جغرافیا و پایداری محیط، شمارهٔ ۲۶، بهار ۱۳۹۷
صص. ۱۳-۱

پیش‌بینی سلامت حوضهٔ آبخیز بر پایهٔ متغیّرهای کیفیّت آب سطحی (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبخیز طالقان)

پیام ابراهیمی* - دانش‌آموختهٔ دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشگاه تهران، تهران، ایران
علی سلاجقه - استاد علوم و مهندسی آبخیز، دانشگاه تهران، تهران، ایران
محسن محسنی ساروی - استاد علوم و مهندسی آبخیز، دانشگاه تهران، تهران، ایران
آرش ملکیان - دانشیار علوم و مهندسی آبخیز، دانشگاه تهران، تهران، ایران
امیر سعدالدین - دانشیار آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

وصول: ۱۳۹۶/۰۶/۲۷ **پذیرش:** ۱۳۹۶/۱۰/۰۸

چکیده

کیفیّت آب سطحی، یکی از معیارهای مهمّ تعیین سلامت حوضهٔ آبخیز است؛ به‌گونه‌ای که تغییرات آن، تعیین‌کنندهٔ وضعیّت سلامت و در نتیجه، پایداری جوامع محیطی و انسانی است. با توجّه به اینکه در دههٔ اخیر، بر اثر مصرف بیش از حدّ منابع آب و آلودگی، این متغیّر حیاتی دچار تغییر شده است؛ بنابراین، اطّلاع از وضعیّت آن در سال‌های آتی می‌تواند نقش مهمّی در برنامه‌ریزی محیطی و پایداری جغرافیای انسانی داشته باشد. حوضهٔ آبخیز طالقان واقع در استان البرز، یکی از مناطقی است که دچار این تغییرات شده است. در پژوهش حاضر، با استفاده از اطّلاعات ایستگاه هیدرومتری گلینک و مقادیر ۱۰ پارامتر کیفیّت آب (کلسیم، منیزیم، اسیدیته، سدیم، مجموع موادّ انحلالی، هدایت الکتریکی، کلر، سولفات، پتاسیم، سولفات و بیکربنات) در سال‌های (۱۳۹۵-۱۳۶۹)، وضعیّت سلامت این حوضه با استفاده از مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن، مورد ارزیابی قرار گرفت. داده‌های سال‌های (۱۳۸۴-۱۳۶۹)، (۱۳۹۲-۱۳۸۵)، (۱۳۹۵-۱۳۹۳)، به‌ترتیب، به‌عنوان دادهٔ آموزش، آزمون و بررسی میزان خطا در نظر گرفته شد و حداقل یک سال آبی از مهر ۱۳۹۶ تا پایان شهریور ۱۳۹۷، به‌عنوان داده‌های پیش‌بینی با استفاده از الگوریتم به میزان میانگین همبستگی ۰/۸۷ و ریشهٔ میانگین مربعات خطا ۳/۰۰۳ میلی‌گرم در لیتر برازش داده شد. داده‌های مورد استفاده، به دو صورت نرمال‌شده و واقعی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد با استفاده از آموزش صورت‌گرفته در مدل، می‌توان مقادیر متغیّرهای کیفیّت آب سطحی حوضهٔ آبخیز طالقان را از راه بررسی الگوی داده‌ها با دقّت قابل قبولی پیش‌بینی کرد. در مجموع، دقّت مدل، زمانی که داده‌ها نرمال‌سازی شده‌اند، به نسبت داده‌های واقعی به‌طور متوسّط به میزان ۰/۱۰ در مقادیر R^2 کمتر بوده است.

واژگان کلیدی: *بیان‌ژن، حوضهٔ آبخیز، سلامت، طالقان، کیفیّت آب.*

---

*. نویسندهٔ مسئول: ۰۹۳۵۹۴۵۳۹۱۳ E-mail: ebrahimi1393@ut.ac.ir

مقدّمه

فعّالیّت‌های کشاورزی و صنعتی درون حوضهٔ آبخیز و نیز دفع فاضلاب‌های شهری و پساب مناطق صنعتی، کیفیّت منابع آبی را تحت تأثیر قرار داده و در بیشتر موارد باعث کاهش کیفیّت آب شده است (یحیا و همکاران، ۲۰۱۲). یکی از معیارهای ارزیابی سلامت و پایداری حوضهٔ آبخیز، بررسی تغییرات کیفیّت آب‌های سطحی است. کیفیّت آب‌های سطحی از آن جهت نسبت به منابع زیرزمینی در اولویّت است که تغییرات آن محسوس‌تر است و میزان این تغییرات، نسبت به منابع زیرزمینی هم به لحاظ سرعت و هم به لحاظ پراکنش، در محیط وسیع‌تری اتّفاق می‌افتد (ستاری و همکاران، ۱۳۹۶).

به‌منظور پیش‌بینی وضعیّت کیفیّت آب در حوضه‌های آبخیز، ابتدا باید الگوی تغییرات را دریافت تا پس از تعیین این الگو، میزان تغییرات احتمالی را پیش‌بینی کرد (قربانی و دهقانی، ۱۳۹۶). در بررسی و پیش‌بینی مقادیر کیفیّت آب در سال‌های اخیر، مدل‌هایی نظیر بیان‌ژن[1]، شبکهٔ بیزین، درخت تصمیم، شبکهٔ عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان، هیبرید عصبی موجکی استفاده شده است (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۴). اگرچه مدل‌های هیبریدی دقّت بالایی دارند؛ امّا محاسبهٔ آن توسّط همهٔ مهندسین مرسوم نیست. علّت این امر، محاسبات بیشتر و دانش مربوطه و نیز سرعت آموزش‌پذیری کاربر در این زمان بسیار طولانی است (سلگی و همکاران، ۱۳۹۶)؛ بنابراین، برای حلّ این مشکل، باید از مدل‌هایی استفاده کرد که با کمترین محاسبات، بیشترین دقّت را دارند و قابلیّت آموزش به سایر افراد به‌منظور بهره‌گیری در تمامی حوضه‌های آبخیز ایران را داشته باشد؛ بنابراین، از میان مدل‌های بررسی‌شده، مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن در طیف وسیعی از داده‌های دبی، بارش، کیفیّت رودخانه به‌صورت روزانه، ماهانه و سالانه استفاده شده است (زمانی و همکاران، ۱۳۹۳؛ امامقلی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵؛ یاسین[2] و همکاران، ۲۰۱۶؛ ترزی[3]، ۲۰۱۳).

در پژوهش‌هایی که تاکنون صورت پذیرفته است، داده‌ها، به‌منظور افزایش سرعت پردازش در مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن، نرمال‌سازی می‌شوند؛ امّا نتیجهٔ این تغییر، همیشه افزایش دقّت در مدل نبوده است. از جمله پژوهش‌هایی که تاکنون در آن از برنامه‌ریزی بیان‌ژن استفاده شده می‌توان به تحقیقاتی که در زمینهٔ بررسی تغییرات داده‌های کیفیّت آب زیرزمینی در دشت برخوردار اصفهان انجام شده، اشاره کرد (قربانی و صالحی، ۱۳۹۰)؛ همچنین، پژوهشی که در استان اردبیل، روی رودخانهٔ بالخلوچای انجام شد، نشان داد که این مدل، متغیّرهایی نظیر کلسیم، منیزیم، سدیم و سولفات را در دبی این رودخانه، بر اساس سال‌های آماری موجود مورد بررسی قرار داده و الگوی مناسب رفتاری داده‌ها را پردازش کرده است (قربانی و دهقانی، ۱۳۹۶)؛ اگرچه استفاده از روش‌های متداول برآورد مقادیر آتی یک متغیّر نظیر کیفیّت آب، می‌توانند مقادیر را پیش‌بینی کند، امّا پژوهش‌ها نشان می‌دهد در مقایسه با روش برنامه‌ریزی بیان‌ژن دقّت پایینی دارند (بهمنش و همکاران، ۱۳۹۶؛ باباعلی و دهقانی، ۱۳۹۶؛ فیتریاسری[4] و همکاران، ۲۰۱۳). پژوهش‌هایی که در زمینهٔ مدل‌سازی بارش – رواناب و کیفیّت آب، در فرایندهای طولانی‌مدّت انجام شده است نشان می‌دهد تکنیک‌های هوشمند محاسباتی نظیر بیان‌ژن به شکلی موفّق توانسته پاسخگوی مسائل مهندسی آب، هیدرولیک و محیطزیست باشد (قبادیان و همکاران، ۱۳۹۲؛ سلگی و همکاران، ۱۳۹۶؛ حقیقت‌جو و همکاران، ۱۳۹۶؛ کریمی و همکاران، ۲۰۱۵). دبی جریان رودخانه، ارتباط مستقیمی با جریان زیست‌محیطی و کیفیّت

---

[1] Gene Expression
[2] Yassin
[3] Terzi
[4] Fithriasari

آب دارد و بر اساس آن، می‌توان سلامت حوضهٔ آبخیز را بررسی کرد. مجموعهٔ تغییرات و رفتاری که انسان در حوضهٔ آبخیز ایجاد می‌کند، در نهایت بر اساس یک الگوی بازخوردی، متوجّه انسان خواهد بود. یکی از نمودهای این تغییرات، کاهش یا افزایش کیفیّت آب است؛ امّا در طول سال‌های اخیر، به طور کلّی، با کاهش کیفیّت آب و کمیّت آن مواجه بوده‌ایم. یکی از راه‌های بررسی وضعیّت حوضهٔ آبخیز می‌تواند وضعیّت متغیّرهای کیفی آب باشد که باید در هر حوضهٔ آبخیز با توجّه به پتانسیل موجود آن انتظار معنی‌داری از منابع کیفی آب داشت (قربانی و دهقانی، ۱۳۹۵).

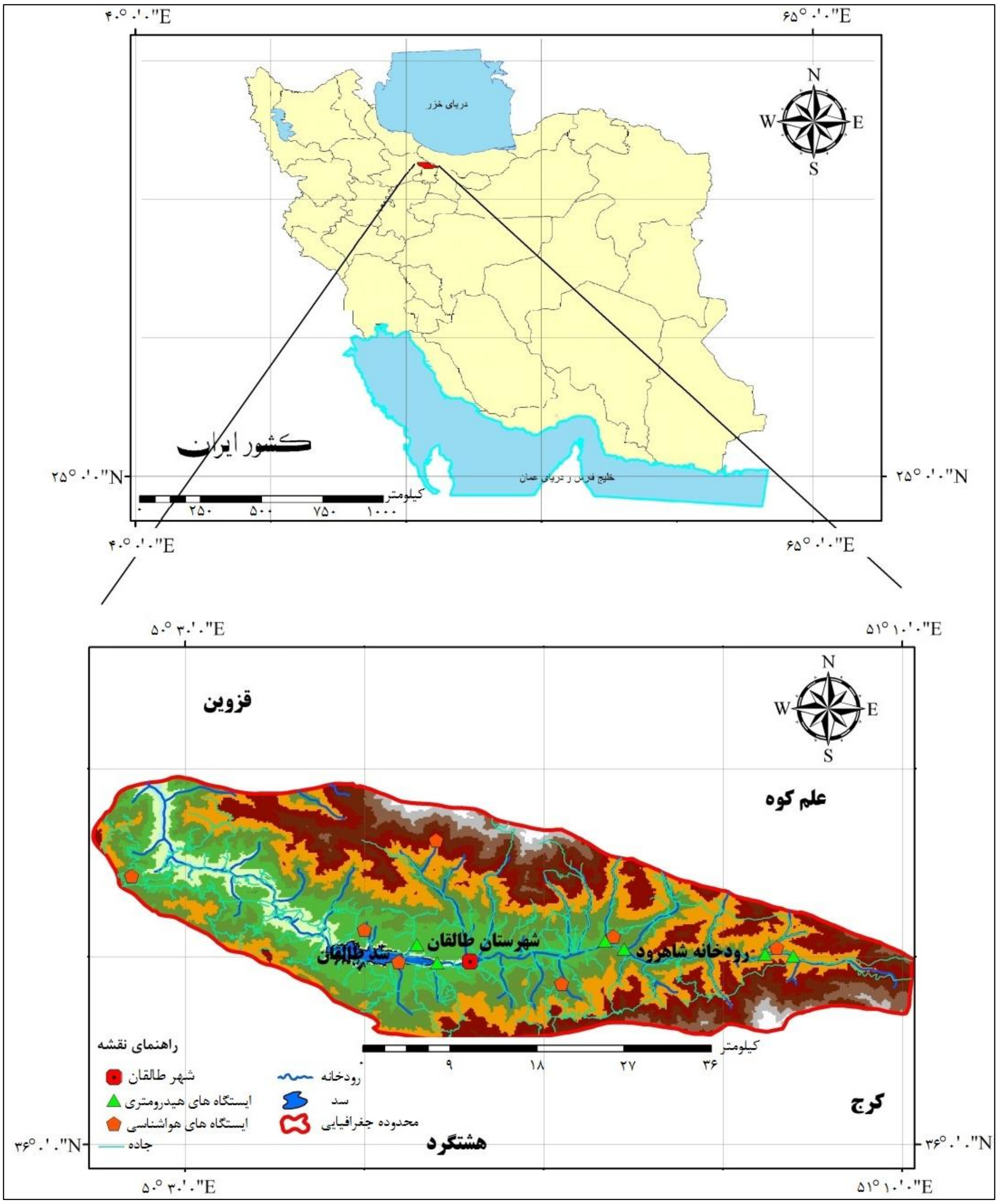
استان البرز، با توجّه به گسترش سریع جمعیّت و استقرار بخش‌های مختلف صنعتی به لحاظ وضعیّت آب سطحی، بیشتر در معرض تغییرات کیفیّت آب قرار گرفته است. شهرستان طالقان، به دلیل وضعیّت آب‌وهوایی مناسب در فصل بهار تا انتهای تابستان، جمعیّت شناور ده برابری دارد. این فشار واردآمده، به‌صورت تصاعدی منابع را تحت تأثیر قرار داده است. از طرفی، احداث راه جدید دسترسی به این شهرستان، هجوم جمعیّت از سوی شهرهای پر جمعیّت تهران و کرج را به این منطقه سرازیر می‌کند. در این زمینه، با استفاده از برنامه‌ریزی بیان‌ژن، به‌عنوان یکی از موفّق‌ترین شبکه‌های الگوریتمی وضعیّت کیفیّت آب سنجیده شده است؛ همچنین سال آبی ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۷، برای پیش‌بینی وضعیّت کیفی آب انتخاب شد و روند تغییرات آن نیز در سال‌های گذشته مورد بررسی قرار گرفت.

معرّفی منطقه مورد بررسی

حوضهٔ آبخیز طالقان، یکی از شاخه‌های آبخیز سفیدرود به‌شمار می‌رود که در دامنهٔ جنوبی رشته‌کوه‌های البرز در شمال شرق تهران واقع شده است. این حوضهٔ آبخیز، در ′۱۱ °۳۶ تا ′۵۰ °۳۶ طول شمالی و ′۱۱ °۵۱ تا ′۴۵ °۵۰ عرض شرقی واقع شده است (شکل ۱). این منطقه، به مساحت ۱۱۲ هزار هکتار و در فاصلهٔ ۱۲۰ کیلومتری شمال غرب تهران قرار دارد. ایستگاه هیدرومتری گلینک، نسبت به سایر ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در حوضهٔ آبخیز، به خروجی قبل از سد که منبع آب شرب نیز هست نزدیک‌تر بوده؛ بنابراین، از داده‌های این ایستگاه، به‌منظور بررسی کیفیّت آب حوضهٔ آبخیز طالقان استفاده شده است (شکل ۱). میانگین سالانهٔ بارندگی طالقان در یک دورهٔ بلندمدّت بیست‌سالهٔ آماری، بر اساس آمار ایستگاه باران‌سنجی گلینک، ۴۴۶ میلی‌متر محاسبه شده است. میانگین سالانهٔ دما، ۱۱/۴ درجهٔ سلسیوس و میانگین حداکثرها و حداقل‌ها نیز به ترتیب ۱۷/۴ و ۴/۷ درجهٔ سلسیوس می‌شد. حداکثر مطلق دمای هوا ۳۵ و حداقل مطلق دمای هوا، ۲۱- درجهٔ سلسیوس است.

مواد و روش‌ها

محدودهٔ مورد مطالعه، دارای ۶ ایستگاه به نام گته‌ده، دهدر، جوستان آلیزان، جوستان شاهرود، جوستان مهران و گلینک است که از اطّلاعات ایستگاه گلینک استفاده شده است. علّت این انتخاب، موقعیّت قرارگیری این ایستگاه، نسبت به سایر ایستگاه‌ها در محلّ خروجی حوضه است (جدول ۱). اطّلاعات مربوط به این ایستگاه، در مورد کیفیّت آب از سال ۱۳۶۹ به‌صورت مستمر پایش شده است که تعداد کلّ داده‌ها ۳۴۲ مورد به ازای هر پارامتر کیفی است؛ همچنین متغیّرهای مورد استفادهٔ مقادیر مورد سنجش، در سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۹۰ است که بر اساس تحقیقات شرکت منابع آب ایران، طول دورهٔ آماری در گزارش بیلان منطقه طالقان الموت با کد مطالعاتی ۱۳۱۰ تا سال ۱۳۶۹ با سایر ایستگاه‌های همجوار تکمیل اطّلاعات و بازسازی نواقص آماری صورت گرفته است. داده‌های ۵ سال اخیر (۱۳۹۵-۱۳۹۱) از شرکت آب منطقه‌ای البرز تهیّه شده است که در مجموع، طول دورهٔ آماری ۲۷ ساله مورد بررسی قرار گرفت.


۴۰°۰'۰"E
۶۵°۰'۰"E
دریای خزر
N
W
E
S
کشور ایران
۲۵°۰'۰"N
خلیج فارس و دریای عمان
کیلومتر
۰ ۲۵۰ ۵۰۰ ۷۵۰ ۱۰۰۰
۵۰°۳۰'۰"E
۵۱°۱۰'۰"E
قزوین
علم کوه
شهرستان طالقان
سد طالقان
رودخانه شاهرود
کیلومتر
۰ ۹ ۱۸ ۲۷ ۳۶
راهنمای نقشه
شهر طالقان
ایستگاه های هیدرومتری
ایستگاه های هواشناسی
جاده
رودخانه
سد
محدوده جغرافیایی
کرج
هشتگرد
۳۶°۰'۰"N

شکل ۱. منطقهٔ مورد بررسی و ایستگاه‌های هیدرومتری

جدول ۱. موقعیّت ایستگاه مورد مطالعه در حوضهٔ آبخیز طالقان

نام ایستگاه	نام رودخانه	نوع ایستگاه	سال تأسیس	y	x	ارتفاع
گلینک	شاهرود	هیدرومتری	۱۳۴۹	۵۰° ۳۵´ ۴۴´´	۳۶° ۱۴´ ۱۰´´	۱۷۷۰

در این پژوهش، با استفاده از طول دورهٔ آماری ۲۷ ساله، متغیّرهای کیفی آب و وضعیّت تغییرات در سال‌های مختلف مشخّص شده است. با توجّه به پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینهٔ الگوریتم‌های محاسباتی برنامه‌ریزی بیان‌ژن از نرم‌افزار ژن اکسپرو تولز[1] استفاده شده است. در تحقیقات انجام‌شده، طول دورهٔ آماری

---

[1] GeneXpro Tools

آموزش و آزمون مدل به‌ترتیب، بین ۶۵٪ تا ۸۰٪ و ۵٪ تا ۲۰٪ بیان شده است. طول دورهٔ آماری مربوطه در این پژوهش نیز، به سه دوره تقسیم شده است. دورهٔ اوّل، مربوط به دورهٔ آموزش مدل (۱۳۸۴-۱۳۶۹) و دورهٔ دوّم، مربوط به آزمون مدل (۱۳۹۲-۱۳۸۵) و در نهایت، بر مبنای الگوریتم ساخته‌شده، اقدام به تعیین وضعیّت آتی متغیّرها با فرض ارتباط یک متغیّر کیفیّت آب با سال حاضر و گذشته و نیز ارتباط این دو با سال آینده (۱۳۹۵-۱۳۹۳) مقادیر تا مهرماه سال ۱۳۹۷ پیش‌بینی شده است.

به‌منظور پیش‌بینی مقادیر داده‌ها، از برنامه‌ریزی بیان‌ژن استفاده شده است. در این مدل، داده‌ها به‌صورت جمعیّت اوّلیّه هستند که مطابق با شایستگی خود انتخاب می‌شوند تا با اصلاحات و بهبودهایی دوباره ساخته شوند و در نتیجه، فرزندانی با ویژگی‌های جدید باقی می‌گذارند. این فرزندان جدید، در یک چرخه، تحت همان فرایند توسعه‌ای قرار می‌گیرند که به آن، بیان ژنوم گفته می‌شود. فرایند گام‌به‌گام حلّ یک مسئله با استفاده از برنامه‌ریزی بیان‌ژن متشکّل از ۵ مرحله به شرح ذیل است: ۱- انتخاب مجموعه ترمینال که همان متغیّرهای مستقل مسئله و متغیّرهای حالت سامانه است. انتخاب تابع برازش در این مرحله صورت می‌گیرد که معمولاً از جذر میانگین مربعات خطا استفاده می‌شود. ۲- انتخاب مجموعه توابع که شامل عملگرهای ریاضی، توابع آزمون و توابع بولی است. عملگرهای ریاضی شامل ۱۰ عملگر ضرب، تقسیم، جمع، تفریق، جذر، لگاریتم، مجذور، مکعب و... است که سه نوع جمع، تفریق و ضرب بیشترین استفاده را دارند، امّا در این پژوهش، از همهٔ عملگرهای پیش‌فرض موجود در سیستم بیان‌ژن استفاده شده است. ۳- شاخص اندازه‌گیری دقّت مدل که بر مبنای آن، می‌توان مشخّص کرد که توانایی مدل در حلّ یک مسئلهٔ خاص تا چه اندازه است. ۴- مؤلّفه‌های کنترل: مقادیر مؤلّفه‌های عددی و متغیّرهای کیفی که برای کنترل اجرای برنامه استفاده می‌شود. تعداد داده‌های بخش آموزش، تعداد داده‌های بخش آزمون، تعداد کروموزوم‌ها، اندازهٔ سر، تعداد ژن‌ها، انتخاب عملگر پیوند که با چهار گزینهٔ جمع، تفریق، ضرب و تقسیم قابل تنظیم هستند. ۵- معیارهای توقّف برنامه: معیاری برای رسیدن به نتیجه و توقّف اجرای برنامه است که مقادیر آن بر اساس میزان شکست در نتایج همبستگی با معیارهای بالاتر تولید نسل مبنا قرار گرفته است (پتوسیس[1] و همکاران، ۲۰۱۶؛ گروسل و زادنیک استیرن[2]، ۲۰۱۵).

در این پژوهش، با استفاده از دیاگرام تیلور (ابراهیمی، ۱۳۹۶)، انحراف از معیار، ضریب همبستگی و مقادیر مشاهده‌ای برنامه توقّف یافته است. کمترین انحراف از معیار و بیشترین همبستگی با مقادیر مشاهده‌ای و عدم تغییرات محسوس با افزایش تولید نسل، مهم‌ترین معیار توقّف هستند. به‌منظور آموزش بهتر و سریع‌تر مدل داده‌ها قبل از استفاده نرمال می‌شوند که در این پژوهش، داده‌ها در هر دو حالت نرمال و طبیعی مورد سنجش قرار گرفتند. معادلهٔ نرمال‌سازی بر مبنای پژوهش (برجی حسن گاویار و همکاران، ۱۳۹۶) به شرح مقدار نرمال‌شدهٔ ورودی X_n و X_i دادهٔ ورودی و X_{max} حداکثر داده و X_{min} حداقل داده است (رابطهٔ ۱):

$$X_n=0.1+0.8\frac{X_i\text{-}X_{min}}{X_{max}\text{-}X_{min}} \qquad \text{رابطهٔ ۱}$$

در این پژوهش، برای ارزیابی مدل‌های مختلف از معیارهای جذر میانگین مربعات خطا (رابطهٔ ۲)، ضریب تعیین (رابطهٔ ۳) و میانگین خطای مطلق (رابطهٔ ۴) استفاده شد (جدول ۲):

---

[1] Petousis

[2] Grosel & Zadnik Stirn

جدول ۲. معیارهای ارزیابی مدل

رابطه	نام ارزیابی	معادله ارزیابی
۲	جذر میانگین مربعات خطا[1]	$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum\left(Q_{obs}-Q_{pre}\right)^{۲}}{n}}$
۳	ضریب تعیین[2]	$R^{۲} = ۱ - \frac{\sum_{i=۱}^{N}\left(Q_{obs} - Q_{pre}\right)^{۲}}{\sum_{i=۱}^{N}(Q_{obs} - \bar{Q})^{۲}}$
۴	میانگین خطای مطلق[3]	$\mathrm{MAE}=\frac{\sum_{i=۱}^{n}\left\lvert Q_{obs}-Q_{pre}\right\rvert}{n}$

که در آن مقادیر Q_{obs} و Q_{pre}: بهترتیب مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی است و n: تعداد کلّ داده‌های استفاده‌شده است.

نتایج

در این پژوهش، دو دورهٔ آماری ۱۳۶۹ تا ۱۳۸۴ به‌عنوان دورهٔ آماری آموزش و دورهٔ آماری ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۲، به‌عنوان دورهٔ آماری آزمون انتخاب شد. با توجّه به مقادیر ضریب تغییرات در حالت طبیعی، بیشترین تغییرات مربوط به متغیّر منیزیم و پس از آن کلر به‌ترتیب با مقادیر ۰/۳۳ و ۰/۲۰ است. کمترین مقدار ضریب تغییرات نیز مربوط به اسیدیته و هدایت الکتریکی به‌ترتیب به مقدار ۰/۰۳ و ۰/۰۸ است. نتایج اعداد نرمال‌شده با توجّه به اعداد نرمال‌نشده نشان می‌دهد بیشترین ضریب تغییرات مربوط به منیزیم (۰/۷۵) و مجموع موادّ محلول (۰/۶۶) است؛ بنابراین، نرمال‌سازی اعداد باعث می‌شود مقیاس داده‌ها تغییر کند و نتایج متفاوتی را به وجود آورد؛ همچنین بیکربنات، هدایت الکتریکی و سدیم به‌ترتیب با مقادیر ۰/۳۹، ۰/۳۹ و ۰/۴۰، دارای کمترین ضریب تغییرات هستند (جدول ۳).

جدول ۳. متغیّرهای کیفیّت آب در ایستگاه گلینک طالقان در بخش آموزش مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن

آموزش واحد	K mg/L	na mg/L	mg mg/L	Ca mg/L	So_4 mg/L	Cl mg/L	Hco_3 mg/L	PH -	Ec S/cmμ	TDS mg/L
بیشترین	۰/۰۴	۱/۵۷	۲/۵۲	۴/۱۰	۳/۹۲	۱/۷۱	۲/۶۱	۸/۱۷	۶۷۵/۰۰	۵۰۱/۵۰
کمترین	۰/۰۲	۱/۰۰	۰/۹۷	۲/۹۲	۲/۰۵	۰/۸۲	۱/۳۱	۷/۳۲	۵۰۱/۸۳	۳۵۴/۲۵
میانگین	۰/۰۳	۱/۲۸	۱/۳۸	۳/۵۷	۲/۹۷	۱/۲۰	۲/۰۶	۷/۷۹	۶۱۲/۲۳	۴۰۶/۳۹
انحراف معیار	۰/۰۱	۰/۱۹	۰/۴۶	۰/۴۰	۰/۵۰	۰/۲۴	۰/۳۹	۰/۲۴	۵۱/۱۲	۴۶/۷۲
ضریب تغییرات	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۳۳	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۱۹	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۱۱
رتبهٔ تأثیر	۴	۶	۱	۸	۵	۲	۳	۱۰	۹	۷
اعداد نرمال‌شده										
آموزش واحد	K* mg/L	na* mg/L	mg* mg/L	Ca* mg/L	So_4* mg/L	Cl* mg/L	Hco_3* mg/L	PH* -	Ec* S/cmμ	TDS* mg/L
بیشترین	۰/۸۹	۰/۳۹	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۶۲	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰
کمترین	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰
میانگین	۰/۴۸	۰/۲۴	۰/۳۱	۰/۵۴	۰/۴۹	۰/۴۴	۰/۴۰	۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۳۸
انحراف معیار	۰/۲۶	۰/۱۰	۰/۲۴	۰/۲۷	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۲۵
ضریب تغییرات	۰/۵۳	۰/۴۰	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۴۳	۰/۴۹	۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۳۹	۰/۶۶
رتبهٔ تأثیر	۳	۸	۱	۴	۶	۵	۱۰	۷	۹	۲
عناوین متغیّرها*	پتاسیم	سدیم	منیزیم	کلسیم	سولفات	کلر	بیکربنات	اسیدیته	هدایت الکتریکی	مجموع موادّ محلول

---

[1] Root Mean Square Error

[2] Coefficient of Determination

[3] Mean Absolute Error

داده‌های مربوط به بخش آزمون مدل نیز با توجّه به طول دورهٔ آماری ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۲ مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج این بخش نیز در دو حالت نرمال و طبیعی بررسی شدند. با توجّه به رتبهٔ تأثیر در مدل، رتبهٔ ۱، بیشترین تأثیر و رتبهٔ ۱۰، کمترین تأثیر در مدل را دارد (جدول ۴). مقادیر پتاسیم و کلسیم، بیشترین تأثیر را در مدل و مقادیر اسیدیته و منیزیم کمترین تأثیر را در مدل دارند؛ همچنین، در مقادیر نرمال‌شده، کلسیم و منیزیم بیشترین تأثیر را به‌ترتیب با مقادیر ۰/۸۹ و ۰/۶۷ دارند و بیکربنات و مجموع موادّ محلول، به‌ترتیب ۰/۴۴ و ۰/۴۸ کمترین تأثیر را در مدل دارند.

با توجّه به نتایج مدل در برنامه‌ریزی بیان‌ژن و تأثیری که نرمال کردن و یا استفاده از اعداد طبیعی دارد از نتایج اعداد طبیعی استفاده شد. با توجّه به پژوهش قربانی و دهقانی (۱۳۹۶)، مجموعهٔ عملگرهای پیش‌فرض مدل که ۱۱ عملگر هستند، بالاترین همبستگی را ایجاد کرده‌اند. در این مدل نیز، از ۱۱ عملگر اصلی استفاده شده است. مقادیر میانگین خطای مطلق، ریشهٔ میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین در ایستگاه مورد بررسی آورده شده است (جدول ۵). میزان خطای داده‌ها، زمانی که نرمال شده‌اند نسبت به زمانی که نرمال نمی‌شوند، بالاتر می‌رود و همین امر، باعث می‌شود دقّت مدل کاهش یابد. علّت کاهش دقّت با توجّه به معادله‌های مختلف در این زمینه، تأثیر یکسان مقادیر متغیّرها و کاهش اثربخشی مقیاس است؛ همچنین مقادیر دقّت در مرحلهٔ آموزش، نسبت به مرحلهٔ آزمون بالاتر است و عوامل مؤثّر در مدل نیز در دو بخش داده‌های طبیعی و نرمال متفاوت هستند. در مرحلهٔ آزمون، فاصلهٔ بین مقادیر متغیّرها از یکدیگر بیشتر و شکستگی‌های بیشتری در روند توالی نسل وجود دارد؛ بنابراین، دقّت مرحلهٔ آموزش را نخواهد داشت.

جدول ۴. متغیّرهای کیفیّت آب در ایستگاه گلینک طالقان در بخش آزمون مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن

آزمون	K	na	mg	Ca	So_4	Cl	Hco_3	PH	Ec	TDS
واحد	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	-	S/cmμ	mg/L
بیشترین	۰/۰۴	۱/۴۱	۱/۳۹	۵/۲۹	۳/۷۲	۱/۲۹	۲/۹۶	۸/۱۷	۶۹۲/۲۵	۴۴۳/۰
کمترین	۰/۰۲	۰/۸۰	۰/۹۷	۳/۰۷	۱/۹۹	۰/۷۲	۱/۴۰	۷/۶۸	۴۸۲/۳۳	۲۷۱/۵۰
میانگین	۰/۰۳	۱/۱۱	۱/۱۲	۳/۷۱	۲/۷۷	۱/۰۱	۲/۲۵	۷/۹۲	۵۸۲/۴۶	۳۷۱/۹۸
انحراف معیار	۰/۰۱	۰/۲۰	۰/۱۴	۰/۸۲	۰/۶۲	۰/۲۰	۰/۴۶	۰/۱۷	۷۰/۴۳	۵۸/۳۴
ضریب تغییرات	۰/۲۹	۰/۱۸	۰/۱۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۱۶
رتبهٔ تأثیر	۱	۶	۹	۲	۳	۵	۴	۱۰	۸	۷

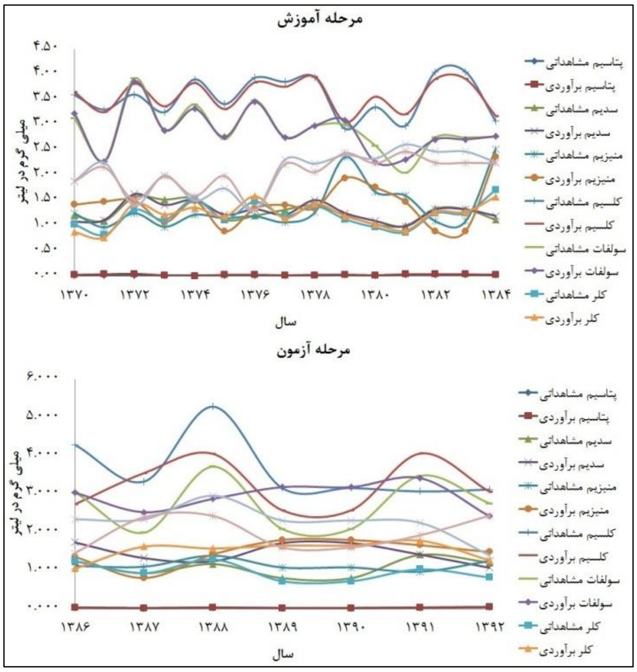
اعداد نرمال‌شده

آزمون	K	na	mg	Ca	So_4	Cl	Hco_3	PH	Ec	TDS
واحد	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	-	S/cmμ	mg/L
بیشترین	۰/۸۹	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۰
کمترین	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰
میانگین	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۳۳	۰/۴۶	۰/۵۰	۰/۵۴	۰/۵۰	۰/۴۸	۰/۵۷
انحراف معیار	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۷
ضریب تغییرات	۰/۵۷	۰/۵۱	۰/۶۷	۰/۸۹	۰/۶۲	۰/۵۷	۰/۴۴	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۴۸
رتبهٔ تأثیر	۵	۸	۲	۱	۳	۴	۱۰	۶	۷	۹

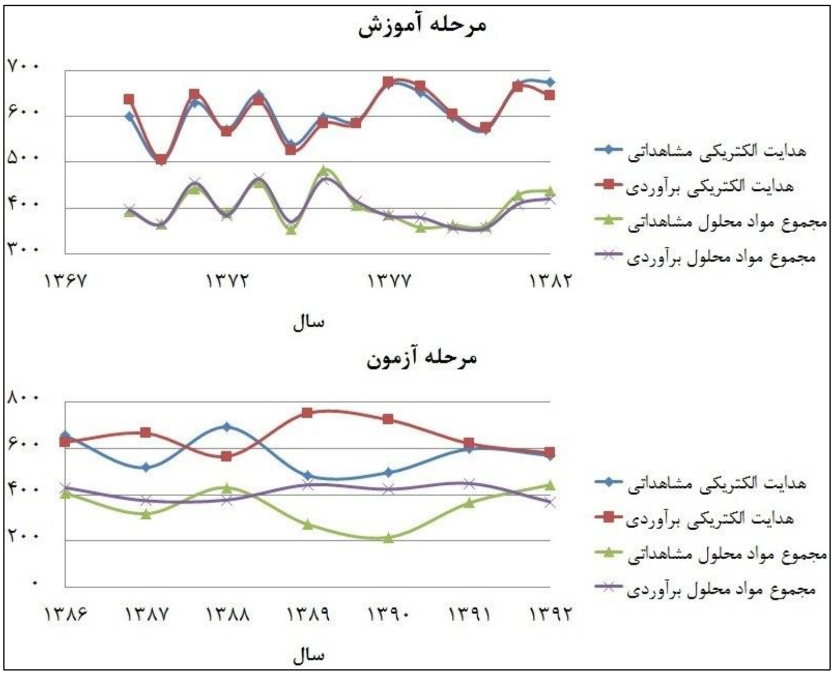
جدول ۵. مقادیر میانگین خطای مطلق، ریشۀ میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین در داده‌های نرمال و غیر نرمال

دوره	متغیّر	میانگین خطای مطلق		ریشۀ میانگین مربعات خطا		ضریب تعیین	
		نرمال	طبیعی	نرمال	طبیعی	نرمال	طبیعی
آموزش	K	۰/۰۶۲۲	۰/۰۶۳۸	۰/۰۷۹۹	۰/۰۷۸	۰/۸۰	۰/۸۲
	na	۰/۰۶۴۰	۰/۰۶۹۰	۰/۰۸۴۸	۰/۰۷۹	۰/۷۶	۰/۸۲
	mg	۰/۰۲۰۹	۰/۰۲۲۱	۰/۲۶۸	۰/۲۵۴	۰/۶۸	۰/۷۲
	Ca	۰/۰۱۰۷	۰/۰۱۱۵	۰/۱۳۹	۰/۱۳۱	۰/۸۴	۰/۹۰
	So_4	۰/۰۶۸۷	۰/۰۷۸	۰/۱۳۶	۰/۱۲۲	۰/۸۱	۰/۹۲
	Cl	۰/۰۶۶۶	۰/۰۸۳۲	۰/۱۱۲	۰/۰۹۴	۰/۶۸	۰/۸۵
	Hco_3	۰/۰۷۸۵	۰/۰۹۶	۰/۱۴۳	۰/۱۲۱	۰/۷۶	۰/۹۳
	PH	۰/۰۳۶۳	۰/۰۴۳۷	۰/۶۷۷	۰/۵۷۹	۰/۷۸	۰/۹۴
	Ec	۱۰/۹۱	۱۲/۷۵۵	۱۸/۲۳۱	۱۵/۹۳	۰/۷۷	۰/۹۰
	TDS	۹/۴۷	۱۰/۵۲۷	۱۳/۹۱۵	۱۲/۶۵	۰/۸۱	۰/۹۰
آزمون	K	۰/۰۵۹۶	۰/۰۵۲۸	۰/۰۸۹	۰/۰۸۲	۰/۷۱	۰/۷۸
	na	۰/۰۷۰۱	۰/۰۶۱۲	۰/۰۹۶	۰/۰۸۶	۰/۶۶	۰/۷۵
	mg	۰/۰۷۶۴	۰/۰۷۴۱	۰/۳۰۸	۰/۲۷۲	۰/۵۸	۰/۶۷
	Ca	۰/۰۴۹۳	۰/۰۴۱۳	۰/۱۶۲	۰/۱۴۴	۰/۷۱	۰/۸۱
	So_4	۰/۰۴۱۵	۰/۰۳۸۴	۰/۱۵۲	۰/۱۳۴	۰/۷۲	۰/۸۳
	Cl	۰/۰۵۴۸	۰/۰۵۳۳	۰/۱۱۱	۰/۱۰۱	۰/۷۱	۰/۷۹
	Hco_3	۰/۰۷۹۸	۰/۰۳۵۷	۰/۱۳۵	۰/۱۲۹	۰/۸۳	۰/۸۷
	PH	۰/۰۳۸۱	۰/۰۴۱۵	۰/۶۷۷	۰/۶۵۳	۰/۷۹	۰/۸۲
	Ec	۱۱/۲۵	۱۳/۲۶۵	۱۸/۹۹	۱۶/۸۱	۰/۷۴	۰/۸۵
	TDS	۹/۹۶	۱۲/۶۴۹	۱۴/۷۸	۱۳/۶۳	۰/۷۶	۰/۸۳

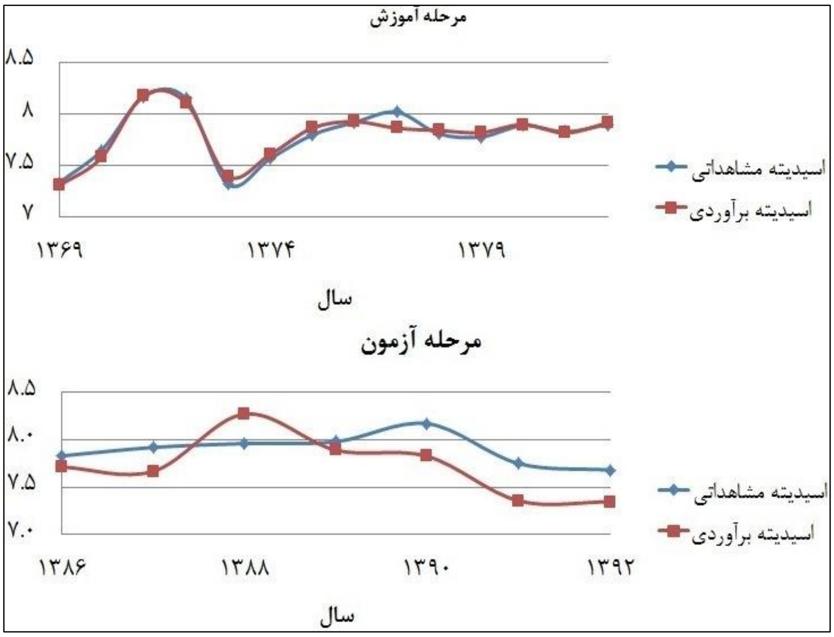
مقادیر پیش‌بینی مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن، در ایستگاه مورد نظر مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳ تا ۵). مجموعۀ مقادیر مربوط به سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سولفات، بیکربنات، کلر، همچنین هدایت الکتریکی و مجموع مواد محلول ارزیابی شد که در این میان، بیشترین همبستگی مربوط به اسیدیته و کمترین آن مربوط به منیزیم است. این امر، نشان می‌دهد پیش‌بینی مربوط به این دو مقدار به‌ترتیب بیشترین و کمترین دقّت را خواهد داشت.



شکل ۳. مقادیر پیش‌بینی مدل در مرحلۀ آموزش و آزمون سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سولفات، کلر و بیکربنات



شکل ۴. مقادیر پیش‌بینی مدل در مرحلهٔ آموزش و آزمون هدایت الکتریکی و مجموع موادّ محلول



شکل ۵. مقادیر پیش‌بینی مدل در مرحلهٔ آموزش و آزمون اسیدیته

در این پژوهش، با توجّه به استفاده از داده‌های سالانهٔ کیفیّت آب ایستگاه، تنها یک سال به‌عنوان پیش‌بینی با رعایت احتیاط برای مدل تعریف شده است. در صورتی که داده‌ها ماهانه یا روزانه باشند میزان آموزش مدل با دقّت بالاتری انجام شده و قابلیّت پیش‌بینی برای سال‌های طولانی‌تری را خواهد داشت. مقادیر پیش‌بینی مدل در سال ۱۳۹۶-۱۳۹۵ جهت برآورد میزان خطا و مقادیر پیش‌بینی سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ همهٔ متغیّرها در ایستگاه مورد مطالعه بررسی شده است (جدول ۶). با استفاده از جدول مرجع سلامت و پایداری حوضهٔ آبخیز طالقان (ابراهیمی، ۱۳۹۶)، میزان سلامتی این حوضه در سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ مشخّص شد (جدول ۷).

جدول ۶. مقادیر پیش‌بینی مدل در سال ۱۳۹۶-۱۳۹۵ و ۱۳۹۷-۱۳۹۶ همۀ متغیّرها در تمام ایستگاه‌ها

ردیف	متغیّر	۱۳۹۵ مشاهداتی	۱۳۹۵ پیش‌بینی	میزان خطا به درصد	وضعیّت	۱۳۹۶ پیش‌بینی
۱	K	۰/۰۲۵	۰/۰۳۱	+۱۹/۳۵	بیش‌برآورد	۰/۰۲۸
۲	na	۱/۱۰۲	۱/۱۹	+۷/۳۹	بیش‌برآورد	۱/۱۳۱
۳	mg	۱/۱۵۳	۰/۹۹	-۱۴/۱۳	کم‌برآورد	۱/۲۷۶
۴	Ca	۳/۳۰۰	۳/۵۵	+۷/۰۴	بیش‌برآورد	۳/۳۷۵
۵	So4	۲/۵۸۹	۲/۲۶	-۱۲/۷۰	کم‌برآورد	۲/۹۲۴
۶	Cl	۰/۹۷۱	۱/۲۰	+۱۹/۰۸	بیش‌برآورد	۱/۱۹
۷	Hco3	۲/۳۰۶	۲/۰۱	-۱۲/۸۳	کم‌برآورد	۱/۹۵۸
۸	PH	۷/۳۲۳	۷/۷۶۸	+۵/۷۲	بیش‌برآورد	۷/۱۱۸
۹	Ec	۶۵۱/۸۸۹	۶۶۷/۶۳۵	+۲/۳۵	بیش‌برآورد	۶۸۷/۶۹۷
۱۰	TDS	۳۷۸/۹۲۷	۳۶۹/۹۴۷	-۲/۳۶	کم‌برآورد	۴۳۸/۱۱۱

جدول ۷. بررسی وضعیّت سلامت متغیّرهای مورد بررسی در حوضۀ آبخیز (ابراهیمی، ۱۳۹۶)

ردیف	وضعیّت کیفی	نمره	K	na	mg	Ca	So۴	Cl	Hco۳	PH	Ec	TDS
	واحد		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	-	µS/cm	mg/L
۱	سالم	۵	۰/۰۱۷ یا کمتر	۰/۰۰۸ یا کمتر	۰/۹۷ یا کمتر	۲/۹۲ یا کمتر	۱/۹۹ یا کمتر	۰/۷۲ یا کمتر	۱/۳۱ یا کمتر	۷– ۷/۵۷	۴۸۲/۳۳ یا کمتر	۲۷۱/۵۰ یا کمتر
۲	بیمار	۴	۰/۰۱۸ – ۰/۰۲۵	۰/۰۰۹ – ۱/۱۲	۰/۹۸ – ۱/۱۱	۲/۹۳ – ۳/۳۰	۲ – ۲/۷۵	۰/۷۳ – ۱/۰۳۰	۱/۳۲ – ۱/۵۰	۷/۵۸ – ۷/۷۵	۴۸۲/۳۴ – ۵۹۷/۶۷	۲۷۱/۵۱ – ۳۷۸/۹۲
۳	سرطانی	۳	۰/۰۲۶ – ۰/۰۳۰	۱/۱۳ – ۱/۲۱	۱/۱۲ – ۱/۲۲	۳/۳۱ – ۳/۸۸	۲/۷۶ – ۲/۹۸	۱/۰۳۱ – ۱/۱۸	۱/۵۱ – ۲	۷/۷۶ – ۷/۸۹	۵۹۷/۶۸ – ۶۴۷/۶۷	۳۷۸/۹۳ – ۴۰۶
۴	سرطان عودکننده	۲	۰/۰۳۱ – ۰/۰۳۳	۱/۲۲ – ۱/۴۱	۱/۲۳ – ۱/۳۲	۳/۸۹ – ۴/۱۰	۲/۹۹ – ۳/۴۰	۱/۱۹ – ۱/۳۲	۲/۰۱ – ۲/۳۱	۷/۹۰ – ۷/۹۶	۶۴۷/۶۸ – ۶۶۹/۷۱	۴۰۶/۰۱ – ۴۴۳
۵	سرطان پیشرفته	۱	۰/۰۳۴ یا بیشتر	۱/۴۲ یا بیشتر	۱/۳۳ یا بیشتر	۴/۱۱ یا بیشتر	۳/۴۱ یا بیشتر	۱/۳۳ یا بیشتر	۲/۳۱ یا بیشتر	۷/۹۷ یا بیشتر	۶۶۹/۷۲ یا بیشتر	۴۴۳/۰۱ یا بیشتر

با توجّه به ضریب تعیین متوسّط مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن به میزان ۰/۸۷ پیش‌بینی می‌شود تا پایان مهرماه سال ۱۳۹۷ وضعیّت سلامت حوضۀ آبخیز به مقدار ۲۷ کاهش یابد و در محدودۀ سرطان عودکننده قرار گیرد (جدول ۸):

جدول ۸. مجموع امتیازات برآورد شده در سال ۱۳۹۵ و وضعیّت احتمالی حوضۀ آبخیز طالقان در سال ۱۳۹۶

ردیف	وضعیّت کیفی	وضعیّت کمی (ابراهیمی، ۱۳۹۶)	وضعیّت (۱۳۹۵)	وضعیّت (۱۳۹۶)
۱	سالم	۵۰-۴۴	-	-
۲	بیمار	۴۳-۳۶	-	-
۳	سرطانی	۳۵-۲۸	۳۵	-
۴	سرطان عودکننده	۲۷-۱۹	-	۲۷
۵	سرطان پیشرفته	۱۸-۱۰	-	-

بحث

الگوریتم بیان‌ژن، یکی از الگوهای پیش‌بینی مناسب رفتار داده‌ها است. در مجموعهٔ داده‌های کیفیّت آب، مقادیر اسیدیتهٔ آب، متغیّری است که کمترین تغییرات را در طول زمان نسبت به سایر متغیّرها دارد. اصولاً در متغیّرهایی که تغییرات کمتری دارند، دقّت مدل‌سازی دادها نیز بالاتر است (ستاری و همکاران، ۱۳۹۶). مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده، نشان می‌دهد ضریب تعیین پارامتر اسیدیته با مقدار ۰/۹۴، بیشترین همبستگی را دارد. علّت این امر، تغییرات اندک نسبت به سایر پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش است. در زمینهٔ مدل‌سازی یا پیش‌بینی داده‌ها، این قابلیّت را دارند تا رفتار آتی آنها قابل پیش‌بینی شود. زمانی که روند خطّی در مقادیر متغیّرها وجود داشته باشد، دقّت مدل‌سازی افزایش می‌یابد. مقادیر داده‌های کیفیّت آب که جزو داده‌های محیطی هستند، روندهای متفاوتی دارند به‌ویژه اینکه در طبیعت الگوی غیر خطّی سینوسی و کسینوسی متداول‌تر است. برای تطابق مدل‌سازی و پیش‌بینی الگوی داده‌ها، از معیارهای متفاوتی استفاده می‌شود که سه معیار میانگین خطای مطلق، ضریب تعیین و ریشهٔ میانگین مربعات خطا، کارایی بالاتری دارند. اصولاً داده‌هایی که انحراف از معیار بالاتری دارند، ضریب تعیین کمتری دارند. در زمینهٔ مدل‌سازی، انتخاب متغیّرهای مؤثّر در مدل، اهمّیّت بالایی دارند، زیرا نتایج به‌دست‌آمده را تحت تأثیر قرار می‌دهند (آهن و کیم[1]، ۲۰۱۷). تغییر در رفتار طبیعی داده‌ها به‌ویژه با استفاده از معادلات تجربی ممکن است نتایج نادرستی را ایجاد نماید (امامقلی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵)؛ زیرا با توجّه به بُعد زمان و مکان، نتایج ممکن است تغییر یابد که در این پژوهش نیز، عدم کارایی نرمال‌سازی مشخّص شد. مقایسهٔ استفاده از داده‌های نرمال و طبیعی نشان می‌دهد، نرمال‌سازی از طریق معادلهٔ ارائه‌شده نتوانسته است دقّت مدل را افزایش دهد.

در تعیین مقادیر مرجع به‌عنوان شاخص استاندارد هر متغیّر، اگرچه مقادیر مشخّصی به‌عنوان حدود استاندارد در نظر گرفته شده است؛ امّا با توجّه به پتانسیل هر سرزمین متفاوت است؛ بنابراین، مقادیر آستانه در هر حوضهٔ آبخیز متفاوت است. در طول دورهٔ آماری این پژوهش، مقادیر هدایت الکتریکی و مجموع موادّ محلول به‌ترتیب ۴۸۳/۳۳ و ۲۷۱/۵۰ است که در ردهٔ وضعیّت سالم طبقه‌بندی می‌شود. داده‌های ثبت‌شده، مقادیر بهتری را در این حوضه نشان نمی‌دهند. مقادیر کیفیّت آب زمانی که از متغیّرهای مربوط به پتانسیل حوضهٔ آبخیز استفاده می‌شود، روند نسبتاً ثابتی را در طول زمان نشان می‌دهد. در متغیّرهایی نظیر آلاینده‌ها، وضعیّت لحظه‌ای مؤثّر است و ناشی از جنس سنگ مادر نیست (حقیقت‌جو و همکاران، ۱۳۹۶؛ برجی حسن گاویار و همکاران، ۱۳۹۶). داده‌های طبیعی به‌ویژه میانگین سالانه حرکت آهسته‌ای دارند و آشفتگی‌هایی که ناشی از فعّالیّت‌های انسانی است این روند را تغییر می‌دهد. داده‌های محیط طبیعی در بسیاری از ابعاد نظیر بارش، خشکی، رواناب، الگوی خطّی ندارند و یا بسیار نادر است؛ بنابراین، زمانی که برنامه‌ریزی بیان‌ژن با عملگرهایی نظیر سینوس و کسینوس انجام می‌شود، به رفتار واقعی داده نزدیک‌تر است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های کیفیّت آب در ایستگاه گلینک استان البرز انجام شد. نتایج این تحقیق مشخّص کرد که نرمال‌سازی داده‌ها به منظور کاهش حجم داده‌ها و افزایش سرعت تجزیه و تحلیل آنها می‌تواند نتایج حقیقی مدل‌سازی را تحت تأثیر قرار دهد؛ همچنین مقادیر مرجع هر متغیّر در هر حوضهٔ آبخیز با توجّه به پتانسیل آن متفاوت است و نمی‌توان نقاط مرجع یکسانی را برای تمام حوضه‌های آبخیز ایران

---

[1] Ahn & Kim.

پیشنهاد کرد. تغییرات در روند داده‌های طبیعی به‌ویژه در مقیاس سالانه کُند است و توصیه می‌شود به عامل این تغییرات توجّه ویژه‌ای گردد و در مدل لحاظ شود. نتایج این پژوهش نشان داد مدل‌سازی داده‌ها با استفاده از بیان‌ژن به لحاظ سرعت در پردازش داده‌ها و دقّت در نتایج، قابل قبول است و دقّت بیش از ۷۰٪ را در تمامی متغیّرها بیان می‌کند؛ همچنین پیشنهاد می‌شود مدل‌سازی داده‌های کیفیّت آب با استفاده از نرمال‌سازی اعداد و شرایط طبیعی در سایر حوضه‌های آبخیز انجام شود تا دقّت مدل در هر دو حالت بررسی شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب سپاسگزاری خویش را از همکاری‌های خانم دکتر سلیمی کوچی، کارشناس ارشد آبخیزداری سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور که در تهیّهٔ جدول‌های مرجع، ما را یاری فرمودند، اعلام می‌نمایند.

منابع

ابراهیمی، پیام (۱۳۹۶) **بررسی و مدل‌سازی روند تغییرات شاخص‌های سلامت و پایداری حوضهٔ آبخیز (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبخیز طالقان)**، رسالهٔ دکتری علوم و مهندسی آبخیز، گرایش آب، اساتید راهنما: علی سلاجقه و محسن محسنی ساروی، دانشگاه تهران، تهران.

امامقلی‌زاده، صمد؛ کریمی دمنه، راضیه؛ اژدری، خلیل (۱۳۹۵) مقایسهٔ روش‌های متداول برآورد بار رسوب معلّق رودخانهٔ کرخه با روش برنامه‌ریزی بیان‌ژن، **جغرافیا و توسعه**، ۱۴ (۴۵)، صص. ۱۴۰-۱۲۱.

باباعلی، حمیدرضا؛ دهقانی، رضا (۱۳۹۶) مقایسهٔ مدل‌های هوشمند در تخمین بارش ماهانهٔ حوضهٔ کاکارضا، **اکوهیدرولوژی**، ۴ (۱)، صص. ۱۱-۱.

برجی حسن گاویار، مسلم؛ مقدم‌نیا، علیرضا؛ ساجدی، فرزانه (۱۳۹۶) بررسی کارایی دو روش داده محور در پیش‌بینی بارندگی ماهانه، **پژوهش‌های دانش زمین**، ۸ (۳۱)، صص. ۶۱-۴۲.

بهمنش، جواد؛ مصطفوی، سمیه؛ زمان‌زاد قویدل، سروین (۱۳۹۶) استفاده از محاسبات نرم در پیش‌بینی و برآورد دبی جریان و بررسی جریان زیست‌محیطی (مطالعهٔ موردی: رودخانهٔ خرخره چای)، **نشریهٔ مهندسی عمران و محیط‌زیست**، ۴۷ (۳)، صص. ۲۲-۹.

حقیقت‌جو، پرویز؛ محمدزاده شاهرودی، زهرا؛ محمدرضاپور، ام البنی (۱۳۹۶) مقایسه روش‌های سیستم استنتاج عصبی-فازی و برنامه‌ریزی بیان‌ژن در برآورد تبخیر از تشتک (مطالعهٔ موردی: استان خراسان جنوبی)، **نشریهٔ حفاظت منابع آب‌وخاک**، ۶ (۴)، صص. ۱۱۷-۱۰۷.

دهقانی، رضا؛ قربانی، محمدعلی؛ تشنه‌لب، محمد؛ ریخته‌گر غیاثی، امیر؛ اسدی، اسماعیل (۱۳۹۴) مقایسه و ارزیابی مدل‌های شبکه عصبی بیزین، برنامه‌ریزی بیان‌ژن، ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون خطی در تخمین بده جریان؛ مطالعه موردی حوضه صوفی چای، **مهندسی آبیاری و آب**، ۵ (۲۰)، صص. ۸۵-۶۶.

زمانی، رضا؛ احمدی، فرشاد؛ رادمنش، فریدون (۱۳۹۳) مقایسهٔ روش‌های برنامه‌ریزی بیان‌ژن، سری زمانی غیر خطّی، خطّی و شبکهٔ عصبی مصنوعی در تخمین دبی روزانه (مطالعهٔ موردی: رودخانهٔ کارون)، **نشریه آب‌وخاک**، ۲۸ (۶)، صص. ۱۱۸۲-۱۱۷۲.

ستاری، محمدتقی؛ میرعباسی نجف‌آبادی، رسول؛ عباسقلی نایب‌زاد، مهدی (۱۳۹۶) استفاده از داده‌کاوی در پیش‌بینی کیفیّت آب‌های سطحی (مطالعهٔ موردی: رودخانه‌های دامنهٔ شمالی سهند)، **اکوهیدرولوژی**، ۴ (۲)، صص. ۴۱۹-۴۰۷.

سلگی، اباذر؛ زارعی، حیدر؛ گلابی، محمدرضا (۱۳۹۶) بررسی عملکرد مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن با روش‌های پیش‌پردازش داده‌ها جهت مدل‌سازی جریان رودخانه، **پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک**، ۲۴ (۲)، صص. ۱۸۵-۲۰۱.

قبادیان، رسول؛ قربانی، محمدعلی؛ خلج، معصومه (۱۳۹۲) بررسی عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن در روندیابی سیلاب رودخانهٔ زنگمار در مقایسه با روش موج دینامیکی، **نشریهٔ آب‌وخاک**، ۲۷ (۳)، صص. ۵۹۲-۶۰۲.

قربانی، محمدعلی؛ دهقانی، رضا (۱۳۹۵) کاربرد شبکه‌ای عصبی بیزین، ماشین بردار پشتیبان و برنامه‌ریزی بیان‌ژنی در تحلیل بارش رواناب ماهانه (مطالعهٔ موردی: رودخانهٔ کاکارضا)، **علوم و مهندسی آبیاری**، ۳۹ (۲)، صص. ۱۲۵-۱۳۸.

قربانی، محمدعلی؛ دهقانی، رضا (۱۳۹۶) مقایسهٔ روش‌های شبکهٔ عصبی بیزین، شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌ریزی بیان‌ژن در تحلیل کیفیّت آب رودخانه‌ها (مطالعهٔ موردی: رودخانه بالخلوچای)، **پژوهشنامهٔ مدیریت حوضهٔ آبخیز**، ۸ (۱۵)، صص. ۱۳-۲۴.

قربانی، محمدعلی؛ صالحی، ابوذر (۱۳۹۰) استفاده از برنامه‌ریزی بیان‌ژن در بررسی تغییرات داده‌های کیفی آب زیرزمینی با نوسانات سطح آب در دشت برخوار اصفهان، **ششمین کنگرهٔ ملّی مهندسی عمران**، سمنان، دانشگاه سمنان، https://www.civilica.com/Paper-NCCE06-NCCE06_0098.html

Ahn, S. R., Kim, S. J. (2017) Assessment of Integrated Watershed Health Based on the Natural Environment, Hydrology, Water Quality, and Aquatic Ecology, **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 21, 5583-5602.

Fithriasari, K., Brodjol, N., Sutikno, U., Kuswanto, H. (2013) Prediction of Hourly Rainfall Using Bayesian Neural Network with Adjusting Procedure, **The Third Basic Science International Conference**, M24, pp. 1-5.

Grosel, P., Zadnik Stirn, L. (2015) The Environmental Management Problem of Pohorje, Slovenia: A New Group Approach within ANP - SWOT Framework, **Environ Manage**, 161, pp. 106-112.

Karimi, S., Shiri, J., Kisi, O., Shiri, A. A. (2015) Short-Term and Long-Term Stream Flow Prediction by Using 'Wavelet-Gene Expression' Programming Approach, **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, 22 (2), pp. 1-15.

Petousis, P., Han, S. X., Aberle, D., Bui, A. A. (2016). Prediction of Lung Cancer Incidence on the Low-Dose Computed Tomography Arm of the National Lung Screening Trial: A Dynamic Bayesian Network, **Artif Intell Med**, 72, pp. 42-55.

Terzi, O. (2013) Daily Pan Evaporation Estimation Using Gene Expression Programming and Adaptive Neural Based Fuzzy Inference System, **Neural Computing and Applications**, 23 (3-4), pp. 1035-1044.

Yahya, S. M., Rahman, A. U., Abbasi, H. N. (2012) Assessment of Seasonal and Polluting Effects on the Quality of River Water by Using Regression Analysis: A Case Study of River Indus in Province of Sindh, Pakistan, **International Journal of Environmental Protection**, 2 (2), pp. 10-16.

Yassin, M. A., Alazba, A. A., Mattar, M. A. (2016) Artificial Neural Networks Versus Gene Expression Programming for Estimating Reference Evapotranspiration in arid Climate, **Agricultural Water Management**, 163, pp. 110-124.