

پیش‌بینی جریان بار معلق رسوب با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن (مطالعه موردی:

حوضه آبریز ناورود گیلان)

موسی عابدینی^{۱*}، طیه 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: ۱۴۰۲/۰۹/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۴

چکیده

برآورد دبی بار رسوبات معلق رودخانه‌ها به دلیل 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 این رو، شماری از محققان به روش‌های هوشمند و الگوریتم‌های تکاملی روی آورده‌اند. در پژوهش حاضر به منظور بررسی کارایی 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 خرچگیل اسالم، به عنوان متغیر خروجی در دوره آماری مشترک ۲۰ ساله (از سال آبی ۷۴-۷۵ لغایت ۹۴-۹۳) استفاده گردید. برای این کار، مقادیر رسوبات بار معلق حوضه از روش منحنی سنجی، 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 ۶ 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 (۸۴٪) و مقدار شاخص RMSE به کمترین مقدار خود (۱۰۶) می‌رسد. در نتیجه ساختار فوق به عنوان 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.

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، ۱۴۰۱). افزایش روزافزون جمعیت جهانی خصوصاً 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 زیست محیطی، توسعه پایدار کشاورزی و تولید غذا و غیره، هر چه بیشتر مورد توجه قرار گیرد (عابدینی، ۱۳۹۹). یکی از مهمترین مسائل و مشکلات حوضه های آبریز، رسوبات بارمعلق رودخانه ها است که به دلیل اثرات منفی آن مانند فرسایش نقاط بالادست، تجمع رسوبات در پایین دست، تقلیل گنجایش مخازن آبی، تغییر در مورفولوژی و کیفیت آب رودخانه ها و همچنین مسائل زیست محیطی، بررسی و برآورد دقیق آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به دلیل نبود آمار کافی و مشکلات اندازه گیری مستقیم بار رسوب معلق روزانه در ایستگاه های هیدرومتری، تعیین روشی مناسب و دقیق جهت پیش بینی بار رسوبی رودخانه ها به عنوان یکی از مهمترین چالش ها در مدیریت حوضه های آبریز کشورمان محسوب می گردد. امروزه روش های هوشمند مصنوعی به خاطر قابلیت شبیه سازی فرایندها در زمینه های مختلف، برای پیش بینی و تولید آمار مصنوعی کاربرد زیادی پیدا کرده اند. با ادامه سیر تکاملی این مدل ها، برنامه ریزی بیان ژن^۱ (GEP) در مطالعات مربوط به آب، به ابزارهای مدل سازی مسائل مربوط به تعیین ساختار پدیده ها افزوده شد. این روش جزء روش های الگوریتم گردشی محسوب می شود که مبنای تمامی آن ها براساس نظریه تکامل داروین استوار است. الگوریتم های یاد شده اقدام به تعریف یک تابع هدف، در قالب معیارهای کیفی نموده و سپس تابع یاد شده را برای اندازه گیری و مقایسه روش های مختلف حل، در یک فرآیند گام به گام برای تصحیح ساختار داده ها به کار می گیرند و در نهایت، روش حل مناسب را ارائه می نمایند. روش برنامه ریزی بیان ژن جدیدترین شیوه در بین روش های الگوریتم تکاملی می باشد که به دلیل دارا بودن دقت کافی، مرسوم ترین شیوه بوده و از کاربرد بیشتری برخوردار است. اگرچه پژوهش های متنوعی در خصوص کاربرد این گونه مدل ها و برتری دقت آن ها بر روش هایی همچون منحنی سنج رسوب، روش فائو و غیره ارائه شده است، ولی به دلیل غیرصریح بودن این مدل ها، استفاده از آن ها در عمل به طور مناسب توسعه نیافته است. لذا توسعه یک مدل صریح جهت تعیین بار رسوبی رودخانه ها با استفاده از ورودی هایی نظیر دبی جریان و برخی از عناصر اقلیمی (بارش و دما و ...)، ضرورت می یابد. تحقیقات گذشته نشان می دهد که در استفاده از محاسبات نرم (مثل برنامه ریزی ژنتیک و شبکه های عصبی و ...) برای تولید آمار به بعضی از مشکلات مدل های فیزیکی غلبه می شود (عبادی فر و همکاران، ۱۳۹۷). تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با برآورد جریان بارمعلق رسوب با استفاده از برنامه ریزی بیان ژن در داخل و خارج کشور انجام شده است برای مثال، خاوی^۲

^۱- Gene Expression Programming

^۲- Khu

و همکاران (۲۰۰۱) در پژوهشی برای پیش‌بینی رواناب بر روی داده‌های هورگول فرانسه به مقایسه نتایج روش‌های کلاسیک و برنامه‌ریزی ژنتیک پرداخته و به دقت قابل قبول روش برنامه‌ریزی ژنتیک در مشاهدات خود اشاره کرده‌اند. بابوویچ و کیزر^۱ (۲۰۰۶)، مدل سازی رواناب بارندگی را با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیکی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با استفاده از مدل‌های مبتنی بر داده‌ها مانند برنامه‌ریزی ژنتیکی (GP)، می‌توان رواناب را بر اساس داده‌های آب‌وهوا شناسی موجود مدل سازی کرد. این کار به استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیکی برای ایجاد مدل‌های بارش-رواناب تنها بر اساس داده‌ها و همچنین در ترکیب با مدل‌های مفهومی کارایی بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. آیتک^۲ و همکاران (۲۰۰۸)، جهت مدل سازی بارش رواناب در حوضه رودخانه جونیاتا در پنسیلوانیای آمریکا از دو روش شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده کردند. مقایسه نتایج آن‌ها نشان داد که روش برنامه‌ریزی بیان ژن در مقایسه با شبکه عصبی مصنوعی، عملکرد بهتری داشته است. کیشی^۳ (۲۰۱۰) با استفاده از ترکیب روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و تبدیل موجک گسسته بار معلق روزانه را شبیه‌سازی نمود. در این پژوهش از داده‌های دو ایستگاه بر روی رودخانه تانگوی مونتانا استفاده شد. نتایج نشان داد که روش عصبی-موجک می‌تواند دقت برآورد را افزایش دهد. در پژوهشی دیگر گوون و تالو^۴ (۲۰۱۰) در حوزه آبخیز فرات میانی در ترکیه، مقدار رسوب بار معلق با استفاده از مدل‌های GEP، رگرسیون خطی و منحنی سنج رسوب برآورد شد. در این پژوهش از داده‌های ایستگاه هیدرومتری هنیس کریک مربوط به سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۷ که شامل ۶۶ درصد از داده‌ها بود، برای آموزش مدل‌ها و از داده‌های مربوط به سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ (۳۳ درصد کل داده‌ها) برای آزمون مدل‌ها استفاده شد. در این پژوهش متغیرهای ورودی در دو گروه داده‌های دبی روزانه و رسوب متناظر با آن و همچنین دبی روزانه و رسوب با تأخیر سه روز، قرار گرفتند. انتخاب این ترکیبات به صورت دستی و تصادفی انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل GEP با ضریب همبستگی ۹۹٪ و کم‌ترین میزان خطا بر اساس شاخص RMSE، کارآمدترین مدل در برآورد رسوبات بار معلق مقایسه با سایر مدل‌ها بود. جها و ساهو^۵ (۲۰۱۴)، اثربخشی شبکه عصبی و تکنیک‌های الگوریتم ژنتیک در شبیه‌سازی نوسانات مکانی-زمانی آب‌های زیرزمینی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده این بود که مدل پرسپترون چندلایه لوببرگ-مارکوارت در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی ماهانه تقریباً در تمام ۱۷ سایت کارآمدترین است، در حالی که مدل تابع پایه شعاعی کم‌ترین کارایی را دارد. همچنین مشخص شد که تکنیک GA نسبت به روش آزمایش و خطای رایج برای تعیین بهینه ANN و پارامترهای داخلی برتر است. از آمارهای برازش استفاده شده در این مطالعه، تنها خطای ریشه میانگین مربع، راندها r^2 و نشان-ساتکلیف در ارزیابی عملکرد مدل‌های ANN

¹- Babovic and Keijzer

²- Aytak

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 حوضه یا زیرحوضه می‌تواند استفاده شود. دیزاج^۱ و همکاران (۲۰۲۰)، به منظور پیش‌بینی و تعیین آنالیز حساسیت آب زیرزمینی که در منطقه آنتالیا ترکیه با استفاده از مدل GEP پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که این آبخوان از نظر طبقه‌بندی آلودگی در محدوده مناطق آ سیب‌پذیر قرار دارد. در پژوهشی دیگر یاداو^۲ 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 نشان داد که مدل ANN-GA دارای بیشترین ضریب همبستگی (۰/۸۷) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۰۰۸۸) در بین تمام SRC، ANN و MLR مقایسه‌ای است. بنابراین، ANN-GA مناسب‌ترین مدل در مقایسه با سایر مدل‌های بررسی شده برای تخمین SSY در حوضه MR، هند، به‌ویژه در ایستگاه اندازه‌گیری Tikarapara است. اگر هیچ اندازه‌گیری SSY در MR موجود نباشد، می‌توان از رویکرد مدل سازی برای تخمین SSY در ایستگاه‌های اندازه‌گیری نشده در حوضه MR استفاده کرد. مهر^۳ و همکاران (۲۰۲۱)، با استفاده از مدل ترکیبی برنامه‌ریزی بیان ژن به پیش‌بینی کوتاه و بلندمدت جریان رودخانه فلیوس در کشور ترکیه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل ترکیبی برنامه‌ریزی ژن عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های Arma، ANN و ANFIS دارد. شلمان^۴ و همکاران (۲۰۲۲)، پیش‌بینی بار رسوب معلق روزانه با استفاده از ژنتیک برنامه نویسی بیان و مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل‌های هوشمند قادر به تخمین دقیق مقدار SSL هستند. همچنین استفاده از تکنیک‌های پیش‌پردازش SOM و آزمون گاما باعث افزایش قدرت تعمیم مدل‌ها می‌شود. از طرفی انتخاب تأثیرگذارترین متغیرها و بهترین ترکیب آن‌ها به ترتیب قدرت مدل سازی و دقت برآورد SSL را افزایش می‌دهد. ساخنا^۵ و همکاران (۲۰۲۳)، به منظور بررسی اثر بخشی مدل برنامه‌ریزی ژن برای تجزیه و تحلیل کیفیت آب در منطقه اوتار پرادش هند پرداختند. نتایج آن‌ها نشان 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 ایستگاه‌های هیدرومتری جلوگیری و پای‌پل واقع در بالادست سد مخزنی کرخه، از روش برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده نمودند و نتایج بدست آمده را با نتایج روش‌های منحنی سنج رسوب و فائو مقایسه نمودند. برای این کار، در سناریوی اول از اطلاعات دبی جریان و دبی رسوب ایستگاه‌ها و در سناریوی دوم از اطلاعات ارتفاع باران حوضه آبریز نیز استفاده 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 نشان داد که این روش نسبت به روش منحنی سنج رسوب، میزان خطای

¹- Dizaji

²- Yadav

³- Mehr

⁴- Shalmani

⁵- Saxena

RMSE و MAE را به مقدار ۹۱٪ و ۹۴٪ برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و ۶۰٪ و ۷۱٪ برای ایستگاه هیدرومتری پای پل کاهش داده است. مقایسه همین نتایج با روش فائو نیز نشان‌دهنده کاهش خطای RMSE و MAE به میزان ۹۲٪ و ۹۶٪ برای ایستگاه جلوگیر و ۸۵٪ و ۹۵٪ برای ایستگاه پای پل می‌باشد. رنجبر و همکاران (۱۳۹۵) طی پژوهشی به مدل سازی دبی و دبی رسوب رودخانه هراز آمل با استفاده از برنامه‌ریزی بیان‌ژن (GEP) پرداختند. در این پژوهش با استفاده از آمار ۴۸ ساله ایستگاه کره سنگ با انتخاب ترکیبات مختلف ورودی با استفاده از برنامه‌ریزی بیان‌ژن (GEP) اقدام به مدل سازی رابطه دبی و دبی رسوب گردید و با روش سنتی رابطه رگرسیون 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. مقایسه این دو روش با معیار آماری نشان داد که روش برنامه‌ریزی بیان‌ژن نسبت به رگرسیون خطی عملکرد بهتری داشته است. عابدینی و همکاران (۱۳۹۶) در مورد پهنه‌بندی فرسایش خاک حوضه رودخانه بالخلوچای کار کرده‌اند و نتایج نشان داده که حدود ۲۶/۹۳ 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 بسیار کم قرار گرفته‌اند. آب و خاک، پایه و اساس حیات بشر به شمار می‌آیند. پاسبان و همکاران (۱۴۰۱) در با استفاده از مدل RUSLE در مورد فرسایش خاک حوضه آبخیز بالیخلوچای در استان را اردبیل کارکرده‌اند. نتایج تحقیق نشان داده که مقدار متوسط فرسایش سالانه خاک برای کل حوضه در دامنه بین ۶/۶۵ - تا ۱۴/۷۵ تن در هکتار در سال متغیر است. همچنین بررسی روابط رگرسیونی بین $R^2 = 0.95$ و مقدار فرسایش سالانه خاک نشان داد که فاکتور توپوگرافی (LS) بالاترین مقدار ضریب تعیین $R^2 = 0.95$ به شترین اهمیت را در برآورد فرسایش سالانه خاک به وسیله مدل RUSLE دارد. چعب و همکاران (۱۳۹۶) از روش‌های منحنی سنج 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 مقایسه نمود. در این مطالعه از اطلاعات دبی جریان، دبی رسوب و ارتفاع باران متناظر مربوط به سال‌های ۱۳۷۰-۱۹۵ استفاده شد. ۸۰ درصد داده‌ها برای بخش آموزش و ۲۰ درصد برای بخش آزمون در نظر گرفته شدند. در روش GEP دو سناریو تعریف شد. نخست، تنها از اطلاعات دبی جریان و دبی رسوب و بدون تأثیر بارش و در سناریوی دوم، علاوه بر دو پارامتر دبی جریان و دبی رسوب از ارتفاع باران نیز در پیش‌بینی رسوب معلق استفاده شد. در نهایت، نتایج نشان داد روش‌های منحنی سنج رسوب و فائو، با ضرایب همبستگی برابر با ۸۱٪ و ۸۰٪ در بخش آزمون از دقت قابل قبولی برخوردارند، اما در مقایسه 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 رسوب معلق رود زرد بر اساس پیش‌پردازش داده‌ها با روش آزمون گاما پرداختند. در این پژوهش، داده‌های ایستگاه هیدرومتری ماشین در حوزه آبخیز رود زرد با طول دوره آماری ۳۶ سال (۱۳۹۱-۱۳۵۶) مورد استفاده 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 استفاده از روش آزمون گاما به دست 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 حاصل از آزمون گاما، با کمترین مقدار آماره‌ی خطای استلندارد برابر صفر، آماره‌ی گاما برابر ۰/۰۰۰۰۹۲ و آماره‌ی Vratio برابر ۰/۰۱۲ و با ترکیب متغیرهای متوسط دبی روزانه به همراه دو گام تأخیر زمانی و متوسط بارندگی روزانه به همراه سه گام تأخیر زمانی، دقیق‌ترین و صحیح‌ترین برآورد را برای بار رسوب معلق داشت. این مدل دارای کمترین مقدار RMSE و بیشترین مقدار R2 و NSE در مقایسه با سایر مدل‌ها بود. بنابراین، استفاده از روش آزمون گاما به عنوان یک روش پیش‌پردازش داده‌ها توانست با انتخاب ترکیباتی از متغیرهای ورودی مناسب به مدل‌ها، به طور میانگین تا ۴۰ 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 محاسباتی، عملکرد مدل GEP در برآورد بار رسوب معلق را افزایش دهد. حاجیان (۱۳۹۹) طی پژوهشی عملکرد روش موسلی، شبکه عصبی مصنوعی و بیان‌ژن در برآورد رسوب‌دهی حوضه کسلیان ایران را مورد مطالعه قرار داد. در این پژوهش با استفاده از روش‌های فوق برآورد رسوب‌دهی در خروجی حوضه برای ۵۷ واقعه بارش در استان مازندران انجام گردید و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل MUSLE نمی‌تواند رسوب‌دهی حوضه را در شکل و فرم اصلی خودش برای منطقه مورد مطالعه پیش‌بینی کند. با این حال، عملکرد مدل MUSLE با تنظیم توان و ضریب مدل بهبود یافت. عملکرد مدل‌های GEP و ANN نشان داد که هر دو مدل در برآورد رسوب‌دهی حوضه نتایج قابل اطمینانی دارند و عملکرد آنها از روش MUSLE کالیبره شده بهتر است. علاوه بر این، نتایج نشان داد که عملکرد مدل ANN برای برآورد رسوب‌دهی حوضه کسلیان با پنج نرون ورودی، چهار نرون پنهان و ۱ نرون خروجی (۱-۴-۵) بهتر از هر دو مدل GEP و MUSLE کالیبره شده بود. علی‌نژادی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی به منظور پیش‌بینی دبی میانگین روزانه رودخانه کارون، روش برنامه‌ریزی بیان‌ژن (GEP) را با روش‌های رگرسیون‌های پارامتریک خطی (LR)، غیرخطی (NLR) و همچنین روش ناپارامتریک K مورد مقایسه قرار دادند. نتایج بدست آمده حاکی از عملکرد بهتر مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن بر مبنای سه شاخص ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق در مقایسه با سایر روش‌های

مورد بررسی بوده است. همچنین، ارزیابی عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی مقادیر حداکثر آبدهی جریان نشان داد که همه مدل‌ها میزان جریان را در بیشتر موارد کمتر از مقدار مشاهداتی تخمین زده‌اند. بهرامی و شهیدی (۱۴۰۰)، به منظور بررسی میزان آیب‌پذیری آبخوان به نیترات در دشت کرمانشاه از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده کردند. نتایج آن‌ها حاکی از تولنایی بالای مدل در برآورد غلظت نیترات و بهبود مدل DRASTIC داشت. همچنین جهت صحت‌سنجی و بهبود مدل از روش امتیازبندی شاخص آماری R^2 استفاده کردند که همبستگی معنی‌داری بین آن‌ها برقرار بود. روستایی و همکاران (۱۴۰۱)، میزان فرسایش و رسوب حوضه آبریز زیمکان در استان کرمانشاه را با تاکید بر متغیرهای تاثیرگذار مورد مطالعه قرار دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که مقادیر فرسایش در دو مدل MPSIAC و EPM به ترتیب ۹/۵۱۴۲، ۲/۶۴۰۱ تن در سال و میزان رسوب به ترتیب ۶۳/۲۴۶۱، ۷۲/۳۶۲۴ تن در سال و کلاس و شدت فرسایش‌پذیری حوضه از لحاظ هدررفت خاک در وضعیت شدید قرار دارد. در پژوهشی دیگر آرخی و همکاران (۱۴۰۲)، 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 یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در حوضه آبخیز کال‌آجی از بین رفتن پوشش گیاهی مرتعی و تبدیل آن به اراضی کشاورزی می‌باشد. همچنین علل افزایش مقدار رسوب در منطقه کال‌آجی توسعه سطوح کاربری اراضی کشاورزی و کاهش سطوح مرتعی در بین سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۸ به میزان ۸۳/۱۶ درصد نسبت به سال ۱۳۶۶ می‌باشد. این تغییرات نقش مهم مراتع و پوشش گیاهی حوضه آبخیز کال‌آجی کاسته و موجب افزایش میزان رسوب خروجی زیرحوضه‌ها گردیده است. عابدینی و همکاران (۱۴۰۲) در مورد تاثیر تغییرات کاربری اراضی در یک دوره بیست سال بر میزان فرسایش و رسوب حوزه رضی‌چای 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 ۲۷/۶۹ هکتاری اراضی زراعی دیم در منطقه می‌شود. همچنین نتایج بررسی تغییرات فرسایش نشان داد میزان فرسایش از سال ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۸ از ۶/۴۹ به ۶/۴۶ تن در هکتار در سال کاهش یافته است. عابدینی و همکاران (۱۴۰۱) در مورد فرسایش حوزه آبخیز رزن با استفاده از منطق فازی، مدل‌های EPM و BLM کار کرده‌اند. نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها نشان داد که نتایج مدل EPM با داده‌های برداشت شده در مطالعه میدانی مطابقت بیشتری دارد که نشان‌دهنده دقت مدل EPM در بررسی فرسایش در منطقه مورد مطالعه است. براساس پهنه‌بندی صورت‌گرفته با استفاده از مدل EPM به ترتیب ۲۸/۴۴، ۳۲/۱۶، ۳۹/۴۰ درصد از مساحت منطقه در کلاس‌های خطر خیلی کم، کم، متوسط قرار گرفته است عابدینی و همکاران (۱۴۰۱) در تحقیقی اقدام به پهنه‌بندی فرسایش حوضه آبریز رزن با استفاده از مدل‌های منطق فازی، EPM و BLM به برآورد شدت فرسایش نمودند. نتایج به دست آمده از مدل EPM نشان داد که شدت فرسایش حوضه

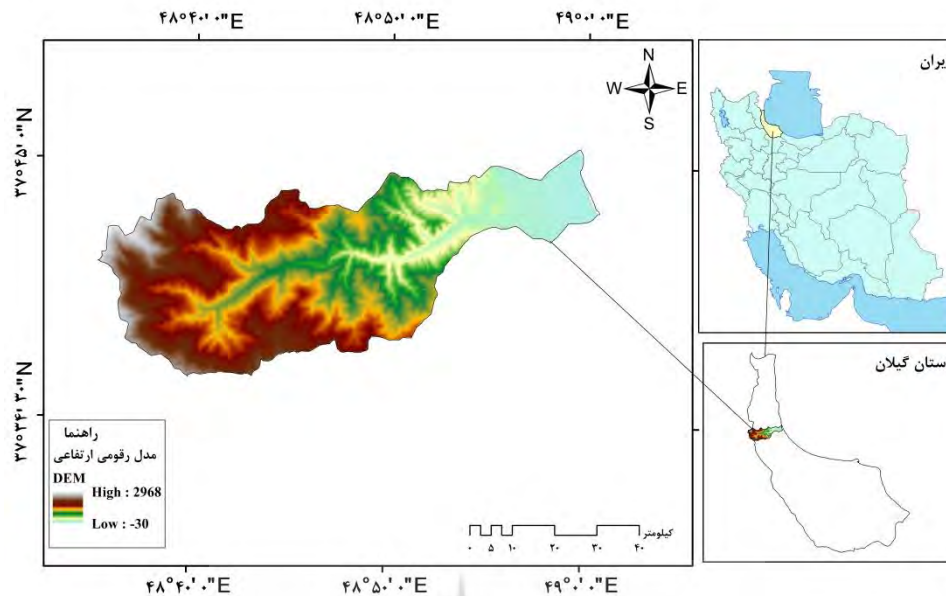
مورد مطالعه در کلاس فرسایش متوسط قرار دارد. عابدینی و همکاران (۱۴۰۱b) به مطالعه فرسایش خاک و تولید رسوب با استفاده از مدل MPSIAC در زیر حوضه‌های آبخیز کوزه‌توپراقی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار کل و متوسط فرسایش سالانه خاک حوضه به ترتیب برابر با ۰ تا ۵۷/۶۲ و ۱۱/۶۶ تن در هکتار در سال به دست آمد. مرادی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی به ارزیابی و مقایسه چهار روش مدل‌های فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و برنامه‌ریزی بیان‌ژن (GEP) و روش گروهی کنترل داده‌ها GMD در برآورد بار رسوب ایستگاه حسن‌آباد رودخانه تیره استان مرکزی پرداختند. بدین منظور عملکرد سه نوع مدل ماشین بردار 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 نسبت به منحنی سنجه می‌باشد. همچنین نتایج برتری مدل (GEP) با بیش‌ترین ضریب تعیین R^2 با مقدار ۰/۹۹ و کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطا RMSE بر حسب تن در روز با مقدار ۰/۰۱۰ نشان داد. در این خصوص کارایی 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 استفاده شد. نتایج بیانگر عملکرد قابل قبول مدل GMD با بیش‌ترین ضریب تعیین R^2 برابر ۰/۹۹ و ۰/۹۸ و کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر ۰/۰۳۸ و ۰/۰۰۴۵ تن در روز شد. نتایج به دست آمده نشان داد هر چهار روش داده‌کاوی بررسی شده به مراتب نتایج بهتری نسبت به منحنی سنجه رسوب ارائه می‌کنند. در این پژوهش، به منظور ارزیابی روش برنامه‌ریزی بیان‌ژن (GEP) برای پیش‌بینی رسوب بار معلق رودخانه ناورود در غرب استان گیلان، از داده‌های رسوب و دبی مشاهده‌ای ایستگاه هیدرومتری خرچگیل سالم و همچنین پارامترهای اقلیمی حوضه آبریز آن شامل بارش و شاخص‌های حرارتی سالانه در دوره آماری مشترک ۲۰ ساله استفاده گردیده و در نهایت مناسب‌ترین 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 کیلومتر مربع، در دامنه‌های شرقی رشته کوه البرز (کوه‌های تالش)، بین طول‌های جغرافیایی 35° تا 48° و 54° تا 48° درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی 36° تا 37° و 45° تا 37° 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 آراپاجای خلخال و از شرق به دریای خزر متصل گردیده است. طولانی‌ترین شاخه رودخانه از دامنه‌های شرقی رشته کوه البرز و کوه‌های سلطه خونی، اسبهریسه، هفته خونی و بغرداغ 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 حوزه 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، هم‌تقویم 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)، به صورت 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 ۱۳۷۴ به بعد تأسیس شده‌اند، به این ترتیب دوره شاخص آماری ۲۰ ساله (از سال آبی ۷۵-۷۴ لغایت ۹۴-۹۳) به عنوان دوره پایه مشترک آماری انتخاب گردید.

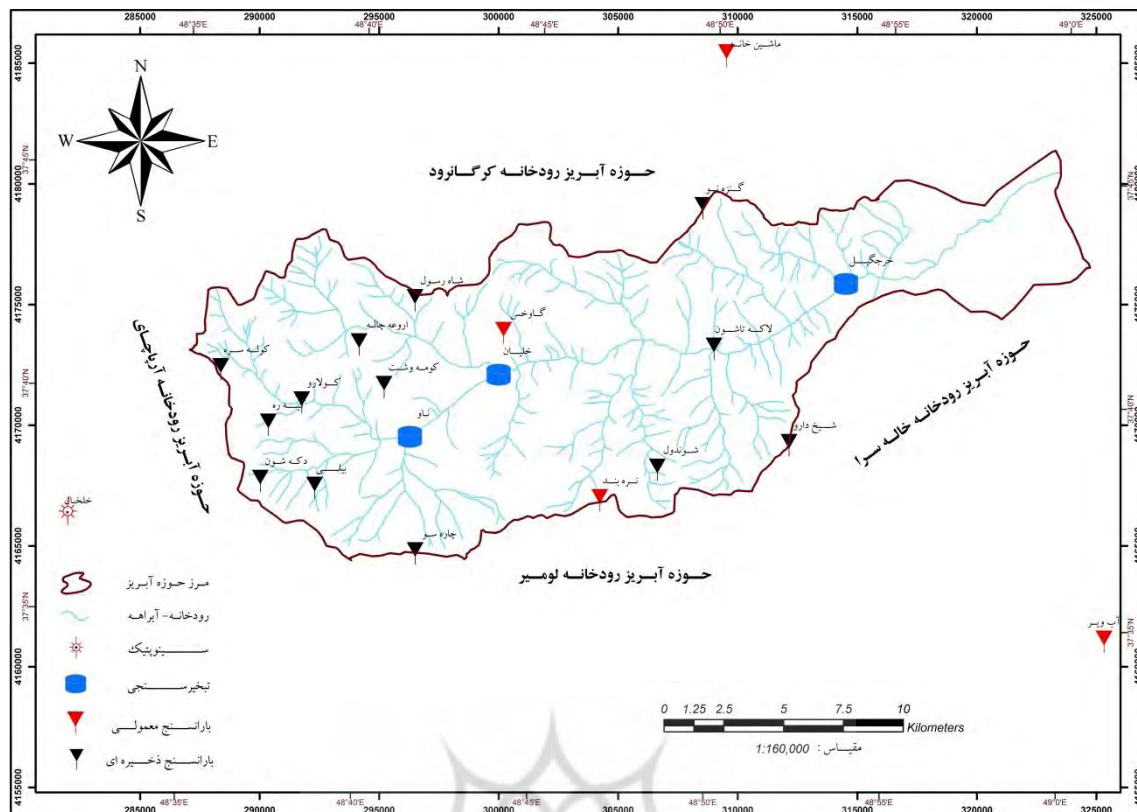
بارندگی: جهت تعیین متوسط بارندگی سالانه حوضه برای تمامی سال‌های تحت مطالعه، با استفاده از داده‌های بارندگی بازسازی و تکمیل شده تعداد ۲۱ ایستگاه هواشناسی مختلف و قابلیت‌های نرم‌افزاری ArcGIS نقشه منحنی-های هم‌باران حوضه با به‌کارگیری روش Kriging برای تمامی سال‌های مورد مطالعه ترسیم و متوسط مقادیر بارندگی 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 (۱۳۹۸ متر) 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 اندازه‌گیری شده 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.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



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

جدول ۱: روابط شاخص‌های حرارتی سالانه منطقه با ارتفاع از سطح دریا (به ترتیب از راست حداکثر، حداقل و

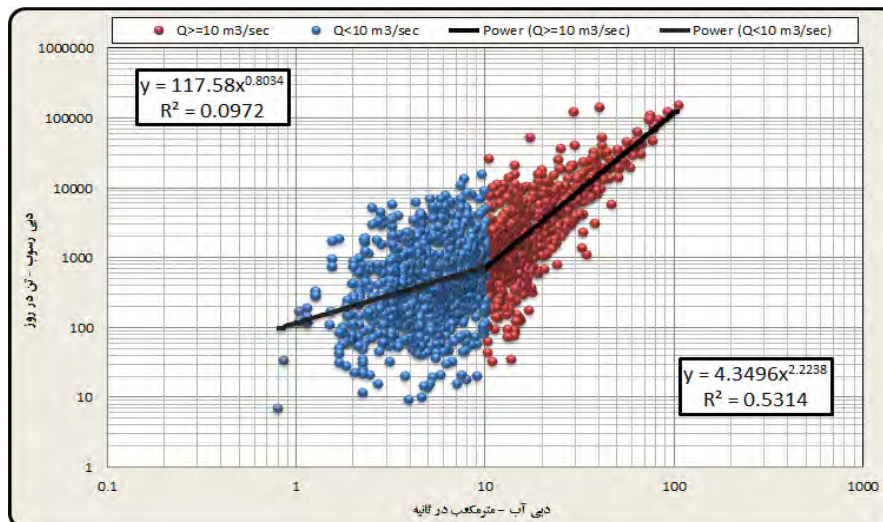
میانگین)، (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

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

0/995	0/0038	15/6	86-87	0/994	0/0044	10/8	86-87	0/945	0/003 2	20/4	86- 87
0/975	0/0034	15/1	87-88	0/987	0/0042	11/3	87-88	0/939	0/002 5	18/8	87- 88
0/994	0/0036	16/6	88-89	0/973	0/0038	12/0	88-89	0/998	0/003 3	21/3	88- 89
0/985	0/0041	16/5	89-90	0/995	0/0051	12/2	89-90	0/918	0/003 1	20/7	89- 90
0/988	0/0047	16/0	90-91	0/983	0/0053	11/1	90-91	0/992	0/004 2	20/9	90- 91
0/992	0/0045	17/5	91-92	0/997	0/0051	12/9	91-92	0/968	0/004 0	22/05	91- 92
0/981	0/0044	17/1	92-93	0/994	0/0052	12/3	92-93	0/918	0/003 7	22	92- 93
0/975	0/0038	16/4	93-94	0/994	0/0044	11/9	93-94	0/913	0/003 2	20/8	93- 94

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

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



شکل ۳: منحنی سنج رسوب بار معلق در ایستگاه خرگیل (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

مدل بیان ژن (GEP): برنامه‌ریزی ژنتیک^۱ (GP) که جزء الگوریتم‌های تکاملی و از شاخه‌های الگوریتم ژنتیک^۲ (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 بیان ژن^۳ (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 کروموزوم 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 تابع برازش به کار گرفته می‌شود. مراحل اصلی برنامه‌ریزی بیان ژن به طور شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده است.

^۱- Genetic Programming

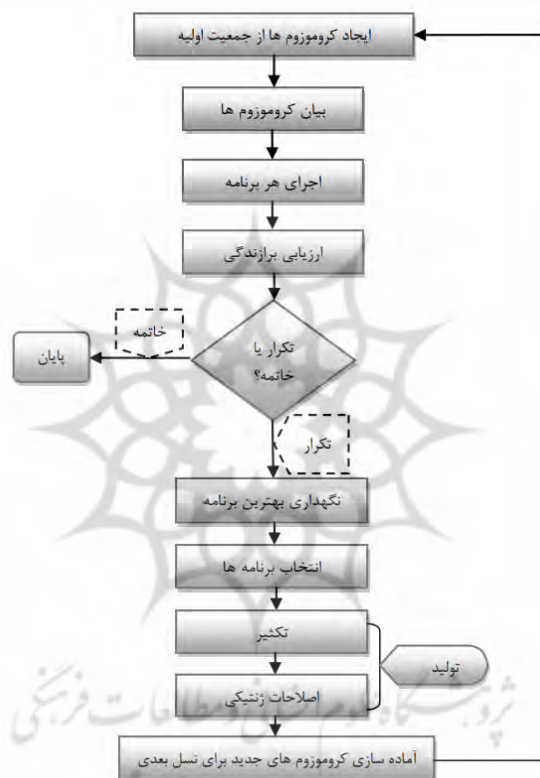
^۲- Genetic Algorithm

^۳- 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):

$$f_t = \sum_{j=1}^n (R - |P_{ij} - T_j|) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن R محدوده انتخاب، P_{ij} مقدار پیش‌بینی شده و T_j مقدار مورد انتظار می‌باشد. در شکل (۴) فلوچارت برنامه‌ریزی بیان ژن ارائه شده است.



شکل ۴: 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 متغیر خروجی مدل محسوب می‌گردد، به منظور بررسی کارایی و میزان توان‌مندی روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در تخمین رسوب بار معلق سالانه حوضه، از قابلیت‌های نرم‌افزار قدرتمند (GeneXproTools4)، استفاده گردید. در این رابطه، اطلاعات ۱۳ سال اول برای آموزش مدل و ۷ سال باقی مانده برای صحت‌سنجی آن در نظر گرفته شد. سپس به منظور شناسایی ورودی‌های مؤثر، تعداد ۶ 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 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m$ 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 $\text{Input} = \{S_t, P_t, T(\max)_t, T(\min)_t, Q_t\}$

که در آن Q_t رواناب، $T(\max)_t$ ، $T(\text{avg})_t$ و $T(\min)_t$ به ترتیب متوسط حداکثر، میانگین و متوسط حداقل دما، p_t میانگین بارش و S_t 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 $\{/, +, -, \times\}$ 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)	۰/۰۴۴
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 ترانزیشن درج متوالی (IS Transposition Rate)	۰/۱
نرخ ترانزیشن ریشه درج متوالی (RIS Transposition Rate)	۰/۱
نرخ ترانزیشن 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 (۶۵ درصد)، برای آموزش برنامه و ۷ سال باقی‌مانده (۳۵ درصد)، برای صحت‌سنجی آن به کار گرفته شد. به منظور شناسایی ورودی‌های مؤثر در پیش‌بینی رسوب حوضه، بر اساس دسته‌بندی جدول (۴)، تعداد ۶ الگوی مختلف بر اساس ترکیب داده‌های بارندگی، رواناب و سه شاخص متوسط حداکثر، حداقل و میانگین درجه حرارت طراحی گردید.

جدول ۴: 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
۴	رسوب- دبی رواناب، بارش، متوسط حداکثر دما S - Q , P , Tmax
۵	رسوب- دبی رواناب، بارش، میانگین دما، متوسط حداکثر دما S - Q , P , Tavg , Tmax
۶	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 کارایی 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):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

y_i : داده‌های مشاهداتی

$\hat{y}_i$: داده‌های پیش‌بینی 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):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

y_i : داده‌های مشاهداتی

$\hat{y}_i$: داده‌های پیش‌بینی 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 بیان ژن با استفاده از ۶ ساختار ورودی مختلف (Training)، مقادیر رسوب پیش‌بینی شده توسط مدل در مرحله صحت‌سنجی (Testing) با مقادیر رسوب مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری خرچگیل، 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-Square به حداقل ۹۰٪ تداوم یافت.

بر اساس نتایج بدست آمده در جدول (۵)، 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 ۵ و ۶ 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 ۱/۰۶، 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:

$$S = ۱۰۰۰۰ (۲Q + Tavg - ۹۷۰۰ / PQ - Tmax / Tavg) \quad \text{رابطه ۶}$$

S: رسوب بار معلق سالانه بر حسب تن

Q: میانگین دبی رواناب سالانه بر حسب مترمکعب در ثانیه

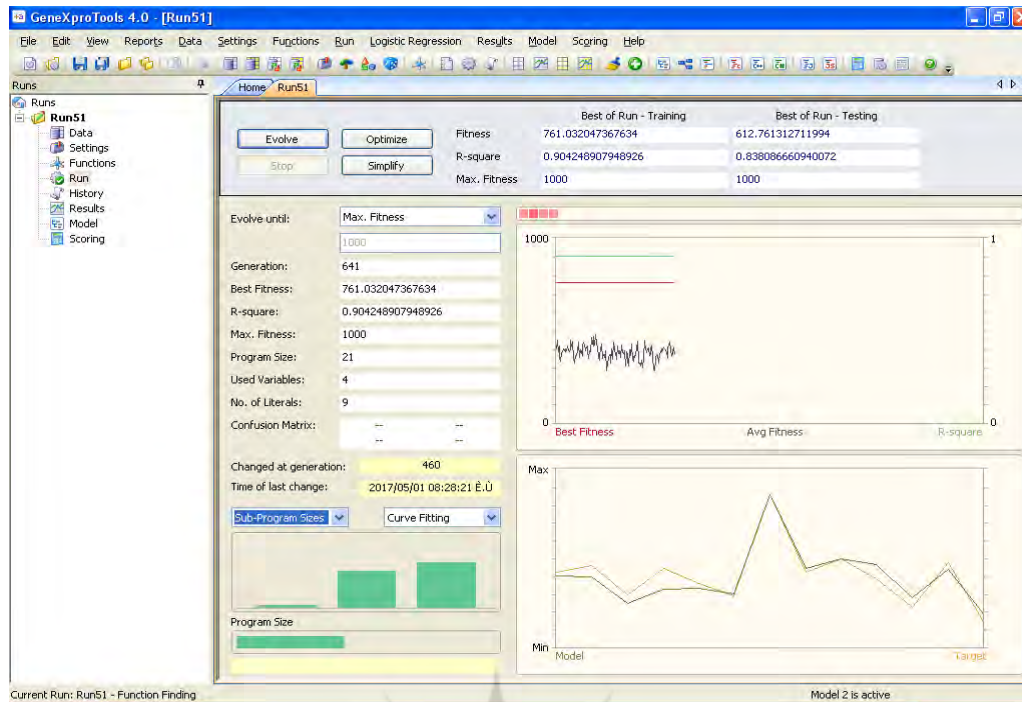
P: متوسط بارندگی سالانه بر حسب میلی‌متر

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

مرحله آموزش		مرحله صحت سنجی		ساختارها و الگوهای ورودی	
R-Square	RMSI	R-Square	RMSI		
0/661	1/229	0/86	1/807	رواناب، بارش	۱
0/583	2/451	0/09	1/533	رواناب، بارش، میانگین دما	۲
0/505	4/078	0/916	1/426	رواناب، بارش، متوسط حداقل دما، متوسط حداکثر دما	۳
0/447	2/264	0/944	1/155	رواناب، بارش، میانگین دما، متوسط حداکثر دما	۴
0/838	1/06	0/904	1/514	رواناب، بارش، میانگین دما، متوسط حداقل دما	۵
0/718	1/391	0/922	1/347	رواناب، بارش، میانگین دما، متوسط حداکثر دما، متوسط حداقل دما	۶



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

نتیجه گیری 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 داد که 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 (۸۴٪) و مقدار شاخص RMSE به کمترین مقدار خود (۱/۰۶) 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. ۱۴۰۲. ارزیابی تاثیر تغییرات کاربری اراضی روی فرسایش و رسوب با استفاده از سنجش از دور و GIS (مطالعه موردی: حوضه کال آجی استان گلستان)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، doi:10.22067/GEOEH.2022.74281.1145
- امامقلی زاده، ص.، کریمی دمنه، ر.، اژدری، خ. ۱۳۹۵. مقایسه‌ی روش‌های متداول برآورد بار رسوب معلق رودخانه کرخه با روش برنامه‌ریزی بیان ژن، نشریه جغرافیا و توسعه، ۱۴(۴۵): ۱۴۰-۱۲۱.
- بهرامی، ع.، شهیدی، ع. ۱۴۰۰. بهبود مدل DRASTIC با برنامه‌ریزی بیان ژن در تعیین آسیب پذیری آبخوان به نیترات مطالعه موردی: آبخوان دشت کرمانشاه، هیدروژئومورفولوژی، ۸(۲۸): ۳۹-۶۲.
- پاسبان، ا.ح.، عابدینی، م.، فروتن، م. ۱۴۰۱. 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 بیان ژن در برآورد رسوب دهی حوضه کسلیان، ایران، دهمین همایش سراسری محیط زیست انرژی و منابع طبیعی پایدار، تهران.
- رنجبر، ع.، امامقلی زاده، ص.، کریمی، ر. ۱۳۹۵. مدل‌سازی دبی و دبی رسوب رودخانه هراز آمل با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، پنجمین کنفرانس مدیریت جامع منابع آب، کرمان.
- روستایی، ش.، حجازی، ا.، شیرزادی، ه. ۱۴۰۱. برآورد میزان فرسایش و رسوب 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.، رئیس، م. ۱۴۰۱a. پهنه‌بندی فرسایش حوضه آبریز رزن با استفاده از مدل‌های منطق فازی، EPM و BLM در محیط GIS. جغرافیا و توسعه، ۶۸: ۶۹-۴۹.
- عابدینی، م.، جوادی علی‌بابالو، س.، مصطفی زاده، رئوف، پاسبان، ا.ح. ۱۴۰۱b. اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز کوزه‌توپراقی بر اساس فرسایش خاک و تولید رسوب با استفاده از پسیاک اصلاح‌شده (MPSIAC) در محیط GIS. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۳(۴۹): ۱۸-۳۹.

- عابدینی، م.، بهرامی‌نیا، ف.، مصطفی‌زاده، ر.، پاسبان، ا.ح. ۱۴۰۲. بررسی تاثیر تغییرات کاربری اراضی در یک دوره بیست سال بر میزان فرسایش و رسوب حوزه رسی‌چای. فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، سال دوازدهم، شماره ۴۵، صص ۱۳۳-۱۱۴.
- عابدینی، م.، جوادی، ع. ب.، س.، مصطفی‌زاده، ر.، پاسبان، ا.ح. ۱۴۰۱. ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و ژئومورفیک با مقادیر فرسایش و رسوب در حوزه آبریز کوزه‌توپراقی. هیدروژئومورفولوژی، شماره ۳۲، سال نهم، صص ۱۲۸-۱۰۵.
- عابدینی، م.، یعقوب‌نژاد، ن. ۱۳۹۶. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز رودخانه بالیخلو (سدیامچی) با استفاده از مدل‌سازی، پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، سال ششم، شماره (۱). ۱۵۵-۱۳۷.
- عبادی‌فر، م.، اشرف، ع.، محمدی‌دهرای، 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 بیان ژن برای برآورد بار رسوب معلق بر اساس پیش‌پردازش داده‌ها با روش آزمون گاما (مطالعه موردی: حوضه آبخیز رود زرد)، حفاظت منابع آب و خاک، ۸(۴): ۵۰-۳۷.
- علی‌نژادی، م.، موسوی، ف.، حسینی، خ. ۱۴۰۰. مقایسه روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و رگرسیون‌های پارامتریک و ناپارامتریک در پیش‌بینی 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 فراکوشی در ریزمقیاس‌سازی زمانی بار رسوب معلق رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه ليقوان)، نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، بهمن ماه ۱۳۹۱، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- مرادی‌نژاد، ا.، خسرویگی، 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

- Aytok and OKKsi, AA genttic progmmiin ng ppprocch to suspended sddimnnt modll ing””ELEEVIE,, 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, Environmental Resources Research, 10(1): 115-132.
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A. and Rahnema, A., 2011. Validation and testing of the

- AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100: 1-8
- Babovic, 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. Automatically defined functions in gene expression programming. In: Nédjah, 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 Programming 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.
 - ... hu, ... iong, V. bbbovi,, H. Mddsnn and N. uu ttill, *GGnttic programming and its application in real- tiee uunoff oomring”” Arrr iaan 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.