جغرافیا و روابط انسانی، زمستان ۱٤۰۳، دوره۷، شماره٤، صص۳۳۷-۳۱٦

پیش‌بینی جریان بار معلق رسوب با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن (مطالعه موردی: حوضه آبریز ناورود گیلان)

موسی عابدینی*[۱]، طیبه بابایی اولم[۲]

۱. استاد، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیای طبیعی، اردبیل، ایران.
Abedini@uma.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیای طبیعی، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت:۱٤۰۲/۰۹/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۲/۱۱/۰٤

چکیده

برآورد دبی بار رسوبات معلق رودخانه‌ها به‌دلیل تأثیرگذاری بر طراحی و مدیریت سازه‌های آبی، در مهندسی آب، هیدرولیک و محیط طبیعی مهم می‌باشد. تاکنون تلاش‌های گوناگونی جهت برآورد دقیق بار رسوبات معلق توسط پژوهشگران انجام شده است که برای مثال می‌توان به برقراری رابطه بین دبی جریان و دبی رسوب اشاره نمود. مشکل این روش عدم قطعیت آن می‌باشد. از این‌رو، شماری از محققان به روش‌های هوشمند و الگوریتم‌های تکاملّی روی آورده‌اند. در پژوهش حاضر به منظور بررسی کارآیی و دقت روش برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی رسوب بار معلق رودخانه ناورود در استان گیلان با استفاده از نرم‌افزار (GEP)، از داده‌های متوسط بارندگی، میانگین دبی رواناب، متوسط دمای حداکثر، متوسط دمای حداقل و میانگین دمای سالانه حوضه، به عنوان متغیرهای ورودی و همچنین داده‌های رسوب بار معلق مشاهده‌ای در ایستگاه هیدرومتری خرجگیل اسالم، به‌عنوان متغیر خروجی در دوره آماری مشترک ۲۰ ساله (از سال آبی ۷۵-۷٤ لغایت ۹٤-۹۳) استفاده گردید. برای این کار، مقادیر رسوبات بار معلق حوضه از روش منحنی سنجه، مقادیر متوسط بارندگی از روش منحنی‌های هم‌باران با استفاده از مدل Kriging در محیط نرم‌افزار GIS و مقادیر سه شاخص درجه حرارت سالانه از طریق روابط گرادیان حرارتی منطقه برای سال‌های آماری مختلف برآورد گردید. جهت دست‌یابی به ساختار مناسب بین ورودی‌ها و خروجی مدل، اطلاعات ۱۳ سال اول آماری برای آموزش برنامه و ۷ سال باقی‌مانده برای صحت‌سنجی آن به کار گرفته شد و به منظور شناسایی ورودی‌های مؤثر، تعداد ٦ الگوی مختلف بر اساس ترکیب داده‌های ورودی طراحی گردید. در نهایت، برای تعیین مناسب‌ترین رابطه جهت پیش‌بینی رسوبات حوضه، از دو شاخص معتبر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R^2) استفاده گردید. نتایج نشان داد، با ساختار متوسط بارندگی، میانگین دبی رواناب، متوسط حداکثر و میانگین دمای سالانه حوضه، ضریب همبستگی (R^2) بین داده‌های محاسباتی و مشاهده‌ای در دوره صحت‌سنجی به بیشترین مقدار خود (۸٤٪) و مقدار شاخص RMSE به کمترین مقدار خود (۱.۰٦) می‌رسد. در نتیجه ساختار فوق به‌عنوان مناسب‌ترین الگوی ورودی جهت تخمین رسوبات سالانه حوضه پذیرفته شده و بر این اساس و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی MATLAB و به کارگیری چهار عملگر اصلی حسابی، رابطه نهایی برای تخمین رسوب حوضه استخراج گردید.

کلیدواژه‌ها: رسوب بار معلق، رودخانه ناورود، بیان ژن، RMSE، GEP.

DOI: 10.22034/GAHR.2023.430933.2007 شاپا الکترونیکی:3851-645

مقدمه

موضوع فرسایش خاک یک مشکل جهانی است که منابع آب و خاک را تهدید میکند و تغییرات کاربری اراضی یکی از عوامل مهم در فرسایش خاک است(عابدینی و همکاران ،۱٤۰۱). افزایش روزافزون جمعیت جهانی خصوصا از نیم قرن گذشته، دخالت شدید در منابع آب و خاک(فشار بر زمین)، موجب شده که مطالعات فرسایش خاک به عنوان یکی از مهمترین مسائل در ابعاد مختلف آن مانند عوارض زیستمحیطی، توسعه پایدار کشاورزی و تولید غذا و غیره، هر چه بیشتر مورد توجه قرارگیرد(عابدینی،۱۳۹۹). یکی از مهمترین مسائل و مشکلات حوضههای آبریز، رسوبات بار معلق رودخانهها است که بهدلیل اثرات منفی آن مانند فرسایش نقاط بالادست، تجمع رسوبات در پاییندست، تقلیل گنجایش مخازن آبی، تغییر در مورفولوژی و کیفیت آب رودخانه ها و همچنین مسائل زیستمحیطی، بررسی و برآورد دقیق آن از اهمیت ویژهای برخوردار است. بهدلیل نبود آمار کافی و مشکلات اندازهگیری مستقیم بار رسوب معلق روزانه در ایستگاههای هیدرومتری، تعیین روشی مناسب و دقیق جهت پیشبینی بار رسوبی رودخانهها بهعنوان یکی از مهمترین چالشها در مدیریت حوضههای آبریز کشورمان محسوب میگردد. امروزه روشهای هوشمند مصنوعی به خاطر قابلیت شبیه سازی فرآیندها در زمینههای مختلف، برای پیشبینی و تولید آمار مصنوعی کاربرد زیادی پیدا کردهاند. با ادامه سیرتکاملی این مدلها، برنامهریزی بیانژن [1] (GEP) در مطالعات مربوط به آب، به ابزارهای مدل سازی مسائل مربوط به تعیین ساختار پدیدهها افزوده شد. این روش جزء روشهای الگوریتم گرد شی محسوب می شود 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 برای تصحیح ساختار دادهها به کار میگیرند و در نهایت، روش حل مناسب را ارائه مینمایند. روش برنامهریزی بیان ژن جدیدترین شیوه در بین روشهای الگوریتم تکاملی میباشد که بهدلیل دارا بودن دقت کافی، مرسومترین شیوه بوده و از کاربرد بیشتری برخوردار است. اگرچه پژوهشهای متنوعی در خصوص کاربرد اینگونه مدلها و برتری دقت آنها بر روشهایی همچون منحنی سنجه رسوب، روش فائو و غیره ارائه شده است، ولی بهدلیل غیرصریح بودن این مدلها، استفاده از آنها در عمل بهطور مناسب توسعه نیافته است. لذا توسعه یک مدل صریح جهت تعیین بار رسوبی رودخانهها با استفاده از ورودیهایی نظیر دبی جریان و برخی از عناصر اقلیمی (بارش و دما و ...)، ضرورت مییابد. تحقیقات گذشته نشان میدهد که در استفاده از محاسبات نرم (مثل برنامهریزی ژنتیک و شبکههای عصبی و ...) برای تولید آمار به بعضی از مشکلات مدلهای فیزیکی غلبه میشود (عبادی فر و همکاران، ۱۳۹۷). تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با برآورد جریان بار معلق رسوب با استفاده از برنامهریزی بیان ژن در داخل و خارج کشور انجام شده است برای مثال، خاو [2]

[1]- Gene Expression Programming
[2]- Khu

و همکاران (۲۰۰۱) در پژوه شی برای پیش‌بینی رواناب بر روی داده حو ضه اورگول فراز سه به مقای سه نتایج روش‌های کلا سیک و برنامه‌ریزی ژنتیک پرداخته و به دقت قابل قبول روش برنامه‌ریزی ژنتیک در م شاهدات خود ا شاره کرده‌اند. بابوویچ و کیزر[1] (۲۰۰۶)، مدل سازی رواناب بارندگی را با ا ستفاده از برنامه‌ریزی ژنتیکی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها ن شان داد که با ا ستفاده از مدل‌های مبتنی بر داده‌ها مانند برنامه‌ریزی ژنتیکی (GP)، می‌توان رواناب را بر ا ساس داده‌های آب‌وهوا شنا سی موجود مدل سازی کرد. این کار به ا ستفاده از برنامه‌ریزی ژنتیکی برای ایجاد مدل‌های بارش–رولناب تنها بر ا ساس داده‌ها و همچنین در ترکیب با مدل‌های مفهومی کارایی بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. آیتک[2] و همکاران (۲۰۰۸)، جهت مدل سـ ـازی بـ ـارش رواـ ـاب در حوضه رودخانه جونیاتا در پن سیلوانیای آمریکا از دو روش شبکه ع صبی م صنوعی و برنامه‌ریزی بیان ژن ا ستفاده کردند. مقایسه نتـایج آن‌ها نشـان داد که روش برنامه‌ریزی بیان ژن در مقایسه با شبکه عصـبی مصـنوعی، عملکرد بهتری داشته است. کیشی[3] (۲۰۱۰) بـ ـا استفاده از ترکیب روش‌های شبکه عصبی م ـصنوعی و تبدیل موجک گسسته بار معلق روزانه را شـبیه‌سـازی نمود. در این پژوهش از داده‌های دو ایستگاه بـر روی رودخانه تانگوی مونتانا استفاده شد. نتایج نشان داد که روش عـصبی- موجـک مـی‌توانـد دقـت بـرآورد را افزایش دهد. در پژوهشی دیگر گوون و تالو[4] (۲۰۱۰) در حوزه آبخیز فرات میانی در ترکیه، مقدار ر سوب بار معلق با ا ستفاده از مدل‌های GEP، رگر سیون خطی و منحنی سنجه ر سوب برآورد شد. در این پژوهش از داده‌های ایستگاه هیدرومتری هنیس کریک مربوط به سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۷ که شامل ٦٦ در صد از داده‌ها بود، برای آموزش مدل‌ها و از داده‌های مربوط به سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ (۳۳ در صد کل داده‌ها) برای آزمون مدل‌ها ا ستفاده شد. در این پژوهش متغیرهای ورودی در دو گروه داده‌های دبی روزانه و ر سوب متناظر با آن و همچنین دبی روزانه و ر سوب با تأخیر سه روز، قرار گرفتند. انتخاب این ترکیبات به صورت د ستی و ت صادفی انجام شد. نتایج این پژوهش ن شان داد که مدل GEP با ضریب همبستگی ۹۹٪ و کم‌ترین میزان خطا بر ا ساس شاخص RMSE ، کارآمدترین مدل در برآورد ر سوبات بار معلق مقای سه با سایر مدل‌ها بود. جها و ساهو[5] (۲۰۱٤)، اثربخ شی شبکه ع صبی و تکنیک‌های الگوریتم ژنتیک در شبیه سازی نو سانات مکانی – زمانی آب‌های زیرزمینی پرداختند. نتایج آن‌ها ن شان‌دهنده این بود که مدل پر سپترون چند لایه لونبرگ–مارکوارت در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی ماهانه تقریباً در تمام ۱۷ سایت کارآمدترین ا ست، در حالی که مدل تابع پایه شعاعی کم‌ترین کارایی را دارد. همچنین م شخص شد که تکنیک GA ن سبت به روش آزمایش و خطای رایج برای تعیین بهینه ANN و پارامترهای داخلی برتر ا ست. از آمارهای برازش ا ستفاده شده در این مطالعه، تنها خطای ری شه میانگین مربع، رلندمان r2 و نش– ساتکلیف در ارزیابی عملکرد مدل‌های ANN

[1]- Babovic and Keijzer
[2]- Aytek
[3]- Kishi
[4]- Guven and Talou
[5]- Jha and Sahoo

قدرتمندتر و مفیدتر بودند. از طرفی مدل ژن به طور موثر برای پیش بینی نو سانات مکانی-زمانی آب زیرزمینی در مقیاس حو ضه یا زیرحو ضه می‌تواند ا ستفاده شود. دیزاج[1] و همکاران (۲۰۲۰)، به‌منظور پیش‌بینی و تعیین آنالیز ح سا سیت آب زیرزمینی که در منطقه آنتالیا ترکیه با ا ستفاده از مدل GEP پرداختند. نتایج آن‌ها ن شان دادکه که این آبخوان از نظر طبقه‌بندی آلودگی در محدوده مناطق آ سیب‌پذیر قرار دارد. در پژوه شی دیگر یاداو[2] و همکاران (۲۰۲۲)، به منظور برآورد و تخمین میزان بازده رسوب معلق با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک در رودخانه ماهاندی هند پرداختند. نتایج آن‌ها ن شان داد که مدل ANN-GA دارای بی شترین ضریب همب ستگی (۰/۸۷) و کم‌ترین ری شه میانگین مربعات خطا (۰/۰۰۸۸) در بین تمام SRC، ANN و MLR مقای سه‌ای ا ست. بنابراین، ANN-GA منا سب‌ترین مدل در مقایسه با سایر مدل‌های برر سی شده برای تخمین SSY در حو ضه MR، هند، به‌ویژه در ایستگاه اندازه‌گیری Tikarapara ا ست. اگر هیچ اندازه‌گیری SSY در MR موجود نبا شد، می‌توان از رویکرد مدل سازی برای تخمین SSY در ایستگاه‌های اندازه‌گیری‌نشده در حوضه MR استفاده کرد. مهر[3] و همکاران (۲۰۲۱)، با ا ستفاده از مدل ترکیبی برنامه‌ریزی بیان ژن به پیش‌بینی کوتاه و بلندمدت جریان رودخلنه فلیوس در کشور ترکیه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل ترکیبی برنامه‌ریزی ژن عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های Arma، ANN، و ANFIS دارد. شلمانی[4] و همکاران (۲۰۲۲)، پیش بینی بار رسوب معلق روزانه با ا ستفاده از ژنتیک برنامه نویسی بیان و مدل های شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج این مطالعه ن شان داد که مدل‌های هو شمند قادر به تخمین دقیق مقدار SSL ه ستند. همچنین ا ستفاده از تکنیک‌های پیش پردازش SOM و آزمون گاما باعث افزایش قدرت تعمیم مدل ها می شود. از طرفی انتخاب تاثیرگذارترین متغیرها و بهترین ترکیب آن ها به‌ترتیب قدرت مدل سازی و دقت برآورد SSL را افزایش می‌دهد. ساخنا[5] و همکاران (۲۰۲۳)، به منظور برر سی اثربخ شی مدل برنامه‌ریزی ژن برای تجزیه و تحلیل کیفیت آب در منطقه اوتار پرادش هند پرداختند. نتایج آن‌ها ن شان داد که مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی دقیق مقادیر DO و کیفیت آب کارایی بالاتری نسبت به مدل‌های مشابه است. در داخل نیز امامقلی‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهش خود به منظور پیش‌بینی بار رسوب معلق ای ستگاه‌های هیدرومتری جلوگیر و پای‌پل واقع در بالاد ست سد مخزنی کرخه، از روش برنامه‌ریزی بیان‌ژن ا ستفاده نموده و نتایج بد ست آمده را با نتایج روش‌های منحنی سنجه رسوب و فائو مقایسه نمودند. برای این کار، در سناریوی اول از اطلاعات دبی جریان و دبی رسوب ای ستگاه‌ها و در سناریوی دوم از اطلاعات ارتفاع باران حو ضه آبریز نیز ا ستفاده گردید. نتایج نشان داد سناریوی دوم عملکرد بهتری در مقایسه با سناریوی اول داشته است. همچنین، مقایسه نتایج اجرای این مدل در بخش آزمون سناریوی دوم ن شان داد که این روش نسبت به روش منحنی سنجه رسوب، میزان خطای

[1]- Dizaji
[2]- Yadav
[3]- Mehr
[4]- Shalmani
[5]- Saxena

RMSE و MAE را به مقدار ۹۱٪ و ۹٤٪ برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و ٦۰٪ و ۷۱٪ برای ایستگاه هیدرومتری پای پل کاهش داده ا ست. مقایسه همین نتایج با روش فائو نیز نشان‌دهنده کاهش خطای RMSE و MAE به میزان ۹۲٪ و ۹٦٪ برای ای ستگاه جلوگیر و ۸۵٪ و ۹۵٪ برای ای ستگاه پای‌پل می‌با شد. رنجبر و همکاران (۱۳۹۵) طی پژوهشی به مدل سازی دبی و دبی ر سوب رودخانه هراز آمل با ا ستفاده از برنامه‌ریزی بیان‌ژن (GEP) پرداختند. در این پژوهش با استفاده از آمار ٤۸ ساله ایستگاه کره سنگ با انتخاب ترکیبات مختلف ورودی با استفاده از برنامه‌ریزی بیان‌ژن (GEP) اقدام به مدل سازی رابطه دبی و دبی ر سوب گردید و با روش سنتی رابطه رگر سیونی خطی مورد مقایسه قرار گرفت. برای انتخاب روش مناسب از تجزیه و تحلیل آماری با مقایسه پارامترهای آماری شامل ضریب همبستگی (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و متوسط میانگین خطا (MAE) استفاده گردید و در نهایت مدل دارای کمترین خطا به عنوان مدل بهینه انتخاب شد. مقای سه این دو روش با معیار آماری ن شان داد که روش برنامه‌ریزی بیان‌ژن ن سبت به رگر سیون خطی عملکرد بهتری دا شته ا ست. عابدینی و همکاران (۱۳۹٦) در مورد پهنه‌بندی فر سایش خاک حو ضه رودخانه بالخلوچای کار کرده اند و نتایج ن شان داده که حدود ۲٦/۹۳ در صد از مساحت حوضه در محدوده با خطر فرسایش بسیار زیاد و زیاد و حدود ۳۰/۸۸ در محدوده با خطر فرسایش کم و بسیارکم قرار گرفته اند. آب وخاک، پایه و اساس حیات بشر به شمار میآیند. پاسبان و همکاران(۱٤۰۱) در با استفاد ه از مدل RUSLE در مورد فر سایش خاک حو ضه آبخیز بالیخلوچای در ا ستان را اردبیل کارکرده¬اند. نتایج تحقیق ن شان داده که مقدار متو سط فر سایش سالانه خاک برای کل حو ضه در دامنه بین ٦/٦۵ –تا ۱٤/۷۵ تن در هکتار در سال متغیر ا ست. همچنین برر سی روابط رگر سیونی بین = ۲ فاکتورهای مدل RUSLE و مقدار فر سایش سالانه خاک ن شان داد که فاکتور توپوگرافی)LS(با بالاترین مقدار ضریب تعیین R 95/0 بی شترین اهمیت را در برآورد فرسایش سالانه خاک به وسیله مدل RUSLE دارد. چعب و همکاران (۱۳۹٦) از روش‌های منحنی سنجه رسوب و فائو برای برآورد بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ واقع بر روی رودخانه دز استفاده نمود و نتایج آن را با نتایج روش برنامه‌ریزی بیان‌ژن مقای سه نمود. در این مطالعه از اطلاعات دبی جریان، دبی ر سوب و ارتفاع باران متناظر مربوط به سال‌های ۱۳۷۰–۹۵ ا ستفاده شد. ۸۰ در صد داده‌ها برای بخش آموزش و ۲۰ در صد برای بخش آزمون در نظر گرفته شدند. در روش GEP دو سناریو تعریف شد. نخ ست، تنها از اطلاعات دبی جریان و دبی ر سوب و بدون تأثیر بارش و در سناریوی دوم، علاوه بر دو پارامتر دبی جریان و دبی ر سوب از ارتفاع باران نیز در پیش بینی ر سوب معلق ا ستفاده شد. در نهایت، نتایج ن شان داد روش‌های منحنی سنجه ر سوب و فائو، با ضرایب همبستگی برابر با ۸۱٪ و ۸۰٪ در بخش آزمون از دقت قابل قبولی برخوردارند، اما در مقای سه با روش GEP در هر دو سناریو عملکرد پایینی داشته و برتری با روش GEP است و ضرایب همبستگی این روش در بخش آزمون برای سناریوی اول ۹۰٪ و برای سناریوی دوم ۹۲٪ به دست آمد که با برتری مدل GEP در سناریوی دوم همراه بود. علی

جانپور شلمانی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهش خود به ارزیابی مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن برای برآورد بار ر سوب معلق رود زرد بر ا ساس پیش پردازش داده‌ها با روش آزمون گاما پرداختند. در این پژوهش، داده‌های ای ستگاه هیدرومتری ما شین در حوزه آبخیز رود زرد با طول دوره آماری ۳٦ سال (۱۳۹۱-۱۳٥٦) مورد ا ستفاده قرار گرفت. متغیرهای ورودی به مدل GEP شامل دبی لحظه‌ای (Q)، متوسط دبی روزانه (Qi) و متوسط بارندگی روزانه (Pi) به همراه سه گام تأخیر زمانی و متغیر خروجی به مدل شامل بار رسوب معلق روزانه می‌باشد. برای کاهش در وقت و هزینه، پیش‌پردازش داده‌های ورودی به مدل GEP با ا ستفاده از روش آزمون گاما به‌د ست آمد و به همراه ترکیبات بدون پیش‌پردازش (آزمون و خطا) وارد مدل GEP شد. نتایج مقایسه بین تمامی مدل‌ها نشان داد که برترین ترکیب متغیر ورودی حا صل از آزمون گاما، با کمترین مقدار آماره‌ی خطای ا ستلندارد برابر صفر، آماره‌ی گاما برابر ۰/۰۰۰۰۹۲ و آماره‌ی Vratio برابر ۰/۰۱۲ و با ترکیب متغیرهای متو سط دبی روزانه به همراه دو گام تأخیر زمانی و متو سط بارندگی روزانه به همراه سه گام تأخیر زمانی، دقیق‌ترین و صحیح‌ترین برآورد را برای بار ر سوب معلق دا شت. این مدل دارای کمترین مقدار RMSE و بیشترین مقدار R2 و NSE در مقایسه با سایر مدل‌ها بود. بنابراین، استفاده از روش آزمون گاما به‌عنوان یک روش پیش‌پردازش داده‌ها توانست با انتخاب ترکیباتی از متغیرهای ورودی مناسب به مدل‌ها، به‌طور میانگین تا ٤۰ درصد مقدار خطای برآورد (RMSE) بار رسوب معلق روزانه را در مقایسه با ترکیبات ورودی حاصل از آزمون و خطا کاهش دهد و با افزایش تشابه بین مقادیر داده‌های مشاهداتی با داده‌های محا سباتی، عملکرد مدل GEP در برآورد بار ر سوب معلق را افزایش دهد. حاجیان (۱۳۹۹) طی پژوه شی عملکرد روش موسلی، شبکه عصبی مصنوعی و بیان‌ژن در برآورد رسوب‌دهی حوضه کسیلیان ایران را مورد مطالعه قرار داد. در این پژوهش با ا ستفاده از روش‌های فوق برآورد ر سوبدهی در خروجی حو ضه برای ۵۷ واقعه بارش در ا ستان مازندران انجام گردید و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقای سه شد. نتایج این مطالعه ن شان داد که مدل MUSLE نمی‌تواند ر سوبدهی حو ضه را در شکل و فرم ا صلی خودش برای منطقه مورد مطالعه پیش بینی کند. با این حال، عملکرد مدل MUSLE با تنظیم توان و ضریب مدل بهبود یافت. عملکرد مدل‌های GEP و ANN ن شان داد که هر دو مدل در برآورد ر سوبدهی حو ضه نتایج قابل اطمینانی دارند و عملکرد آنها از روش MUSLE کالیبره شده بهتر ا ست. علاوه بر این، نتایج ن شان داد که عملکرد مدل ANN برای برآورد ر سوبدهی حو ضه ک سیلیان با پنج نرون ورودی، چهار نرون پنهان و ۱ نرون خروجی (۱-٤-٥) بهتر از هر دو مدل GEP و MUSLE کالیبره شده بود. علی نژادی و همکاران (۱٤۰۰) در پژوه شی به منظور پیش‌بینی دبی میانگین روزلنه رودخلنه کارون، روش برنامه‌ریزی بیان‌ژن (GEP) را با روش های رگر سیون های پارامتر یک خطی (LR)، غیرخطی (NLR) و همچنین روش ناپارامتریک K مورد مقای سه قرار دادند. نتایج بد ست آمده حاکی از عملکرد بهتر مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن بر مبنای سه شاخص ضریب همب ستگی، جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق در مقای سه با سایر روش‌های

مورد برر سی بوده ا ست. همچنین، ارزیابی عملکرد مدل‌ها در پیش بینی مقادیر حداکثر آبدهی جریان ن شان داد که همه مدل‌ها میزان جریان را در بی شتر موارد کمتر از مقدار م شاهداتی تخمین زده‌اند. بهرامی و شهیدی (۱٤۰۰)، به منظور برر سی میزان آیب‌پذیری آبخوان به نیترات در د شت کرماز شاه از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن ا ستفاده کردند. نتایج آن‌ها حاکی از تولنایی بالای مدل در برآورد غلظت نیترات و بهبود مدل DRASTIC دا شت. همچنین جهت صحت سنجی و بهبود مدل از روش امتیازبندی شاخص آماری R^2 استفاده کردند که همبستگی معنی‌داری بین آن‌ها برقرار بود. رو ستایی و همکاران (۱٤۰۱)، میزان فر سایش و ر سوب حو ضه آبریز زیمکان در ا ستان کرماز شاه را با تاکید بر متغیرهای تاثیرگذار مورد مطالعه قرار دادند. یافته‌های آن‌ها ن شان داد که مقادیر فر سایش در دو مدل MPSIAC و EPM به‌ترتیب ۹/٥۱٤۲، ۲/٦٤۰۱ تن در سال و میزان ر سوب به ترتیب ٦۳/۲٤٦۱، ۷۲/۳٦۲٤ تن در سال و کلاس و شدت فر سایش‌پذیری حو ضه از لحاظ هدررفت خاک در و ضعیت شدید قرار دارد. در پژوهشی دیگر آرخی و همکاران (۱٤۰۲)، با هدف بررسی میزان تاثیر تغییرات کاربری اراضی بر روی فرسایش و رسوب در حوضه آبخیز کال‌آجی با استفاده از سنجش از دور و GIS را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که کی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در حو ضه آبخیز کال‌آجی از بین رفتن پو شش گیاهی مرتعی و تبدیل آن به ارا ضی کشاورزی می‌با شد. همچنین علل افزایش مقدار ر سوب در منطقه کال‌آجی تو سعه سطوح کاربری ارا ضی کشاورزی و کاهش سطوح مرتعی در بین سال‌های ۱۳٦٦ تا ۱۳۹۸ به میزان ۸۳/۱٦ در صد نسبت به سال ۱۳٦٦ می‌با شد. این تغییرات نقش مهم مراتع و پوشش گیاهی حوضه آبخیز کال‌آجی کاسته و موجب افزایش میزان رسوب خروجی زیرحوضه‌ها گردیده ا ست. عابدینی و همکاران.(۱٤۰۲) در مورد تاثیر تغییرات کاربری ارا ضی در یک دوره بیست سال بر میزان فر سایش و ر سوب حوزه ر ضی‌چای کار کرده‌اند، نتایج این تحقیق نشان داد که در طول بیست سال اخیر کاربری های مرتع، زراعت آبی، بایر در منطقه کاهش و در مقابل سطح اراضی زراعی دیم و مسکونی افزایش یافته است. در این بین بیشترین تغییر مربوط به افزایش ۲۷/٦۹ هکتاری اراضی زراعی دیم در منطقه می‌شود. همچنین نتایج بررسی تغییرات فر سایش ن شان داد میزان فر سایش از سال ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۸ از ٦/٤۹ به ٦/٤٦ تن در هکتار در سال کاهش یافته ا ست. عابدینی و همکاران(۱٤۰۱) در مورد فر سایش حوزه آبخیز رزن با ا ستفاده از منطق فازی، مدل‌های EPM و BLM کار کرده‌لند. **نتایج اعتبار سنجی مدل‌ها ن شان داده که نتایج مدل EPM با داده‌های برداشت شده در مطالعهٔ میدانی مطابقت بیشتری دارد که نشان‌دهندهٔ دقت مدل EPM در بررسی فرسایش در منطقهٔ مورد مطالعه ا ست. بر اساس پهنه‌بندی صورت‌گرفته با ا ستفاده از مدل EPM به‌ترتیب ۲۸/٤٤، ۳۲/۱٦، ۳۹/٤۰ درصد از مساحت منطقه در کلاس‌های خطر خیلی‌کم، کم، متوسط قرار گرفته است** عابدینی و همکاران (a۱٤۰۱) در تحقیقی اقدام به پهنه‌بندی فر سایش حو ضه آبریز رزن با ا ستفاده از مدل‌های منطق فازی، EPM و BLM به برآورد شدت فر سایش نمودند. نتایج به‌د ست آمده از مدل EPM ن شان داد که شدت فر سایش حو ضه

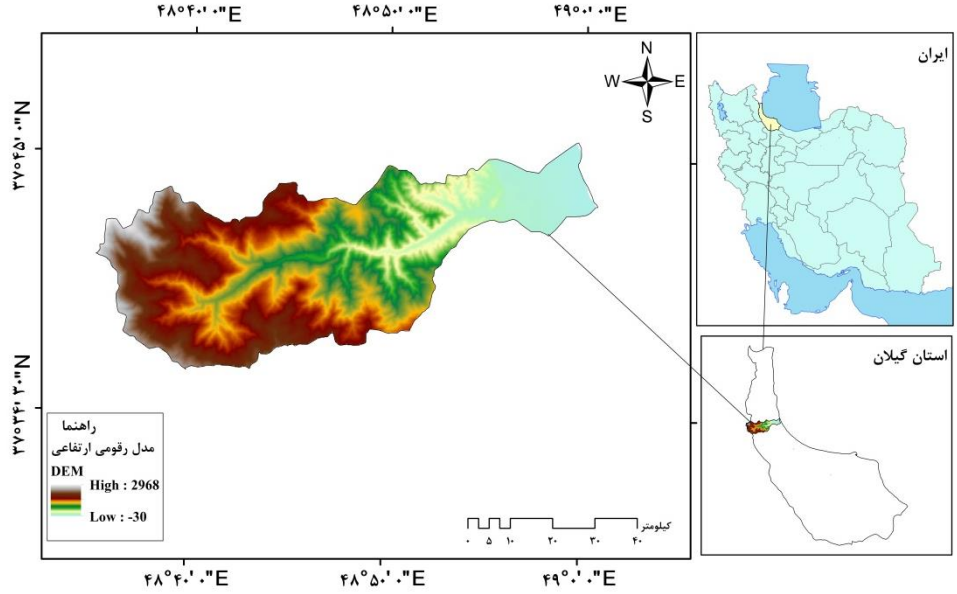
مورد مطالعه در کلاس فر سایش متو سط قرار دارد. عابدینی و همکاران (b۱٤۰۱) به مطالعه فر سایش خاک و تولید رسوب با استفاده از مدل MPSIAC در زیر حوضه‌های آبخیز کوزه‌توپراقی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار کل و متو سط فر سایش سالانه خاک حو ضه به‌ترتیب برابر با ۰ تا ۵۷/٦۲ و ۱۱/٦٦ تن در هکتار در سال به د ست آمد. مرادی‌نژاد و همکاران (۱٤۰۲) در پژوه شی به ارزیابی و مقای سه چهار روش مدل‌های فازی- ع صبی تطبیقی (ANFIS)، ما شین‌بردار پ شتیبان (SVM) و برنامه‌ریزی بیان‌ژن (GEP) و روش گروهی کنترل داده‌ها GMD در برآورد بار ر سوب ای ستگاه ح سن‌آباد رودخانه تیره ا ستان مرکزی پرداختند. بدین منظور عملکرد سه نوع مدل ماشین‌بردار پشتیبان (SVM)، سیستم عصبی فازی-تطبیقی (ANFIS) و برنامه‌ریزی بیان‌ژن (GEP) در شبیه‌سازی بار رسوبی رودخانه‌ها پرداخته، سپس نتایج سه روش با یکدیگر و با نتایج منحنی سنجه مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج بیانگر عملکرد قابل قبول مدل‌ها ن سبت به منحنی سنجه می‌با شد. همچنین نتایج برتری مدل (GEP) با بیش‌ترین ضریب تعیین R2 با مقدار۰/۹۹ و کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطا RMSE بر حسب تن در روز با مقدار ۰/۰۱۰ نشان داد. در این خصوص کارآیی مدل (SVM) تا حدی بهتر از مدل (ANFIS) بود. در مرحله بعد از بهترین الگوی انتخابی مدل‌های (ANFIS)، (SVM) و (GEP) به عنوان ورودی مدل GMD ا ستفاده شد. نتایج بیانگر عملکرد قابل قبول مدل GMD با بیش‌ترین ضریب تعیین R_2 برابر ۰/۹۹ و ۰/۹۸ و کم‌ترین ری شه میانگین مربعات خطا به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۳۸ و ۰/۰۰٤۵ تن در روز شد. نتایج به‌د ست آمده ن شان داد هر چهار روش داده‌کاوی برر سی شده به مراتب نتایج بهتری نسبت به منحنی سنجه رسوب ارائه می‌کنند. در این پژوهش، به منظور ارزیابی روش برنامه‌ریزی بیان‌ژن (GEP) برای پیش‌بینی ر سوب بار معلق رودخانه ناورود در غرب ا ستان گیلان، از داده‌های ر سوب و دبی م شاهده‌ای ای ستگاه هیدرومتری خرجگیل ا سالم و همچنین پارامترهای اقلیمی حو ضه آبریز آن شامل بارش و شاخص‌های حرارتی سالانه در دوره آماری م شترک ۲۰ ساله ا ستفاده گردیده و در نهایت منا سب‌ترین ترکیب ورودی‌ها تعیین شده است. با توجه به پاسخ مثبت مدل، نتایج بدست آمده از این پژوهش می‌تواند برای حوضه‌های فاقد آمار رسوب به کار رفته شود.

روش پژوهش

موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز ناورود با مساحت حدود ۳۲۰ کیلومترمربع، در دامنه‌های شرقی رشته کوه البرز (کوه‌های تالش)، بین طول‌های جغرافیایی '۳۵-°٤۸ تا '٥٤-°٤۸ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی '۳٦-°۳۷ تا '٤٥-°۳۷ درجه شمالی، در استان گیلان و شهرستان تالش قرار گرفته است. این حوضه، از سمت شمال به حوضه آبریز کرگانرود، از جنوب به حوضه‌های آبریز خاله‌سرا و لومیر، از غرب به حوضه آبریز آرپاچای خلخال و از شرق به دریای خزر متصل گردیده است. طولانی‌ترین شاخه رودخانه از دامنه‌های شرقی رشته‌کوه البرز و کوه‌های سلطه خونی، اسبه‌ریسه، هفته خونی و بغروداغ که قسمتی از کوههای تالش می‌باشند، سرچشمه گرفته و بعد از پیوستن شاخه‌های فرعی دیگر در جهت

غرب به شرق به مسیر خود ادامه و پس از عبور از شهر اسالم و طی مسافتی در حدود ۵ کیلومتر، به دریای خزر می‌ریزد (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت حوضه آبریز ناورود در استان گیلان و کشور

داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده

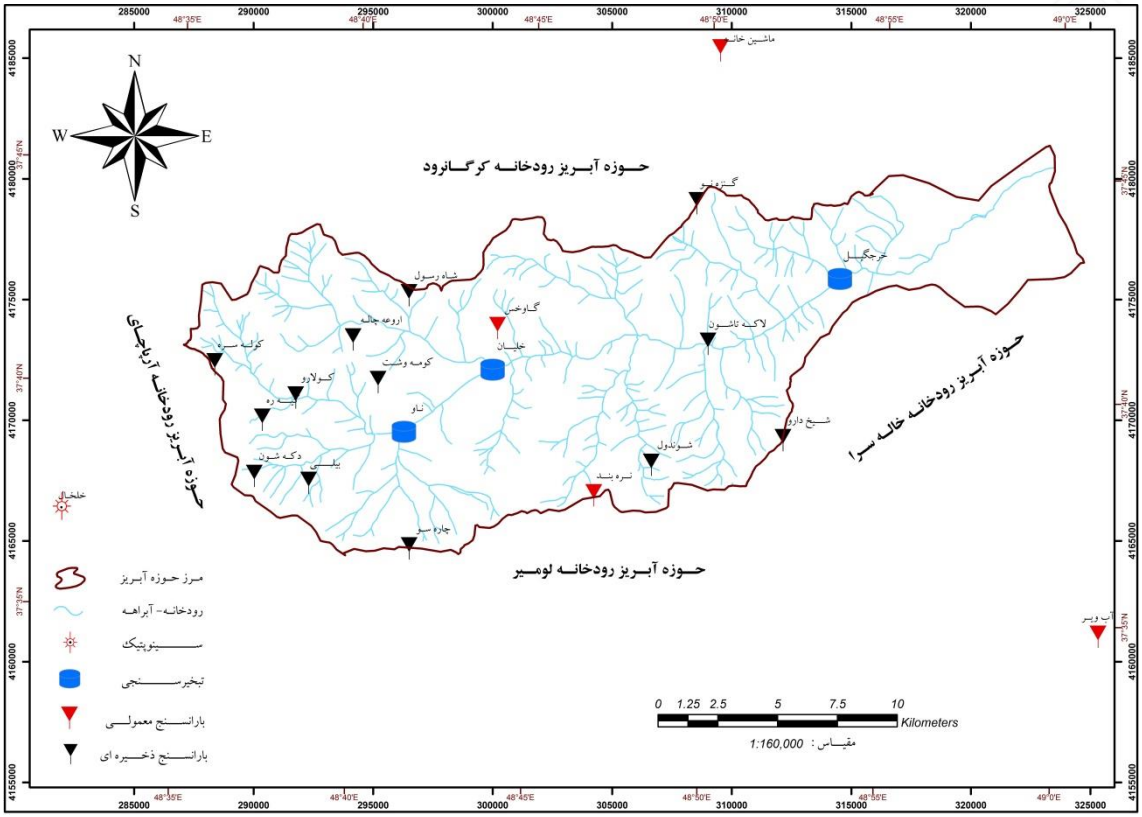
داده‌های آماری مورد نیاز در پژوهش حاضر شامل بارندگی، درجه حرارت، دبی جریان و رسوب بار معلق سالانه می‌باشد. پس از شناسایی و انتخاب ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری منطقه، نسبت به جمع‌آوری کلیه آمار و اطلاعاتی که قابل دسترسی بوده‌اند اقدام گردید. از آن‌جا که سازمان هواشناسی بر اساس سال میلادی و شرکت مدیریت منابع آب بر اساس سال آبی اقدام به جمع‌آوری و تدوین آمار می‌نمایند، گام اول در تحلیل داده‌های هواشناسی، هم تقویم نمودن آمار این دو سازمان می‌باشد. در این پژوهش جهت یکسان‌سازی آمار سازمان‌های فوق داده‌های بارندگی و درجه حرارت مربوط به ایستگاه سینوپتیک خلخال (متعلق به سازمان هواشناسی)، به‌صورت ماه‌های شمسی استخراج و به فرم سال آبی (مهرماه لغایت شهریورماه سال بعد) تبدیل گردید. با توجه به تعداد فراوان ایستگاه‌ها و نیز اختلاف طول دوره آماری آن‌ها، سعی گردیده است دوره آماری مشترک به نحوی انتخاب گردد که اولاً درصد قابل توجهی از آمار و اطلاعات موجود را پوشش داده و نیاز کم‌تری به فرایند بازسازی داده‌ها پیدا شود و ثانیاً دوره‌های خشکسالی و ترسالی را در برگیرد. از طرف دیگر، به لحاظ این که بیشتر ایستگاه‌های منطقه از سال ۱۳۷٤به بعد تأسیس شده‌اند، به این ترتیب دوره شاخص آماری ۲۰ ساله (از سال آبی ۷۵-۷٤ لغایت ۹٤-۹۳) به عنوان دوره پایه مشترک آماری انتخاب گردید.

بارندگی: جهت تعیین متوسط بارندگی سالانه حوضه برای تمامی سال‌های تحت مطالعه، با استفاده از داده‌های بارندگی بازسازی و تکمیل شده تعداد ۲۱ ایستگاه هواشناسی مختلف و قابلیت‌های نرم‌افزاری ArcGIS نقشه منحنی-های هم‌باران حوضه با به‌کارگیری روش Kriging برای تمامی سال‌های مورد مطالعه ترسیم و متوسط مقادیر بارندگی برای سال‌های مختلف محاسبه گردید (شکل ۳).

درجه حرارت: جهت تعیین سه شاخص حرارتی هوا، شامل متوسط حداکثر، متوسط حداقل و میانگین دمای سالانه، ابتدا روابط هر یک از این شاخص‌ها با ارتفاع از سطح دریا برای تمامی سال‌های آماری مورد مطالعه تعیین گردید (جدول ۱). سپس با جایگذاری متوسط ارتفاع حوضه (۱۳۹۸متر) در روابط به‌دست آمده، مقادیر شاخص‌های حرارتی مورد نظر برای سال‌های آماری مختلف محاسبه گردید. در جدول (۱) روابط شاخص‌های حرارتی سالانه منطقه با ارتفاع از سطح دریا ارائه شده است.

دبی رواناب: به منظور تعیین میزان دبی رواناب خروجی از حوضه آبریز ناورود در طول دوره آماری ۲۰ ساله، از داده‌های مشاهداتی کامل و بدون نقص در ایستگاه هیدرومتری خرجگیل که در محل ورود به دشت واقع گردیده و معرف خوبی برای رواناب حوضه می‌باشد، استفاده گردید. شکل(۲) موقعیت ایستگاه‌های آب و هواشناسی مورد مطالعه را نشان میدهد. در جدول (۲) مشخصات آبدهی سالانه ایستگاه خرجگیل ارائه شده است.

رسوب بار معلق: جهت برآورد مقادیر رسوب بار معلق سالانه رودخانه ناورود، از اطلاعات دبی و نمونه‌های رسوب بار معلق اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه هیدرومتری خرجگیل استفاده گردید. برای این کار ابتدا رابطه بین آب‌دهی لحظه‌ای و رسوب بار معلق در ایستگاه فوق، با استفاده از روش USBR تعیین و سپس با جای‌گذاری دبی روزانه در طول دوره آماری، مجموع رسوبات بار معلق رودخانه در سال‌های مختلف محاسبه گردید و در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۲: موقعیت ایستگاه‌های آب و هواشناسی مورد مطالعه، منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲

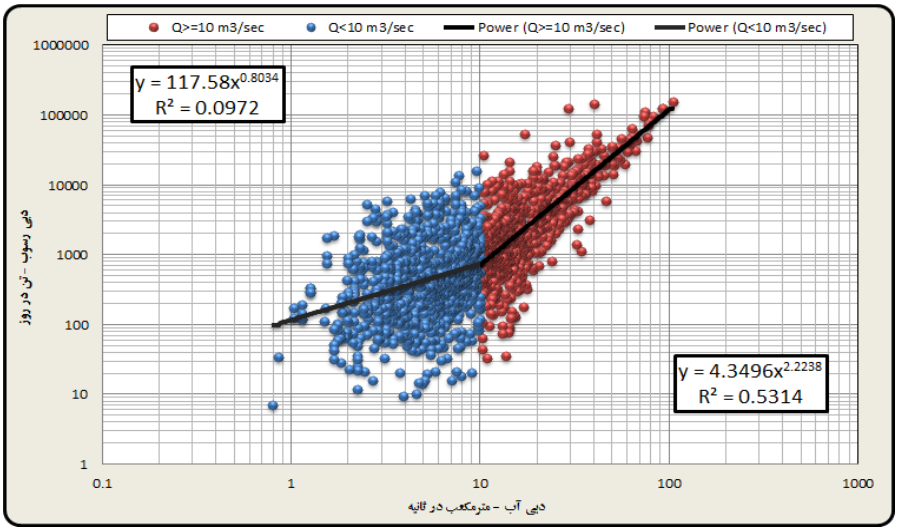
جدول ۱: روابط شاخص های حرارتی سالانه منطقه با ارتفاع از سطح دریا (به ترتیب از راست حداکثر، حداقل و میانگین)، (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

سال آبی	رابطهٔ گرادیان (Y=-aH+b)		ضریب همبستگی	سال آبی	رابطهٔ گرادیان (Y=-aH+b)		ضریب همبستگی	سال آبی	رابطهٔ گرادیان (Y=-aH+b)		ضریب همبستگی
	b	a			b	a			b	a	
74-75	20/1	0/0037	0/916	74-75		0/0049	0/958	74-75	15/6	0/0043	0/998
75-76	19/5	0/0031	0/929	75-76	13/0	0/0062	0/983	75-76	16/2	0/0047	1/00
76-77	19/3	0/0028	0/990	76-77	13/8	0/0063	0/989	76-77	16/5	0/0046	0/998
77-78	18/9	0/0018	0/922	77-78	14/3	0/0061	0/981	77-78	16/6	0/0039	0/998
78-79	18/9	0/0022	0/994	78-79	13/1	0/0058	0/993	78-79	16/5	0/0043	0/999
79-80	18/8	0/0023	0/936	79-80	14/5	0/0066	0/999	79-80	16/6	0/0044	0/998
80-81	19/2	0/0025	0/975	80-81	13/8	0/0059	0/994	80-81	16/5	0/0042	0/999
81-82	17/8	0/0023	0/953	81-82	12/7	0/0055	0/991	81-82	15/2	0/0039	0/998
82-83	19/5	0/0028	0/950	82-83	13/6	0/0057	0/990	82-83	16/6	0/0042	0/999
83-84	19/1	0/0029	0/969	83-84	12/8	0/0057	0/994	83-84	15/9	0/0043	1/00
84-85	19/6	0/0024	0/944	84-85	12/1	0/0047	0/979	84-85	15/8	0/0035	0/999
85-86	20/8	0/0042	0/991	85-86	9/8	0/0033	0/998	85-86	15/3	0/0037	0/995

0/995	0/0038	15/6	86-87	0/994	0/0044	10/8	86-87	0/945	0/0032	20/4	86-87
0/975	0/0034	15/1	87-88	0/987	0/0042	11/3	87-88	0/939	0/0025	18/8	87-88
0/994	0/0036	16/6	88-89	0/973	0/0038	12/0	88-89	0/998	0/0033	21/3	88-89
0/985	0/0041	16/5	89-90	0/995	0/0051	12/2	89-90	0/918	0/0031	20/7	89-90
0/988	0/0047	16/0	90-91	0/983	0/0053	11/1	90-91	0/992	0/0042	20/9	90-91
0/992	0/0045	17/5	91-92	0/997	0/0051	12/9	91-92	0/968	0/0040	22/05	91-92
0/981	0/0044	17/1	92-93	0/994	0/0052	12/3	92-93	0/918	0/0037	22	92-93
0/975	0/0038	16/4	93-94	0/994	0/0044	11/9	93-94	0/913	0/0032	20/8	93-94

جدول ۲: مشخصات آبدهی سالانه ایستگاه خرجگیل (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

سال آبی	حجم رواناب	ارتفاع رواناب	دبی
	(میلیون مترمکعب)	(میلی متر)	(مترمکعب در ثانیه)
74-75	**136**	**512**	**4/32**
75-76	**140**	**525**	**4/43**
76-77	**135**	**507**	**4/28**
77-78	**119**	**448**	**3/78**
78-79	**142**	**534**	**4/50**
79-80	**125**	**471**	**3/97**
80-81	**153**	**575**	**4/85**
81-82	**161**	**604**	**5/09**
82-83	**156**	**585**	**4/94**
83-84	**148**	**558**	**4/70**
84-85	**108**	**406**	**3/43**
85-86	**151**	**568**	**4/79**
86-87	**89**	**336**	**2/84**
87-88	**134**	**504**	**4/25**
88-89	**135**	**508**	**4/29**
89-90	**124**	**465**	**3/93**
90-91	**214**	**805**	**6/79**
91-92	**117**	**439**	**3/70**
92-93	**124**	**466**	**3/93**
93-94	**137**	**513**	**4/33**
میانگین	**137**	**517**	**4/36**



شکل ۳: منحنی سنجه رسوب بار معلق در ایستگاه خرجگیل (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

مدل بیان ژن (GEP): برنامه‌ریزی ژنتیک[1](GP) که جزء الگوریتم‌های تکاملی و از شاخه‌های الگوریتم ژنتیک[2](GA) است، یک روش نوین در هوش مصنوعی است و نخستین بار توسط جان کوزا در سال ۱۹۹۲ بر اساس تئوری داروین ارائه شد. این روش جزء الگوریتم‌های گردشی محسوب می‌گردد؛ به این ترتیب که جمعیتی در جهت تکامل به صورت انتخابی، جمعیت نامناسب را رها کرده و نسل‌های اصلاح شده ایجاد می‌کند. در این روش، در ابتدای فرآیند هیچ گونه رابطه تابعی در نظر گرفته نشده و این روش قادر به بهینه‌سازی ساختار مدل و مؤلفه‌های آن می‌باشد. با ادامه سیر تکاملی این الگوریتم، برنامه‌ریزی بیان‌ژن [3] (GEP) که بر روی ساختار درختی فرمول‌ها عمل می‌کند، در سال ۲۰۰۱ توسط فریرا مطرح گردید. ساختارهای درختی از مجموعه توابع و ترمینال‌ها ایجاد می‌شوند (قربانی و همکاران، ۱۳۹۱).

مدل بیان ژن (GEP) که توسعه یافته برنامه ژنتیک است با حذف محدودیت‌های GP و GA، دربرگیرنده مزایای هر دو روش است. این مدل نتایج خوبی را در مقایسه با روش‌های متداول رگرسیونی ارائه نموده و قابلیت تعمیم‌دهی روابط و نتایج به مسایل غیرخطی در مهندسی آب را دارد. در GEP فرایند با اعضای تصادفی از جمعیت اولیه شامل کروموزوم‌های مجزا با طول ثابت شروع می‌شود. هر کروموزم ممکن است حامل یک ژن یا بیشتر باشد و انتخاب آن‌ها بر اساس میزان سازگاری صورت می‌گیرد. هرچه کروموزوم‌ها سازگارتر باشند شانس بیشتری برای ابقا در محیط خواهند داشت. در GEP اعضا به شکل رشته‌های خطی با طول ثابت کدگذاری می‌شوند، اما به شکل غیرخطی با شکل و اندازه متفاوت و به بیان درختی تعریف می‌شوند و اصول اولیه داروین برای تهیه تایع برازش به کار گرفته می‌شود. مراحل اصلی برنامه‌ریزی بیان‌ژن به طور شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده است.

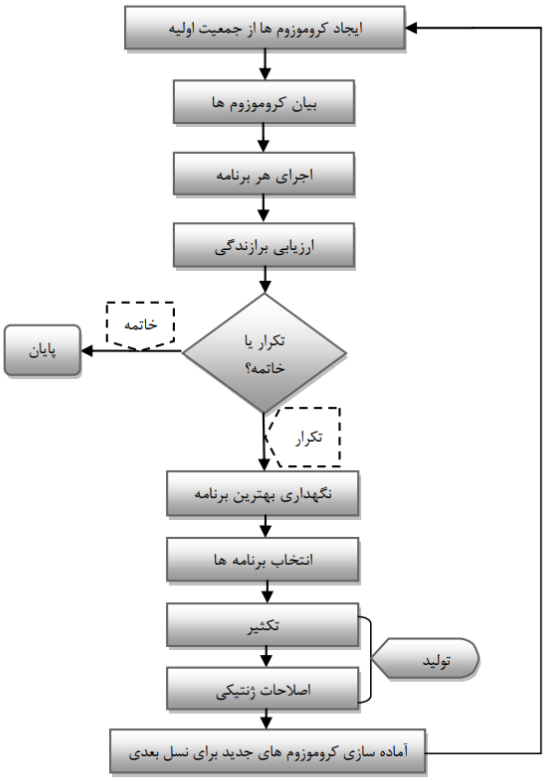
[1]- Genetic Programming
[2]- Genetic Algorithm
[3]- Gene Expression Programming

مجموعه این توابع شامل چهار عمل اصلی و توابعی چون {ex, sin, cos, tan, log, sqrt, ln} است. تابع برازش GEP به شکل زیر تعریف می‌شود (رنجبر و همکاران، ۱۳۹۵):

رابطه ۱

$$f_t = \sum_{j=1}^{n} (R - |P_{ij} - T_j|)$$

که در آن R محدوده انتخاب، P_{ij} مقدار پیش‌بینی شده و T_j مقدار مورد انتظار می‌باشد. در شکل (٤) فلوچارت برنامه‌ریزی بیان ژن ارائه شده است.



شکل ٤: فلوچارت برنامه‌ریزی بیان ژن (منبع: روشنگر و میرحیدریان، ۱۳۹۳)

ساختار مدل در پژوهش حاضر: پس از آماده‌سازی داده‌های بارش، شاخص‌های حرارتی سه‌گانه (حداکثر، حداقل و میانگین) و دبی رواناب که متغیرهای اصلی و موثر ورودی مدل را تشکیل می‌دهند و همچنین داده‌های رسوب بار معلق سالانه رودخانه که به عنوان تنها متغیرخروجی مدل محسوب می‌گردد، به منظور بررسی کارآیی و میزان توان-مندی روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در تخمین رسوب بار معلق سالانه حوضه، از قابلیت‌های نرم‌افزار قدرتمند (GeneXproTools4)، استفاده گردید. در این رابطه، اطلاعات ۱۳سال اول برای آموزش مدل و ۷سال باقی مانده برای صحت‌سنجی آن در نظر گرفته شد. سپس به منظور شناسایی ورودی‌های مؤثر، تعداد ٦ الگوی مختلف بر اساس ترکیب داده‌های ورودی، طراحی و در نهایت برای تعیین مناسب‌ترین رابطه جهت رسوب حوضه، از دو شاخص معتبر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R^2) استفاده گردید.

روند پیش‌بینی رسوب: روند پیش‌بینی رسوب با استفاده از برنامه‌ریزی بیان‌ژن را به طور خلاصه می‌توان به ۵ مرحله تقسیم نمود:

مرحله نخست شامل تعیین تابع برازش است. برای یک برازش کامل مقدار f_i از یک برنامه انفرادی i برابر با $f_i = f_{\max} = nR$ خواهد بود. در این تحقیق طول محدوده انتخابی برابر با ۱۰۰ ($R = 100$) و مجموعه‌ای شامل تعداد ۱۰ برازش ($n = 10$) انتخاب گردیده است؛ بنابراین مقدار تابع برازش برابر با ۱۰۰۰ خواهد بود ($f_{\max} = 1000$). مزیت این نوع تابع برازش این است که سیستم می‌تواند با استفاده از آن، راه‌حل بهینه را پیدا کند. جذر میانگین مربعات خطا (**RMSE**)، به عنوان معیار خطای تابع برازش انتخاب شده است.مرحله دوم شامل انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و مجموعه توابع برای ایجاد کروموزوم‌ها است.

رابطه ۲ $Y = f(X^m)$

که در آن x^m ورودی m بعدی شامل متغیرهای $x_1, x_2 \ldots, x_i \ldots x_m$ و Y متغیر خروجی است.

در پیش‌بینی رسوب x_i می‌تواند مقادیر ورودی شامل رسوب، رواناب، بارش و شاخص‌های سه گانه دما بوده و Y مقادیر رسوب می‌باشد. پس مجموعه ترمینال‌ها شامل متغیرهای مستقل بدین صورت است:

رابطه ۳ $Input = \{S_t, P_t, T(max)_t, T(min)_t, Q_t\}$

که در آن Q_t رواناب، $T(max)_t$، $T(avg)_t$ و $T(min)_t$ به ترتیب متوسط حداکثر، میانگین و متوسط حداقل دما، p_t میانگین بارش و St رسوب بار معلق در زمان t می‌باشد. در پژوهش‌های مختلف توابع متفاوتی جهت آموزش مدل در نظر گرفته شده اما تقریباً در تمامی موارد از عملگرهای اصلی حسابی استفاده شده است. در این تحقیق نیز چهار عملگر اصلی حسابی یعنی {×, - , +, /} به عنوان مجموعه توابع در نظر گرفته شده است.

مرحله سوم انتخاب ساختار کروموزوم‌ها می‌باشد که شامل طول سر و تعداد ژن‌ها است. طول سر برابر با ۸ **(h=8)** انتخاب شده و تعداد ۳ ژن نیز در هر کروموزوم در نظر گرفته شده است. همچنین در هر اجرا تعداد ۳۰ کروموزوم انتخاب گردیده است. مرحله چهارم انتخاب تابع پیوند است که تعیین کننده ارتباط بین زیردرخت‌ها می‌باشد. در این بررسی سه ژن انتخابی (زیر درخت‌ها یا همان **ETs**) از طریق تابع مجموع به هم پیوند داده می‌شوند. مرحله پنجم، انتخاب عملگرهای ژنتیکی و نرخ آن‌هاست. در این مورد ترکیبی از کلیه عملگرهای به‌سازی از قبیل جهش، وارون-سازی، سه نوع ترانهش و سه نوع ترکیب استفاده شده است. پارامترهای مورد استفاده و نرخ آن‌ها در استخراج مدل‌های پیش‌بینی رسوب در مقیاس‌های زمانی مختلف در جدول (۵) به طور خلاصه ارائه شده است.

جدول ۳: مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی رسوب با استفاده از GEP (منبع: روشنگر و میرحیدریان، ۱۳۹۳)

پارامتر	مقدار
اندازه سر(Head Size)	۷
تعداد کروموزوم‌ها(Chromosomes)	۳۰
تعداد ژن‌ها در هر کروموزوم(Number of genes)	۳
نرخ جهش (Mutation Rate)	۰/۰٤٤
نرخ وارون‌سازی(Inversion Rate)	۰/۱
نرخ ترکیب تک-نقطه‌ای(One-Point Recombination Rate)	۰/۳
نرخ ترکیب دو-نقطه‌ای(Two-Point Recombination Rate)	۰/۳
نرخ ترکیب ژن (Gene Recombination Rate)	۰/۱
نرخ ترانهش درج متوالی(IS Transposition Rate)	۰/۱
نرخ ترانهش ریشه درج متوالی(RIS Transposition Rate)	۰/۱
نرخ ترانهش ژن(Gene Transposition Rate)	۰/۱
معیار خطای تابع برازش(Fitness Function Error Type)	RMSE
تابع پیوند(Linking Function)	جمع (+)

آموزش برنامه (Training): برای دست‌یابی به برنامه و ساختاری که بتواند روابط بین ورودی‌ها و خروجی مدل را تعمیم دهد، لازم است برنامه آموزش داده شود. چون قوانین خاصی برای این کار وجود ندارد، ناگزیر چندین ساختار مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای ورودی و خروجی به دو دسته تقسیم گردیدند. در این رابطه، اطلاعات ۱۳ سال اول دوره شاخص آماری (٦٥ درصد)، برای آموزش برنامه و ۷ سال باقی‌مانده (۳٥ درصد)، برای صحت‌سنجی آن به کار گرفته شد. به منظور شناسایی ورودی‌های مؤثر در پیش‌بینی رسوب حوضه، بر اساس دسته‌بندی جدول (٤)، تعداد ٦ الگوی مختلف بر اساس ترکیب داده‌های بارندگی، رواناب و سه شاخص متوسط حداکثر، حداقل و میانگین درجه حرارت طراحی گردید.

جدول ٤: الگوهای ورودی مختلف جهت پیش‌بینی مقدار رسوب حوضه

ردیف	الگوهای ورودی مختلف		
۱	رسوب-	دبی رواناب	S-Q
۲	رسوب-	دبی رواناب، بارش	S - Q , P
۳	رسوب-	دبی رواناب، بارش، میانگین دما	S – Q , P, Tavg
٤	رسوب-	دبی رواناب، بارش، متوسط حداکثر دما	S – Q , P , Tmax
٥	رسوب-	دبی رواناب، بارش، میانگین دما، متوسط حداکثر دما	S - Q , P , Tavg , Tmax
٦	رسوب-	دبی رواناب، بارش، میانگین دما، متوسط حداکثر دما، متوسط حداقل دما	S – Q , P ,Tavg ,Tmax ,Tmin

صحت سنجی برنامه (Testing): از آنجایی که بررسی عمل‌کرد برنامه‌ریزی بیان‌ژن و به عبارت دیگر بررسی کارآیی و میزان دقت آن در پیش‌بینی‌های متفاوت نیاز به تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی و در نهایت تعیین مناسب‌ترین ساختار ورودی‌ها دارد، برای این منظور، لازم است با بهره‌گیری از شاخص‌های آماری رایج، مناسب‌ترین ساختار و

در نهایت رابطه مربوطه استخراج گردد. در فرآیند عملیاتی برنامه‌ریزی بیان ژن در پژوهش حاضر، دو شاخص معتبر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (R^2) به عنوان معیار خطای تابع برازش انتخاب گردیده است. **شاخص جذر میانگین مربعات خطا** (RMSE): رابطه این شاخص به صورت زیر تعریف شده است (Andarzian et al., 2011):

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{I=1}^{N}(y_i-y_i^{\cap})^2}$$ **رابطه ٤**

y_i : داده‌های مشاهداتی

$\hat{y}_i$: داده‌های پیش بینی شده

N : تعداد کل مشاهدات

RMSE اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی را نشان داده و هرچه قدر به صفر نزدیک‌تر باشد، بیانگر دقیق‌تر بودن مقادیر پیش‌بینی شده خواهد بود.

شاخص ضریب همبستگی (R^2): رابطه این شاخص به صورت زیر تعریف شده است (Andarzian et al., 2011):

$$R^2=1-\frac{\sum((y_i-y_i^{\cap})2}{\sum(y_i-y_i^{-})\,2}$$ **رابطه ٥**

y_i: داده‌های مشاهداتی

$y_i^{\cap}$: داده‌های پیش بینی شده

R^2 میزان وابستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی را نشان داده و هرچه قدر به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر بالا بودن میزان همبستگی بین مقادیر خواهد بود.

نتایج و بحث

پس از آموزش کامل مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن با استفاده از ٦ ساختار ورودی مختلف (Training)، مقادیر رسوب پیش‌بینی شده توسط مدل در مرحله صحت‌سنجی (Testing) با مقادیر رسوب مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری خرجگیل، توسط شاخص‌های RMSE و R^2 مورد مقایسه قرار گرفت. جهت دستیابی به نتایج منطقی و سنجش دقیق میزان توانمندی مدل مورد استفاده در ساختارهای ورودی مختلف، مرحله آموزش مدل در تمامی ساختارها تا رسیدن شاخص Best Fitnes (همپوشانی مقادیر مشاهداتی و محاسباتی) به حداقل ۸۰٪ و همچنین شاخص R-Squre به حداقل ۹۰٪ تداوم یافت.

بر اساس نتایج بدست آمده در جدول (٥)، مقادیر مناسب دو شاخص آماری و نزدیک بودن آنها در تمامی ساختارها برای سال‌های مربوط به آموزش مدل به خوبی نشان می‌دهد که با ترکیب داده‌های ورودی در حالات مختلف، آموزش مدل به خوبی و با دقت بالایی صورت می‌گیرد. طبق نتایج بدست آمده بر اساس شاخص R^2، تنها دو الگوی ٥ و ٦ به ترتیب با ارقام ۰/۸۳۸ و ۰/۷۱۸ همبستگی قابل قبولی را بین داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهده‌ای تأیید می‌نمایند و

بر همین اساس می‌توان گفت که سایر الگوهای ورودی از دقت لازم برای پیش‌بینی رسوب برخوردار نیستند. در جدول (۵) عملکرد مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در تخمین رسوب بار معلق سالانه حوضه ناورود ارائه شده است. جهت تعیین مناسب‌ترین ساختار در بین الگوهای مختلف، شاخص RMSE را مورد بررسی قرار داده که نتایج آن به خوبی نشان می‌دهد، این شاخص در الگوی ۵ با رقم ۱/۰٦، کمترین مقدار را به خود اختصاص داده و در نتیجه بهترین همپوشانی را بین داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهده‌ای تأیید می‌کند. بنابراین، الگوی ۵ با ترکیب چهار پارامتر بارش، دبی رواناب، میانگین دما و متوسط حداکثر دما، مناسب‌ترین ساختار ورودی برای پیش‌بینی رسوب حوضه محسوب می‌شود. در شکل(۵) مرحله پردازش اطلاعات (RUN) در محیط نرم افزار GeneXproTools4 نشان داده شده است. پس از مشخص شدن مناسب‌ترین ساختار ورودی‌های مدل انتخابی جهت تخمین رسوب سالانه حوضه، با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار GeneXproTools4، رابطه بین پارامتر خروجی (رسوب) و پارامترهای ورودی مدل شامل بارش، رواناب، متوسط حداکثر، حداقل و میانگین دما با استفاده از زبان برنامه‌نویسی MATLAB و بکارگیری چهار عملگر اصلی حسابی یعنی $\{/, +, -, \times\}$، استخراج گردید در شکل (۵) نحوه پردازش اطلاعات (RUN) در محیط نرم افزار GeneXproTools4 ارائه شده است. رابطه نهایی بدست آمده به صورت زیر است:

رابطه ٦ $S = ۱۰۰۰۰(۲Q+Tavg-۹۷۰۰/PQ-Tmax/Tavg)$

S: رسوب بار معلق سالانه بر حسب تن

Q: میانگین دبی رواناب سالانه بر حسب مترمکعب در ثانیه

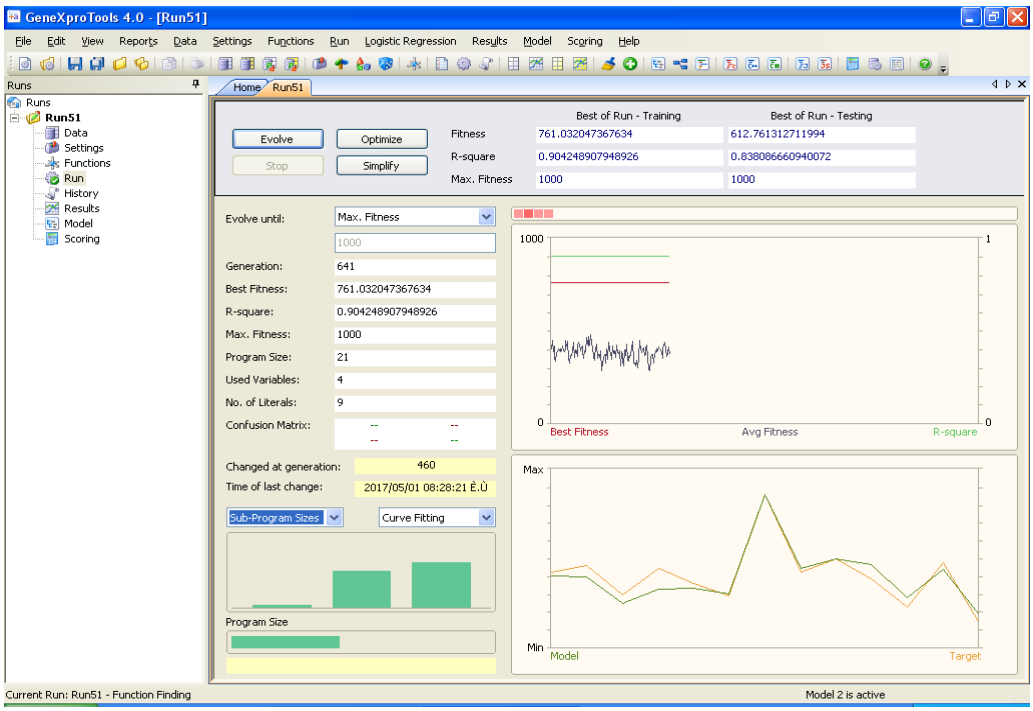
P: متوسط بارندگی سالانه بر حسب میلی‌متر

Tmax: متوسط حداکثر درجه حرارت سالانه بر حسب درجه سانتی‌گراد

Tavg: میانگین درجه حرارت سالانه بر حسب درجه سانتی‌گراد

جدول ۵: عملکرد مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در تخمین رسوب بار معلق سالانه حوضه ناورود

	ساختارها و الگوهای ورودی	مرحله آموزش		مرحله صحت سنجی	
		RMSI	R-Squre	RMSI	R-Squre
۱	رواناب، بارش	1/807	۰0/86	1/229	0/661
۲	رواناب، بارش، میانگین دما	1/533	۰۰0/9	2/451	0/583
۳	رواناب، بارش، متوسط حداقل دما، متوسط حداکثر دما	1/426	0/916	4/078	0/505
٤	رواناب، بارش، میانگین دما، متوسط حداکثر دما	1/155	0/944	2/264	0/447
۵	رواناب، بارش، میانگین دما، متوسط حداقل دما	1/514	0/904	1/06	0/838
٦	رواناب، بارش، میانگین دما، متوسط حداکثر دما، متوسط حداقل دما	1/347	0/922	1/391	0/718



شکل ۵: نحوه پردازش اطلاعات (RUN) در محیط نرم افزار GeneXproTools4

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

در این تحقیق به منظور پیش‌بینی جریان بار معلق رسوب خروجی حوضه آبریز ناورود با استفاده از روش فراکاوشی برنامه‌ریزی بیان‌ژن، مناسب‌ترین ساختار ورودی متشکل از ترکیب داده‌های آب و هواشناسی حوضه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، الگوی متوسط بارندگی، میانگین دبی رواناب، متوسط حداکثر و میانگین دمای سالانه حوضه، مناسب‌ترین ساختار ورودی برای دستیابی به خروجی مطمئن می‌باشد. با استفاده از نتایج تحقیق می‌توان میزان رسوبات خروجی حوضه‌های فاقد آمار در منطقه را از طریق الگوی منتخب به سهولت برآورد نمود. مهم‌ترین نتایج بدست آمده در پژوهش حاضر نشان داد که مناسب‌ترین ساختار ورودی جهت تخمین رسوب سالانه حوضه آبریز ناورود با استفاده از مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن (GEP)، ترکیب چهار پارامتر بارندگی، دبی رواناب، متوسط حداکثر و میانگین دمای سالانه می‌باشد. از طرفی آموزش مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن برای تمامی الگوهای ورودی، با دقت بسیار بالایی صورت می‌گیرد. بعلاوه نتایج مدل نشان دادکه در بین سه شاخص حرارتی سالانه، متوسط حداقل دما کمترین نقش را در تولید رسوبات حوضه دارد. برای صحت سنجی مدل، ضریب همبستگی (R^2) بین داده‌های محاسباتی و مشاهده‌ای در الگوی منتخب به بیشترین مقدار خود (۸٤٪) و مقدار شاخص RMSE به کمترین مقدار خود (۱/۰٦) می‌رسد. به طور کلی می‌توان گفت که مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن (GEP) برای پیش‌بینی رسوبات سالانه حوضه از دقت بسیار بالایی برخوردار بوده و با توجه به بالابودن سرعت و میزان دقت این مدل در مقایسه با سایر مدل‌های رایج و همچنین امکان استخراج رابطه ریاضی بین پارامترهای ورودی و خروجی در این مدل، پیشنهاد می‌گردد، این روش در حوضه‌های آبریز معرف به کار گرفته شده و از نتایج آن برای تخمین آورد حوضه‌های آبریز فاقد آمار استفاده گردد.

منابع

- آرخی، ص.، سلمانی، س.، عمادالدین، س. ۱٤۰۲. ارزیابی تاثیر تغییرات کاربری اراضی روی فرسایش و رسوب با استفاده از سنجش از دور و GIS (مطالعه موردی: حوضه کال‌آجی استان گلستان)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، doi:10.22067/GEOEH.2022.74281.1145
- امامقلی‌زاده، ص.، کریمی‌دمنه، ر.، اژدری، خ. ۱۳۹۵. مقایسه‌ی روش‌های متداول برآورد بار رسوب معلق رودخانه کرخه با روش برنامه‌ریزی بیان ژن، نشریه جغرافیا و توسعه، ۱٤(٤۵): ۱٤۰-۱۲۱.
- بهرامی، ع.، شهیدی، ع. ۱٤۰۰. بهبود مدل DRASTIC با برنامه‌ریزی بیان ژن در تعیین آسیب پذیری آبخوان به نیترات مطالعه موردی: آبخوان دشت کرمانشاه، هیدروژئومورفولوژی، ۸(۲۸): ۳۹-٦۲.
- پاسبان، ا.ح.، عابدینی، م.، فروتن، م. ۱٤۰۱. ارزیابی و تحلیل میزان تاثیر کاربری اراضی بر فرسایش خاک با استفاده از مدل تجربی RUSLE مطالعه موردی :حوضه آبخیز بالیخلوچای، استان اردبیل. جغرافیا و روابط انسانی، ۵(۳): ۲۵۸ – ۲۳۸.
- چعب، ح.، جعفری، ا.، جلیلی، س.، ظهیری، ج. ۱۳۹۷. مقایسه روش‌های متداول برآورد بار رسوب معلق رودخانه دز با روش برنامه‌ریزی بیان ژن (مطالعه موردی ایستگاه تله زنگ)، هفدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، شهرکرد.
- حاجیان، ف. ۱۳۹۹. عملکرد روش موسلی و شبکه عصبی مصنوعی و بیان‌ژن در برآورد رسوب دهی حوضه کسیلیان، ایران، دهمین همایش سراسری محیط زیست انرژی و منابع طبیعی پایدار، تهران.
- رنجبر، ع.، امامقلی‌زاده، ص.، کریمی، ر. ۱۳۹۵. مدل‌سازی دبی و دبی رسوب رودخانه هراز آمل با استفاده از برنامه‌ریزی بیان‌ژن (GEP)، پنجمین کنفرانس مدیریت جامع منابع آب، کرمان.
- روستایی، ش.، حجازی، ا.، شیرزادی، ه. ۱٤۰۱. برآورد میزان فرسایش ورسوب حوضه آبریز زیمکان در استان کرمانشاه با تاکید بر متغیرهای تاثیرگذار، جغرافیا و مخاطرات محیطی، doi: 10.22067/GEOEH.2023.79388.1293
- روشنگر، ک.، میرحیدریان، ش. ۱۳۹۳. استفاده از روش تکاملی برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد میزان آبشستگی پایه‌های پل در بسترهای غیر چسبنده براساس داده‌های آزمایشگاهی و میدانی، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل، اردیبهشت ۱۳۹۳.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان ۱۳۹۹. گزارش سالانه حوضه معرف ناورود اسالم، سال آبی ۹۹-۱۳۹۸.
- عابدینی، م.، ابوالفتحی، د.، رئیسی، م. ۱٤۰۱a. پهنه‌بندی فرسایش حوضه آبریز رزن با استفاده از مدل‌های منطق فازی، EPM و BLM در محیط GIS. جغرافیا و توسعه، ٦۸: ٦۹-٤۹.
- عابدینی، م.، جوادی علی‌بابالو، س.، مصطفی‌زاده، رئوف.، پاسبان، ا.ح. ۱٤۰۱b. اولویت‌بندی زیرحوزه‌های آبخیز کوزه‌توپراقی بر اساس فرسایش خاک و تولید رسوب با استفاده از پسیاک اصلاح‌شده (MPSIAC) در محیط GIS. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۳(٤۹): ۱۸-۳۹.

- عابدینی، م.، بهرامی‌نیا، ف.، مصطفی‌زاده،ر.، پا سبان، ا.ح . ۱۴۰۲. برر سی تاثیر تغییرات کاربری ارا ضی در یک دوره بیست سال بر میزان فر سایش و ر سوب حوزه ر ضی‌چای. فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، سال دوازدهم، شماره ۴۵ ، صص۱۳۳- ۱۱۴.
- عابدینی،م.،جوادی ع. ب، س.، مصطفی‌زاده، ر.، پاسبان، ا.ح . ۱۴۰۱b. ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و ژئومورفیک با مقادیر فر سایش و ر سوب در حوزه آبریز کوزه‌توپراقی. هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۳۲، سال نهم، صص ۱۲۸-۱۰۵.
- عابدینی، م .، یعقوب نژادف، ن.۱۳۹۶. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فر سایش خاک در حو ضه آبخیز رودخانه بالیخلو (سدیامچی) با استفاده از مدل‌فازی، پژوهشهای ژئومورفولوژی کمّی، سال ششم، شماره (۱). ۱۵۵-۱۳۷.
- عبادی‌فر، م.، اشرف، ع.، محمدی دهرایی، م. ۱۳۹۷. پیش‌بینی رواناب حوضه با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن (مطالعه موردی: حوضه آبریز کرگانرود گیلان)، پنجمین همایش و نمایشگاه محیط زیست و بحران‌های پیش‌رو، ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۷، دانشگاه خوارزمی تهران.
- علی‌جانپور شلمانی، ع.، واعظی، ع.ر.، طباطبایی، م.ر. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن برای برآورد بار رسوب معلق بر اساس پیش پردازش داده‌ها با روش آزمون گاما (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رود زرد)، حفاظت منابع آب و خاک، ۸(٤): ۵۰-۳۷.
- علی‌نژادی، م.، موسوی، ف.، حسینی، خ. ۱۴۰۰. مقایسه روش‌های برنامه‌ریزی بیان‌ژن و رگرسیون‌های پارامتریک و ناپارامتریک در پیش بینی دبی میانگین روزانه رودخانه کارون (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری ملاثانی)، علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۵(۱): ۶۲-۴۳.
- قربانی، م.ع.، احمدی، ح.، یوسفی، پ. ۱۳۹۱. مدل‌های فراکاوشی در ریز مقیاس‌سازی زمانی بار رسوب معلق رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه لیقوان)، نهمن سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، بهمن ماه ۱۳۹۱، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- مرادی‌نژاد، ا.، خسروبیگی، س.، اکبری، م.، حسینی، ا. ۱۴۰۲. ارزیابی روش‌های محاسبات نرم در برآورد رسوب معلق رودخانه (ایستگاه حسن‌آباد رودخانه تیره)، مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک.DOI:10.22098/MMWS.2023.12620.1258
- Aytek and O.Kisi, “A genetic programming approach to suspended sediment modeling,” ELSEVIER, Journal of Hydrology, Vol 351, pp. 288-298, 2008.
- Alijanpour Shalmani, A., Vaez, A., Tabatabaei, M. 2022. Prediction of daily suspended sediment load using the Genetic Expression Programming and Artificial Neural Network models, Environmemtal Resources Research, 10(1): 115-132.
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A. and Rahnama, A., 2011. Validation and testing of the

AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. Agricultural Water Management, 100: 1-8

- Baboviv, V., Keijzer, M. 2006. Rainfall-Runoff Modeling Based on Genetic Programming, Encyclopedia of Hydrological Sciences, DOI:10.1002/0470848944.hsa017.
- Dizaji, A. R., Hosseini, S. A., Rezaverdinejad, V., & Sharafati, A. 2020. Groundwater contamination vulnerability assessment using DRASTIC method, GSA, and uncertainty analysis. Arabian Journal of Geosciences, 13(14), 1-15.
- Ferreira, C. 2006. Automaticlly defined functions in gene expression programming. In: Nedjah, N., Mourelle, L.M., Abraham, A. (Eds.), Genetic Systems Programming: Theory and Experiences, Studies in Computational Intelligence, Springer-Verlag, 13, 21-5
- Guven, A., Talu, N.E. 2010. Gene Expression Programing for Estimating Suspended Sediment Yield in Middle Euphrates Basin, Turkey. Clean – Soil Air Water. 38(12):1159–1168.
- Jha, M. K., Sahoo, S. 2015. Efficacy of neural network and genetic algorithm techniques in simulating spatio- temporal fluctuations of groundwater. Hydrological processes, 29(5), 671-691.
- Kishi, O. 2010. River suspended sediment concentration modeling using a neural differential evolution approach. J. Hydrol. 389: 1-2. 227-235.
- Mehr A.D. 2021. An improved gene expression programming model for streamflow forecasting in intermittent streams. Journal of Hydrology 563: 669-678.
- S.T. Khu, S.Y. Liong, V. Babovic, H. Madsen and N. Muttil, "Genetic programming and its application in real- time runoff forming," American Water Resources Journal, Assoc. Vol. 37(2), pp. 439-451, 2001.
- Saxena, B., Gaonkar, M., Singh, S. 2023. Study of the effectiveness of Wavelet Genetic Programming model for Water Quality Analysis in the Uttar Pradesh region, Environmental Monitoring and Assessment, 195(8):1010. doi: 10.1007/s10661-023-11489-y.
- Senthil Kumar, A.R., C.S. Ojha, P. Manish Kumar Goyal, R.D. Singh and P.K. Swamee. 2012. Modeling of Suspended Sediment Concentration at Kasol in India Using ANN, FuzzyLogic and Decision Tree Algorithms. American Society of Civil Engineers, 17: 394-404.
- Unsal, M and Yagci ,E.A ., 2020. Assessment of Gfenetic Programing For Estimating RainfallRunof Hydrographical Events. Feb Fresenius Environmental Buletin, p.2778.
- Yadav, A., Hasan, M., Joshi, D., Kumar, V., Aman, A., Alhumyani, H., Alzaidi, M., Mishra, H. 2022. Optimized Scenario for Estimating Suspended Sediment Yield Using an Artificial Neural Network Coupled with a Genetic Algorithm, Water, 14(18): 2815.