- [9] Ghorbani, M. A., Khatibi, R., Aytok, A., Makarynskyy, O., Shiri, J., "Sea Water Level Forecasting Using Genetic Programming and Comparing the Performance with Artificial Neural Networks", Accepted for publication in *Computers & Geosciences*, 2010, 36, 620-627.
- [10] Ghorbani, M. A., Makarynskyy, O., Shiri, J., Makarynska, D., "Genetic Programming for Sea Level Prediction in an Island Environment", *International Journal of Ocean and Climate Systems*, 2010, 1, 27-35.
- [11] Borelli, A., De Falco, I., Della, C. A., Nicodemi, M., Trautteur, G., "Performance of Genetic Programming to Extract the Trend in Noisy Data Series", *Physica A*, 2006, 370, 104-108.
- [12] Ferreira, C., "Gene Expression Programming: a New Adaptive Algorithm for Solving Problems", *Complex Systems*, 2001, 13, 87-129.

به بیان دیگر، برنامه‌ریزی بیان ژن قادر به ارائه معادله تقریبی موجود بین ورودی‌ها و خروجی مدل و ساختار درختی بهینه می‌باشد و این ویژگی، آن را از سایر مدل‌ها نظیر شبکه عصبی مصنوعی متمایز می‌سازد.

۵- نتیجه‌گیری

برنامه ریزی بیان ژن برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب در حوضه دریاچه ارومیه انجام پذیرفت. این امر به کمک برنامه GeneXproTools صورت پذیرفته و ساختار درختی مدل بهینه ارائه گردید. در حالت کلی، پیش‌بینی‌های مناسبی با فواصل میانگین‌گیری‌های زمانی یک تا نه روزه انجام پذیرفت و متدولوژی برنامه‌ریزی بیان ژنی به کار رفته در این تحقیق می‌تواند به نحو موفقیت‌آمیزی در موارد مشابه نیز به کار رود. نتایج تحقیقات قربانی و همکاران [۹، ۱۰] و ماکارینسکی و همکاران [۷] این امر را تأیید می‌کند. دقت برنامه‌ریزی بیان ژن در مورد دو گزینه اول بیشتر است که این امر به دلیل کاهش تعداد ورودی- خروجی در مرحله مدل‌سازی و به تبع آن، ضعف رابطه موجود بین داده‌ها می‌باشد. روند تغییرات ضریب همبستگی، نمایه پراش و جذر میانگین مربعات خطا برای تمامی حالت‌ها تطابق مناسبی را در به کارگیری هر دو روش برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه عصبی مصنوعی نشان می‌دهد.

۶- مراجع

- [1] Hornik, K., "Some New Results on Neural Network Approximation", *Neural Networks*, 1993, 6, 1069-1072.
- [2] Khu, S. T., Liong, S. Y., Babovic, V., Madsen, H., Muttill, N., "Genetic Programming and its Application in Real-Time Runoff Forming", *Journal American Water Resources, Associated*, 2001, 37 (2), 439-451.
- [3] Liong, S. Y., Gautam, T. R., Khu, S. T., Babovic, V., Keijzer, M., Muttill, N., "Genetic Programming: A New Paradigm in Rainfall Runoff Modeling", *Journal American Water Resources, Associated*, 2002, 38 (3), 705-718.
- [4] Aytok, A., Kisi, O., "A Genetic Programming Approach to Suspended