

اللَّهُ
الرَّحْمَنُ
الرَّحِيمُ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده کشاورزی

گروه آب و خاک

عنوان :

پیش‌بینی بار رسوب معلق سد کرخه به کمک برنامه‌ریزی بیان ژن

نگارش

راضیه کریمی دمنه

استاد راهنما

دکتر صمد امامقلی‌زاده

استاد مشاور

دکتر خلیل اژدری

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۳

تقدیم به آنان که:

با هستی خویش، راه را برایم گشودند...

پدرم، به پاس دست هایش که فریادش است و نومی‌دی در پناش به امید می‌گراید

مادرم، به پاس مهرش که عشق را در وجودم پروراند و دامنش سجده‌گاه مهربانی است

یکتا برادر و یگانه خواهرم، که خورشید محبتتان را غروب نمی‌ت



پس و ستایش خدای راست که سخنان در ستودن او بماند، شمارندگان شمارش نعمت هایش را ندانند و کوشندگان حق او را گزاردن نتوانند؛ و درود بر محمد (ص) و خاندان پاکش که وجودمان وام دار وجودشان است...

بوسه می زنم بر دستان پر مهر خداوند گاران مهر و مهربانی، "پدر و مادرم" که پس از خداوند وجودشان شایسته ستایش است...

باتقدیر و شکر شایسته از استاد راهنمای دلسوز و فریخته تم، جناب آقای دکتر "صدا مامعلی زاده" که با نکته های بلند و گفته های دلاور، صحیفه های سخن را علم پرور نمود و بی شک بی راهنمایی های ارزشمند ایشان، این پژوهش به سرانجام نمی رسید. اگر چه زبان رایاری و صف معاش نیست، امیدوار هستم بتوانم حق شاکردی ایشان را به جای آورم...

باپس از استاد مشاورم، جناب آقای دکتر "خلیل اژدی" که با مهربانی، زحمت مشاوری این پژوهش را متقبل شدند...

باقدردانی از سرکار خانم دکتر "کنجی نوروزی" و جناب آقای دکتر "موزن زاده" که با بزرگواری، پذیرای دایری این رساله بودند...

باتقدیر از نماینده محترم تحصیلات تکمیلی، جناب آقای دکتر "دلشادی" که با تسکینی این مسئولیت را پذیرفتند...

با شکر از سازمان آب و برق خوزستان، به ویژه مهندس "زلتی" که در تهیه اطلاعات این پژوهش مرایای رسانند...

و باپس خالصانه از دوستی که حضورش شمع راه من بود، قلمم را آرام، ذهنم را پر جوش و انگیزه ام را متعالی کرد...

چکیده

تعیین بار رسوبات معلق رودخانه‌ها به دلیل تاثیرگذاری بر طراحی و مدیریت سازه‌های آبی، از جمله موارد مهم در مهندسی آب، هیدرولیک و محیط زیست به شمار می‌رود. تاکنون تلاش‌های گوناگونی در جهت برآورد دقیق بار رسوبات معلق صورت پذیرفته است. بیشتر این تلاش‌ها با برقراری رابطه بین دبی جریان و دبی رسوب، سعی در برآورد بار رسوب معلق داشته‌اند. اما این روش‌های متداول رگرسیونی دارای عدم قطعیت می‌باشند. از این‌رو، شماری از محققان به روش‌های هوشمند مانند شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج تطبیقی- عصبی فازی و الگوریتم‌های تکاملی روی آورده‌اند. در پژوهش حاضر به منظور پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه‌های هیدرومتری جلوگیر و پای‌پل واقع در بالادست سد مخزنی کرخه، روش برنامه‌ریزی بیان ژن توسعه داده شد و نتایج با نتایج روش‌های منحنی سنج رسوب و فائو مقایسه گردید. لذا اطلاعات دبی جریان، دبی رسوب و ارتفاع باران متناظر این دو ایستگاه متعلق به سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۶۵ جمع‌آوری شد و مورد بررسی قرار گرفت. برای اجرای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن دو سناریو در نظر گرفته شد. در سناریوی اول از اطلاعات دبی جریان و دبی رسوب ایستگاه‌های هیدرومتری جلوگیر و پای‌پل استفاده شد و در سناریوی دوم علاوه بر آمار دبی جریان و دبی رسوب، 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 مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در بخش آزمون سناریوی دوم نشان داد که این روش نسبت به روش منحنی سنج رسوب، میزان خطای $RMSE$ و MAE را به مقدار ۹۱٪ و ۹۴٪ برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و ۶۰٪ و ۷۱٪ برای ایستگاه هیدرومتری پای‌پل کاهش داده است. مقایسه نتایج بخش آزمون سناریوی مذکور با روش فائو نیز نشان دهنده کاهش خطای $RMSE$ و MAE به میزان ۹۲٪ و ۹۶٪ برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و ۸۵٪ و ۹۵٪ برای ایستگاه هیدرومتری پای‌پل می‌باشد.

کلمات کلیدی: ایستگاه هیدرومتری پای‌پل، ایستگاه هیدرومتری جلوگیر، بار رسوب معلق، برنامه‌ریزی بیان ژن، رودخانه کرخه.

مقالات مستخرج از پایان نامه:

"برآورد بار رسوب معلق ورودی به سد کرخه به کمک برنامه ریزی بیان ژن و شبکه عصبی مصنوعی"، اولین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، ارائه پوستر، بهمن ۱۳۹۲، تهران.

"برآورد بار معلق رسوب ورودی به سد کرخه با استفاده از برنامه ریزی بیان ژن و مدل استنتاج تطبیقی- عصبی فازی"، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، ارائه شفاهی، اردیبهشت ۱۳۹۳، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

فهرست مطالب

عناوین	صفحه
۱-۱- تعریف مسئله	۲
۲-۱- روش انجام تحقیق	۳
۱-۲-۱- روش اداره عمران اراضی ایالات متحده (USBR)	۴
۱-۲-۲- روش فائو (FAO)	۵
۳-۱- اهداف و نوآوری تحقیق	۵
۴-۱- سازماندهی پایان نامه	۵
۱-۲- مقدمه	۸
۲-۲- پیشینه تعیین بار رسوب	۸
۲-۳- اشکال مختلف انتقال رسوب در رودخانه ها	۹
۱-۳-۲- روش های برآورد بار معلق	۱۰
۲-۳-۲- پیشینه مطالعات بار رسوب	۱۲
۲-۴- پیشینه مطالعات حوضه آبریز و سد مخزنی کرخه	۱۶
۲-۵- پیشینه کاربرد روش های هوشمند در مهندسی آب	۲۲
۲-۵-۱- پیشینه مطالعات برنامه ریزی بیان ژن در مهندسی آب	۲۵
۱-۳- مقدمه	۳۲
۲-۳- آشنایی با مفاهیم زیست شناختی طبیعی	۳۲
۳-۳- الگوریتم های تکاملی	۳۳
۱-۳-۳- الگوریتم ژنتیک (GA)	۳۴

۳۵.....	۱-۱-۳-۳ عملگرهای الگوریتم ژنتیک
۳۸.....	۲-۳-۳ برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)
۳۹.....	۱-۲-۳-۳ عملگر ترکیب
۴۰.....	۲-۲-۳-۳ عملگر جهش
۴۱.....	۳-۲-۳-۳ عملگر جایگشت
۴۳.....	۳-۳-۳ برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)
۵۰.....	۲-۳-۳-۳-۳ ساختار ژن ها در برنامه ریزی بیان ژن
۴۳.....	۱-۳-۳-۳ الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن
۴۶.....	۲-۳-۳-۳ ساختار برنامه‌ریزی بیان ژن
۴۷.....	۳-۳-۳-۳ ساختار افراد در GEP
۵۳.....	۴-۳-۳-۳ تابع برازش
۵۴.....	۴-۳ حوضه آبریز کرخه
۵۸.....	۱-۴-۳ وضعیت هواشناسی حوضه
۵۹.....	۲-۴-۳ حداکثر بارندگی محتمل
۵۹.....	۳-۴-۳ فرسایش حوضه
۶۰.....	۴-۴-۳ اهداف طرح
۶۰.....	۵-۳ داده‌های مورد استفاده
۶۲.....	۶-۳ مراحل اجرای مدل
۶۲.....	۱-۶-۳ روش منحنی سنجه رسوب (USBR)
۶۲.....	۲-۶-۳ روش فائو
۶۳.....	۳-۶-۳ برنامه‌ریزی بیان ژن
۶۳.....	۱-۳-۶-۳ تعیین تابع برازش

۶۴.....	۳-۶-۳-۲- انتخاب مجموعه ترمینال ها و مجموعه توابع
۶۵.....	۳-۶-۳-۳- انتخاب ساختار کروموزوم ها
۶۶.....	۳-۶-۳-۴- انتخاب تابع پیوند
۶۷.....	۳-۶-۳-۵- انتخاب عملگرهای ژنتیکی
۶۹.....	۳-۶-۳-۶- الگوریتم برنامه ریزی بیان ژن
۷۲.....	۳-۷- شاخص های آماری سنجش مدل ها
۷۴.....	۴-۱- مقدمه
۷۵.....	۴-۲- منحنی سنجه رسوب
۷۵.....	۴-۲-۱- ایستگاه هیدرومتری جلوگیر
۷۹.....	۴-۲-۲- ایستگاه هیدرومتری پای پل
۸۳.....	۴-۳- روش فائو
۸۳.....	۴-۳-۱- ایستگاه هیدرومتری جلوگیر
۸۵.....	۴-۳-۲- ایستگاه هیدرومتری پای پل
۸۸.....	۴-۴- مقایسه روشهای منحنی سنجه رسوب و فائو
۸۹.....	۴-۵- برنامه ریزی بیان ژن
۹۰.....	۴-۵-۱- سناریوی اول
۹۰.....	۴-۵-۱-۱- ایستگاه هیدرومتری جلوگیر
۹۹.....	۴-۵-۱-۲- ایستگاه هیدرومتری پای پل
۱۰۷.....	۴-۵-۲- سناریوی دوم
۱۰۷.....	۴-۵-۲-۱- ایستگاه هیدرومتری جلوگیر
۱۱۳.....	۴-۵-۲-۲- ایستگاه هیدرومتری پای پل
۱۱۹.....	۴-۵-۳- انتخاب سناریوی برتر و آنالیز حساسیت

۱۲۰.....	ایستگاه هیدرومتری جلوگیر ۴-۵-۱-۳
۱۲۲.....	ایستگاه هیدرومتری پای پل ۴-۵-۲-۳
۱۲۵.....	انتخاب رابطه نهایی ۴-۶-۱
۱۲۵.....	ایستگاه هیدرومتری جلوگیر ۴-۶-۱-۱
۱۲۷.....	ایستگاه هیدرومتری پای پل ۴-۶-۲-۱
۱۳۴.....	نتیجه گیری ۵-۱-۱
۱۳۷.....	پیشنهادهات ۵-۲-۱
۱۴۰.....	جدول علایم و اختصارات
۱۴۲.....	فهرست منابع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) - اشکال مختلف انتقال مواد رسوبی در رودخانه‌ها ۱۰
- شکل (۱-۳) - ترکیب تک نقطه‌ای ۳۶
- شکل (۲-۳) - ترکیب دونقطه‌ای ۳۶
- شکل (۳-۳) - ترکیب یکنواخت ۳۷
- شکل (۴-۳) - جهش تک نقطه‌ای کروموزوم‌های صفر و یک ۳۷
- شکل (۵-۳) - بیان درختی رابطه (۱-۳) ۳۸
- شکل (۶-۳) - ترکیب خطی در برنامه‌ریزی ژنتیک (پیکان‌ها نشانه نقاط ترکیب هستند) ۴۰
- شکل (۷-۳) - جهش درختی در برنامه‌ریزی ژنتیک ۴۱
- شکل (۸-۳) - متغیر جایگشت در برنامه‌ریزی ژنتیک (پیکان نقطه جایگشت را نشان می‌دهد) ۴۱
- شکل (۹-۳) - یک واقعه فرضی از جهش نقطه‌ای در برنامه‌ریزی ژنتیک و ساختار نامعتبر درخت ایجاد شده. ۴۲
- شکل (۱۰-۳) - چرخ گردان ۴۵
- شکل (۱۱-۳) - کدگذاری به‌شکل رشته خطی و کدبرداری به‌صورت ET یک کروموزوم با دو ژن در GEP ۴۸
- شکل (۱۲-۳) - بیان درختی رابطه $F(x) = \sin(x) + \sqrt{x^2 + y}$ ۴۸
- شکل (۱۳-۳) - بیان درختی رابطه (۳-۳) ۴۹
- شکل (۱۴-۳) - بیان درختی رابطه (۵-۳) ۵۱
- شکل (۱۵-۳) - بیان درختی رابطه (۶-۳) ۵۲
- شکل (۱۶-۳) - بیان درختی رابطه (۷-۳) ۵۳
- شکل (۱۷-۳) - حوضه آبریز و سد کرخه ۵۶

- شکل (۳-۱۸) - تصویر ماهواره‌ای سد کرخه ۵۷
- شکل (۳-۱۹) - (a) کدگذاری سه ژن، (b) پیوند سه ژن که در آن تابع پیوند با رنگ آبی نشان داده شده است... ۶۷
- شکل (۳-۲۰) - الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن ۷۱
- شکل (۴-۱) - نمودار دبی - دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر ۷۶
- شکل (۴-۲) - منحنی سنج رسوب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر در مرحله آموزش ۷۷
- شکل (۴-۳) - منحنی سنج رسوب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر در مرحله آزمون ۷۸
- شکل (۴-۴) - نمودار دبی - دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری پای پل ۸۰
- شکل (۴-۵) - منحنی سنج رسوب ایستگاه هیدرومتری پای پل در مرحله آموزش ۸۱
- شکل (۴-۶) - منحنی سنج رسوب ایستگاه هیدرومتری پای پل در مرحله آزمون ۸۱
- شکل (۴-۷) - رابطه بین دبی رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه فائو در مرحله آموزش ۸۴
- شکل (۴-۸) - رابطه بین دبی رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه فائو در مرحله آزمون. ۸۴
- شکل (۴-۹) - رابطه بین دبی رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه فائو در مرحله آموزش ۸۶
- شکل (۴-۱۰) - رابطه بین دبی رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه فائو در مرحله آزمون ۸۷
- شکل (۴-۱۱) - نمودار اجرای ترکیب سوم سناریوی اول GEP برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر در مرحله آموزش ۹۵
- شکل (۴-۱۲) - نمودار اجرای ترکیب سوم سناریوی اول GEP برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر در مرحله آزمون ۹۶

شکل (۴-۱۳) - بیان درختی ژن‌های ۱، ۲ و ۳ در سناریوی اول پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر	۹۸
شکل (۴-۱۴) - نمودار اجرای ترکیب دوم سناریوی اول GEP برای ایستگاه هیدرومتری پای‌پل در مرحله آموزش	۱۰۲
شکل (۴-۱۵) - نمودار اجرای ترکیب دوم سناریوی اول GEP برای ایستگاه هیدرومتری پای‌پل در مرحله آزمون	۱۰۳
شکل (۴-۱۶) - بیان درختی ژن‌های ۱، ۲ و ۳ در سناریوی اول پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای‌پل	۱۰۵
شکل (۴-۱۷) - نمودار اجرای ترکیب اول سناریوی دوم GEP برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر در مرحله آموزش	۱۰۹
شکل (۴-۱۸) - نمودار اجرای ترکیب اول سناریوی دوم GEP برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر در مرحله آزمون	۱۱۰
شکل (۴-۱۹) - بیان درختی ژن‌های ۱، ۲ و ۳ در سناریوی دوم پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر	۱۱۲
شکل (۴-۲۰) - نمودار اجرای ترکیب چهارم سناریوی دوم GEP برای ایستگاه هیدرومتری پای‌پل در مرحله آموزش	۱۱۵
شکل (۴-۲۱) - نمودار اجرای ترکیب چهارم سناریوی دوم GEP برای ایستگاه هیدرومتری پای‌پل در مرحله آزمون	۱۱۶
شکل (۴-۲۲) - بیان درختی ژن‌های ۱، ۲ و ۳ در سناریوی دوم پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای‌پل	۱۱۸
شکل (۴-۲۳) - نتایج بخش آزمون مدل‌های USBR، FAO و سناریوی دوم GEP	۱۲۵
شکل (۴-۲۴) - نتایج بخش آزمون مدل‌های USBR، FAO و سناریوی دوم GEP	۱۲۸

فهرست جداول

جدول (۳-۱) - بیشینه و کمینه داده‌های جمع‌آوری شده	۶۱
جدول (۴-۱) - نتایج حاصل از برازش منحنی سنج رسوب بر روی داده‌های رسوب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر	۷۸
جدول (۴-۲) - نتایج حاصل از برازش منحنی سنج رسوب بر روی داده‌های رسوب ایستگاه هیدرومتری پای‌پل	۸۲
جدول (۴-۳) - نتایج حاصل از برازش رابطه فائو بر روی داده‌های رسوب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر	۸۵
جدول (۴-۴) - نتایج حاصل از برازش رابطه فائو بر روی داده‌های رسوب ایستگاه هیدرومتری پای‌پل	۸۷
جدول (۴-۵) - مقایسه نتایج روش FAO نسبت به روش USBR در برآورد دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر	۸۸
جدول (۴-۶) - مقایسه نتایج روش FAO نسبت به روش USBR در برآورد دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری پای‌پل	۸۹
جدول (۴-۷) - مقادیر پارامترهای برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر	۹۱
جدول (۴-۸) - ترکیب پارامترهای ورودی در سناریوی اول برنامه‌ریزی بیان ژن	۹۲
جدول (۴-۹) - پارامترهای آماری دقت مدل‌های حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن در سناریوی اول	۹۴
جدول (۴-۱۰) - مقادیر ثابت در بیان درختی سناریوی اول مدل پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر	۹۷
جدول (۴-۱۱) - مقادیر پارامترهای برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای-پل	۹۹
جدول (۴-۱۲) - ترکیب پارامترهای ورودی در سناریوی اول برنامه‌ریزی بیان ژن	۱۰۰
جدول (۴-۱۳) - پارامترهای آماری دقت مدل‌های حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن در سناریوی اول	۱۰۱

جدول (۴-۱۴) - مقادیر ثابت در بیان درختی سناریوی اول مدل پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای‌پل	۱۰۳
جدول (۴-۱۵) - نتایج برازش سناریوی اول GEP بر روی داده‌های رسوب هر دو ایستگاه در مرحله آزمون. ۱۰۶	
جدول (۴-۱۶) - ترکیب پارامترهای ورودی در سناریوی دوم برنامه‌ریزی بیان ژن	۱۰۷
جدول (۴-۱۷) - پارامترهای آماری دقت مدل‌های حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن در سناریوی دوم	۱۰۸
جدول (۴-۱۸) - مقادیر ثابت در بیان درختی سناریوی دوم مدل پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر	۱۱۰
جدول (۴-۱۹) - ترکیب پارامترهای ورودی در سناریوی دوم	۱۱۳
جدول (۴-۲۰) - پارامترهای آماری دقت مدل‌های حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن در سناریوی دوم	۱۱۴
جدول (۴-۲۱) - مقادیر ثابت در بیان درختی سناریوی دوم مدل پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای‌پل	۱۱۶
جدول (۴-۲۲) - نتایج برازش سناریوی دوم GEP بر روی داده‌های رسوب هر دو ایستگاه در مرحله آزمون	۱۱۹
جدول (۴-۲۳) - نتایج بهینه سناریوی اول و دوم GEP برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر	۱۲۰
جدول (۴-۲۴) - درصد افزایش یا کاهش شاخص‌های آماری در بهترین حالت سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول	۱۲۱
جدول (۴-۲۵) - آنالیز حساسیت پارامترهای مستقل ایستگاه هیدرومتری جلوگیر	۱۲۲
جدول (۴-۲۶) - نتایج بهینه سناریوی اول و دوم GEP برای ایستگاه هیدرومتری پای‌پل	۱۲۳
جدول (۴-۲۷) - درصد افزایش یا کاهش شاخص‌های آماری در بهترین حالت سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول	۱۲۳
جدول (۴-۲۸) - آنالیز حساسیت پارامترهای مستقل ایستگاه هیدرومتری پای‌پل	۱۲۴

- جدول (۴-۲۹) - نتایج مدل‌های FAO، USBR و سناریوی دوم GEP ۱۲۶
- جدول (۴-۳۰) - میزان افزایش دقت و کاهش خطای روش GEP نسبت به روش‌های FAO و USBR . ۱۲۷
- جدول (۴-۳۱) - نتایج مدل‌های FAO، USBR و سناریوی دوم GEP ۱۲۹
- جدول (۴-۳۲) - میزان افزایش دقت و کاهش خطای روش GEP نسبت به روش‌های FAO و USBR . ۱۳۰

فصل اول

کلیات

۱-۱- تعریف مسئله

توسعه و حیات تمدن‌های بشری به آب وابسته است. افزایش روزافزون جمعیت، صنعتی شدن جوامع و روند رو به رشد تولید، نیاز به آب را به عنوان عنصر اصلی پیشرفت و رشد اقتصادی نمایان تر نموده است. بدیهی است با افزایش تقاضا در بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعت و شرب، مدیریت منابع تجدیدشونده با بحران روبه‌رو می‌گردد. از دیگر عوامل تاثیرگذار، دخالت‌های مستقیم و غیرمستقیم بشر است که پایداری منابع را با چالش روبه‌رو می‌نماید، یکی از مشکلات ایجادشده فرسایش خاک است که پس از انتقال و ترسیب در پایاب، فرایند رسوب‌گذاری را به عنوان یکی از چالش‌های جدی سازه‌های آبی ایجاد می‌نماید (ماکنالی‌زاده، ۱۳۸۷).

از جمله مهم‌ترین مشکلات ناشی از فرسایش و رسوبگذاری، از بین رفتن اراضی حاصل‌خیز کشاورزی، پرشدن مخازن سدها و کانال‌های آبیاری است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۱). رسوبگذاری در مخازن سدها سبب مشکلاتی از جمله کاهش حجم مفید مخزن سد، اختلال در عملکرد دریچه‌های تخلیه کننده تحتانی، عدم اطمینان پذیری در کنترل سیلاب، ایجاد نیروی مضاعف هنگام زمین‌لرزه و افزایش کاذب سطح آب مخزن می‌گردد (پالمیری و همکاران، ۲۰۰۳).

طبق گزارش کمیته بین المللی سدهای بزرگ^۱ (ICOLD)، بیش از ۴۰۰۰۰ سد بزرگ در دنیا با مجموع ظرفیت ذخیره‌سازی 7000 km^3 به منظور ذخیره آب، کنترل سیلاب، آبیاری اراضی کشاورزی و تولید انرژی برقابی وجود دارد. سالانه بر اثر رسوب‌گذاری در حدود ۱-۵٪ از ظرفیت این سدها کاسته خواهد شد. لذا به منظور جبران ظرفیت از دست رفته، بایستی همه ساله ۳۰۰-۴۰۰ سد بزرگ با ظرفیت مخزن ۱۵۰ میلیون مترمکعب ساخته‌شود که خود هزینه‌ای در حدود ۱۲ میلیارد دلار در بر خواهد داشت. خاورمیانه نیز با از دست دادن سالانه ۱/۵٪ از ظرفیت مخازن در اثر رسوبگذاری، پس از چین در رتبه دوم

1- International Committee of Large Dams

قرار گرفته است (پالمیری و همکاران، ۲۰۰۳). در ایران نیز، سالانه ۱-۷۵٪ از ظرفیت مخازن سدها بر اثر رسوبگذاری از بین می‌رود که این رقم بیشتر از متوسط جهانی است (موسسه تحقیقات آب، ۲۰۰۰). با توجه به قرارگیری ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و بهره‌مندی از یک سوم بارش‌های جهانی، توجه به مسئله رسوبگذاری مخازن سدها به‌منظور حفظ و صیانت از منابع آبی و سرمایه‌های کشور ضروری به‌نظر می‌رسد.

در این میان، رسوبگذاری مخازن سدهای استان خوزستان، یک موضوع مهم قلمداد می‌شود که علاوه بر کاهش راندمان آبیاری، بر روی کیفیت آب شرب و کشاورزی تاثیر می‌گذارد (حاجی علی گل و همکاران، ۱۳۸۷). رودخانه کرخه به‌عنوان سومین رودخانه بزرگ کشور از لحاظ آبدهی، حاوی رسوبات زیادی است (وزارت نیرو، ۱۳۸۰). لذا با توجه به‌مسایل ذکرشده، مطالعه رسوبگذاری مخزن این سد از جمله موارد مهمی است که باید مورد توجه کارشناسان قرار گرفته شود.

۱-۲- روش انجام تحقیق

برای برآورد رسوبات معلق رودخانه‌ها می‌توان از روش‌های مختلفی مانند USBR، FAO و ... استفاده کرد. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های هوشمند مانند شبکه عصبی مصنوعی^۱، سیستم استنتاج تطبیقی-عصبی فازی^۲، الگوریتم ژنتیک^۳، برنامه‌ریزی ژنتیک^۴ و برنامه‌ریزی بیان ژن^۵ مورد توجه محققین قرار گرفته است. در تحقیق حاضر از روش برنامه‌ریزی بیان ژن به این منظور استفاده شده است.

1 - Artificial Neural Network

2 - Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

3 - Genetic Algorithms

4 - Genetic Programming

5 - Gene Expression Programming

برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) روشی جدید در فناوری هوش مصنوعی است که در سال ۱۹۹۹ توسط فریرا^۱ ابداع گردید. این روش توسعه‌یافته الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) است (فریرا، ۲۰۰۱). تفاوت اساسی سه الگوریتم GP, GA و GEP به ساختار افراد باز می‌گردد: در الگوریتم ژنتیک اعضا رشته‌های خطی با طول ثابتند، در برنامه‌ریزی ژنتیک، اعضا رشته‌های غیرخطی با شکل و اندازه متفاوت هستند و به شکل درخت تجزیه^۲ بیان می‌شوند، درخت تجزیه (کدگذاری درختی) که به برنامه‌نویسی ژنتیکی شهرت دارد، شیوه‌ای از کدگذاری است که در برنامه‌های کامپیوتری و برنامه‌ریزی تکاملی به کار می‌رود، در این شیوه کدگذاری، هر کروموزوم^۳ مانند درختی است که هر شاخه آن نشان‌دهنده یک شی یا بخشی از برنامه کامپیوتری است (مطیع قادر و همکاران، ۱۳۸۹). در برنامه‌ریزی بیان ژن، اعضا رشته‌های خطی با طول ثابت هستند (ژنوم^۴ یا کروموزوم) که سپس به شکل غیر خطی با اندازه و شکل و بیان درختی^۵ تعریف می‌گردند. از جمله مهم‌ترین مزایای GEP آن است که کروموزوم‌ها خطی، فشرده، نسبتاً کوچک و آسان برای عملیات ژنتیکی تعریف شده‌اند، همچنین بیان درختی منحصر به‌فرد این قابلیت را برای الگوریتم فراهم می‌کند که با کارایی شده‌اند را بیان می‌نماید، ایجاد این اعضای منحصر به‌فرد این قابلیت را برای الگوریتم فراهم می‌کند که با کارایی بالا، از تکنیک‌های تطبیقی موجود پیشی بگیرد (فریرا، ۲۰۰۱).

۱-۲-۱- روش اداره عمران اراضی ایالات متحده^۶ (USBR)

روش منحنی سنج رسوب^۷ (SRC)، یک روش رگرسیون آماری است که مقادیر اندازه‌گیری شده هم‌زمان دبی و دبی رسوب را به شکل منحنی توانی بیان می‌کند (ماکنالی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹).

1 -Ferreira
 2 -Parse Tree
 3- Chromosome
 4- Genome
 5 -Expression Tree (ET)
 6- United States Bureau of Reclamation
 7- Sediment Rating Curve

۱-۲-۲- روش فائو^۱ (FAO)

روش فائو، روش اصلاحی رابطه USBR است که به منظور لحاظ نمودن اثر دبی‌های سیلابی، توسط جونز^۲ (۱۹۸۱) ارائه شده است (ظهیری و همکاران، ۱۳۸۸).

۱-۳- اهداف و نوآوری تحقیق

روابط تجربی از جمله منحنی سنجه رسوب، میزان بار رسوبات را بیشتر یا کم‌تر از میزان واقعی آن گزارش می‌کنند. تخمین نادرست حجم رسوبات، منجر به طراحی مخزن با حجمی کم‌تر یا بیشتر از نیاز واقعی آن خواهد گردید که خود نیز مشکلاتی را به دنبال خواهد داشت (آیتک و کیسی^۳، ۲۰۰۸). لذا با توجه به اهمیت و جایگاه سد کرخه در تامین منابع آبی کشور، در پژوهش حاضر از روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) به عنوان یک الگوریتم تطبیقی جدید، برای پیش‌بینی بار رسوب معلق سد کرخه استفاده شده و نتایج با نتایج روش‌های متداول مانند منحنی سنجه رسوب و فائو مقایسه گردیده است. با توجه به آن‌چه که اشاره شد، رسوبگذاری مخازن و سدها پدیدآورنده مشکلات عدیده‌ای است که شاید مهم‌ترین آن از دست رفتن سرمایه‌های کشور و منابع طبیعی باشد. لذا بدیهی است که پیش‌بینی هرچه دقیق‌تر بار رسوبات می‌تواند در بهبود مشکلات ناشی از رسوبگذاری موثر واقع گردد. از این‌رو، در صورتی که نتایج حاصل از پیش‌بینی به کمک برنامه‌ریزی بیان ژن موفقیت‌آمیز باشد، می‌توان از این روش به عنوان روشی پیشنهادی در پیش‌بینی بار رسوبات رودخانه‌ها و مخازن نام برد.

۱-۴- سازمان‌دهی پایان‌نامه

چگونگی انجام و نتایج این تحقیق در ۵ فصل سازمان‌دهی شده است که به ترتیب ذیل می‌باشد:

1- Food and Agriculture Organization

2- Jones

3- Aytek & Kisi

فصل اول: کلیات

فصل دوم: سابقه و پیشینه تحقیق

فصل سوم: مواد و روش انجام پژوهش

فصل چهارم: بحث و نتایج

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

و در قسمت انتهایی پایان‌نامه، منابع مورد استفاده آمده است.

فصل دوم

سابقه و پیشینه

تحقیق

۲-۱- مقدمه

بار رسوبی از جمله عوامل مهم تاثیرگذار در عملکرد هیدرولیکی سازه‌های آبی و ساختار ریخت‌شناسی رودخانه‌ها به‌شمار می‌رود. هم‌چنین بهره‌برداری از رودخانه‌ها و مدیریت منابع و سازه‌های آبی، در گرو آگاهی از کمیت بار رسوبی می‌باشد. از این‌رو، پیش‌بینی میزان بار رسوب معلق رودخانه‌ها و مخازن سدها و به‌کارگیری روش‌های کارآمد برای محاسبه رسوب، از جمله موضوعات مهم در مسایل هیدرولوژی، مهندسی رودخانه و مدیریت منابع آب می‌باشد که مورد توجه محققان قرار گرفته است. لذا پژوهشگران برای دستیابی به دقت هر چه بالاتر در امر تعیین بار رسوب معلق، روش‌های گوناگونی را مورد آزمایش و آزمون قرار داده‌اند. در پژوهش حاضر، روش‌های مرسوم رگرسیونی و روش برنامه‌ریزی بیان ژن که تکامل یافته روش برنامه‌ریزی ژنتیک است، مورد استفاده قرار گرفته اند.

۲-۲- پیشینه تعیین بار رسوب

تعیین بار رسوبی رودخانه‌ها نیازمند تهیه اطلاعات آماری، اندازه‌گیری‌های میدانی و جمع‌آوری اطلاعات پایه در خصوص رودخانه و حوضه آبریز می‌باشد. از اوایل قرن نوزدهم میلادی استفاده از روش‌های تجربی متداول گردید و برای نخستین بار، در سال ۱۸۰۸ میلادی، بار معلق توسط گراس و سابورس^۱ اندازه‌گیری شد (وزارت نیرو، ۱۳۹۱). ثبت داده‌های آماری دبی جریان از اوایل قرن نوزدهم با توسعه دانش هیدرولوژی آغاز شد و برای اولین بار اندازه‌گیری منظم آبدی و تراز سطح آب از سال ۱۸۸۸ میلادی بر روی رودخانه می‌سی‌سی‌پی^۲ توسط سازمان زمین‌شناسی امریکا^۳ گزارش شده است (وزارت نیرو، ۱۳۸۶). با گسترش و توسعه مبانی نظری و ضرورت به‌کارگیری روش‌های علمی در ساماندهی رودخانه‌ها و طراحی

1 - Grosse & Subours

2 - Mississippi River

3 - U.S Geological Survey

تاسیسات متنوع هیدرولیکی با هدف مهار و بهره‌برداری از آب رودخانه‌ها، سنجش‌های میدانی با هدف تعیین دبی جریان، بار معلق، بار بستر و خصوصیات مواد رسوبی با استفاده از ابزارهای تخصصی، به‌ویژه بین سال‌های ۱۹۲۵ تا ۱۹۴۰ میلادی گسترش فراوانی یافت. اندازه‌گیری منظم غلظت و تعیین بار معلق، بار بستر و نمونه‌برداری از مواد بستر نیز به دهه‌های سی و چهل میلادی باز می‌گردد. از دهه هفتاد با فراگیر شدن تجهیزات الکترونیکی و ورود سامانه‌های ماهواره‌ای به عرصه داده‌سنجی، ثبت تغییر و تحولات رودخانه‌ها و روش تعیین کمیت بار رسوبی حمل شده توسط رودخانه‌ها از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار گردید (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).

۲-۳- اشکال مختلف انتقال رسوب در رودخانه‌ها

مواد رسوبی در رودخانه‌ها به دو شکل بار معلق^۱ و بار بستر^۲ جابه‌جا می‌شود. بار کل، مجموع بار بستر و بار معلق است که به‌عنوان آورد رسوب رودخانه شناخته می‌شود. بار معلق خود شامل دو قسمت متمایز بار شسته^۳ و بار معلق بستری^۴ است. بار شسته قسمتی از مواد رسوبی ریزدانه است که بر اثر بارندگی از خاک حوضه آبریز، فرسایش یافته و به شبکه آبراهه‌ها می‌پیوندد. بار معلق بستری نیز بخشی از دانه‌های موجود در بستر است که به‌حالت معلق درآمده و توسط جریان آب حمل می‌شود. مجموع این دو، بار مواد بستر^۵ اطلاق می‌شود و معرف مواد رسوبی برخاسته از بستر است (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).

با توجه به شکل (۱-۲)، بار بستر و بار معلق بستری با یکدیگر در تعامل هستند و چنان‌چه بر اثر کاهش سطح مقطع جریان یا افزایش شیب بستر، تنش‌های هیدرولیکی افزایش یابند، بخشی از بار بستر به‌حالت

1- Suspended Load

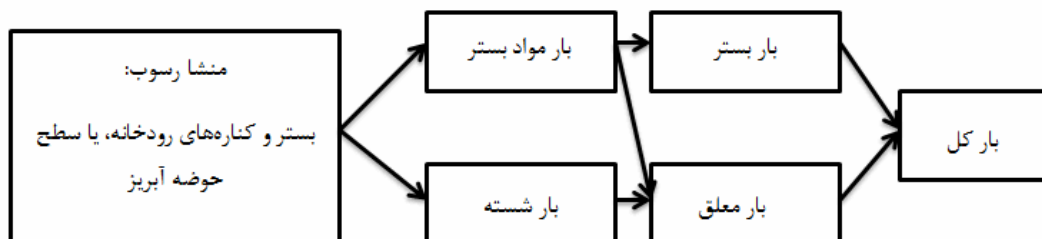
2- Bed Load

3- Wash Load

4- Bed Material Suspended Load

5- Bed Material Load

معلق درآمد و سبب افزایش بار معلق بستری خواهد گردید. همچنین با کاهش تنش هیدرولیکی بر اثر کاهش دبی جریان، افزایش سطح مقطع یا کاهش شیب بستر نیز افزایش بار بستر مشاهده خواهد گردید (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).



شکل (۱-۲)- اشکال مختلف انتقال مواد رسوبی در رودخانه‌ها (وزارت نیرو، ۱۳۹۱ و ۱۳۸۱)

۲-۳-۱- روش‌های برآورد بار معلق

بخش مهمی از بار رسوبی حمل شده توسط رودخانه‌ها به بار معلق اختصاص دارد. بار معلق به وزن رسوباتی اطلاق می‌گردد که درون آب و بالاتر از لایه بستر، به مدت زمان قابل توجهی به صورت معلق در حرکت هستند و وزن آن‌ها توسط جریان آب حمل می‌شود (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷). از جمله عوامل موثر در معلق شدن ذرات، پدیده تلاطم است که موجب جدا شدن دانه‌های رسوب از بستر، اختلاط با جریان و حمل توسط آب خواهد گردید (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).

روش‌های برآورد بار رسوب معلق رودخانه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شود، دسته اول به روش‌های مبتنی بر قوانین دینامیک و مکانیک سیالات که عموماً توسط متخصصان و صاحب‌نظران علم هیدرولیک ارائه شده است، اطلاق می‌گردد. دسته دوم روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری‌های مستقیم و تحلیل‌های آماری است که توسط متخصصان هیدرولوژی ارائه شده است (وروانی و خلیقی، ۱۳۸۶).

از جمله راهکارهای مناسب جهت تعیین بار معلق، استفاده از آمار ثبت شده در ایستگاه‌های آب‌سنجی است. در این ایستگاه‌ها، ضمن اندازه‌گیری دبی جریان (Q)، نمونه‌برداری‌هایی با هدف تعیین غلظت رسوب (C)، صورت می‌پذیرد. پس از تعیین C ، بار رسوب معلق (Q_s) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Q_s = 0.0864CQ_d \quad (۱-۲)$$

در رابطه فوق، Q_s بار رسوب معلق در واحد تن بر روز، C غلظت رسوبات در واحد میلی‌گرم بر لیتر و Q_d دبی جریان روزانه است (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).

روش اندازه‌گیری بار معلق رسوب برپایه اندازه‌گیری غلظت رسوب معلق و دبی جریان، مستلزم اندازه‌گیری پیوسته است و برای رودخانه‌های دائمی مقدور می‌باشد (تلوری، ۱۳۸۲؛ پرهت و دومیری گنجی، ۱۳۸۴؛ صادقی، ۱۳۸۴؛ عرب خدری، ۱۳۸۴). اما در واقعیت، اندازه‌گیری پیوسته و روزانه دبی جریان و غلظت بارمعلق، به‌دلایل مختلف از جمله هزینه‌های مالی و تعدد و تنوع رودخانه‌ها میسر نمی‌باشد، لذا در عمل، سالانه تعداد معدودی اندازه‌گیری دبی جریان و غلظت رسوب صورت می‌پذیرد (وزارت نیرو، ۱۳۹۱). به‌منظور افزایش دقت برآورد رسوب به‌روش منحنی سنج، روش‌های مختلفی از جمله دسته‌بندی داده‌ها به‌صورت دسته‌بندی سالانه، فصلی، ماهانه، حد واسط دسته‌ها، دبی کلاسه، دوره کم‌آبی و پرآبی نیز، مورد استفاده قرار می‌گیرد (مهدوی، ۱۳۸۸).

از جمله روش‌های دیگر در تعیین بار رسوب معلق رودخانه‌ها، معادلات عددی و روش‌های تجربی هستند که طی دهه‌های گذشته توسعه یافته و مورد بازبینی قرار گرفته‌اند (سیناکادان و همکاران، ۲۰۱۰).

۲-۳-۲- پیشینه مطالعات بار رسوب

بررسی منابع نشان می‌دهد محققین مختلف، مطالعات گسترده‌ای بر روی بار رسوبی رودخانه‌ها، سرشاخه-های رود و مخازن انجام داده‌اند که از آن جمله، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- کرافورد^۱ (۱۹۹۱) چندین روش از جمله روش خطی تغییریافته، روش لگاریتمی و روش غیرخطی وزنی را برای محاسبه پارامترهای منحنی سنج رسوب مقایسه کرد و در نهایت نتیجه گرفت که مدل خطی تغییریافته نسبت به دیگر روش‌ها، برتری دارد.

۲- عرب‌خدری و همکاران (۱۳۸۳) از ۱۸ روش در برآورد بار معلق ۱۷ ایستگاه هیدرومتری کشور بهره گرفتند و روش تلفیق جریان روزانه و منحنی سنج حد وسط دسته‌ها، به‌عنوان روش مبنای برآورد رسوب‌دهی انتخاب شد.

۳- بهرامی و صمدی بروجنی (۱۳۸۴) با کاربرد معادلات مختلف سنج رسوب در مخازن سدهای دز، کرخه، شهیدعباسپور و مارون نشان دادند که معادلات به‌دست آمده به‌تفکیک ماه‌های کم‌آبی و پرآبی، بیشترین دقت را در برآورد رسوب‌دهی حوضه داشته است.

۴- صادقی (۱۳۸۴) در پژوهشی، مفهوم رگرسیون را برای تهیه دو معادله جداگانه سنج رسوب برای شاخه‌های بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف در حوضه آبریز امامه و زرین‌درخت استفاده کرد. نتایج، موید توانایی روش مفهوم رگرسیون در تهیه دو معادله جداگانه برای شاخه‌های بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف است که موجب افزایش دقت در برآورد رسوب خواهد گردید.

1- Crawford

۵- لطیفی و حسن‌زاده (۱۳۸۵) با بررسی رسوب انتقالی ۵ ایستگاه هیدرومتری بر روی رودخانه گاماسیاب و سرشاخه‌های اصلی آن، به کمک معادلات انتقال رسوب و با آزمون چند روش دریافتند که روش تلفیق دبی متوسط روزانه و منحنی سنجه تک خطی، کم‌ترین میانگین خطای مطلق^۱ و بیشترین ضریب همبستگی^۲ را نسبت به سایر روش‌ها داراست و روش برتر محسوب می‌گردد.

۶- مساعدی و همکاران (۱۳۸۵) تعداد ۳۵۹۵ داده متناظر دبی جریان و دبی رسوب رودخانه گرگان-رود در ایستگاه هیدرومتری قزاقلی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که مدل حد وسط دسته‌ها توانایی بیشتری از منحنی‌های سنجه رسوب به‌روش خطی، خطی شکسته، فصلی و ماهانه داراست.

۷- وروانی و خلیقی سیگارودی (۱۳۸۶) با هدف بررسی میزان خطای منحنی‌های سنجه رسوب در برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی، اطلاعات ثبت شده از چند واقعه سیلابی در ایستگاه هیدرومتری پل‌دوآب واقع بر رودخانه قره‌چای در استان مرکزی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که منحنی سنجه رسوب، با خطای ۴۰-۸۰ درصد، میزان رسوبات را کمتر از میزان واقعی برآورد می‌کند و روش فائو خطای کمتری را به‌خود اختصاص داده است. همچنین نتایج نشان داد روش حد وسط دسته‌ها، روشی ناکارآمد در برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی می‌باشد.

1- Mean Absolute Error (MAE)

2- Correlation Coefficient (R2)

۸- غفاری و همکاران (۱۳۸۸) در ایستگاه‌های بالادست حوضه سد لتیان و طالقان، به تعیین مناسب-

ترین روش جهت برآورد بار رسوب معلق پرداختند. نتایج این تحقیق موید برتری روش حد وسط

دسته‌ها با کم‌ترین میزان میانگین درصد خطای نسبی و بیشترین ضریب تبیین می‌باشد.

۹- زنگانه و همکاران (۱۳۸۸) با روش دسته‌بندی داده‌ها به روش‌های ماهانه، سالانه، فصلی، حد وسط

دسته‌ها، دوره کم آبی و پرآبی، به برآورد رسوب در ایستگاه ارازکوسه حوضه گرگان‌رود پرداختند.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که روش حد وسط دسته‌ها در ایستگاه ارازکوسه مناسب‌ترین روش

در برآورد بار رسوب معلق می‌باشد.

۱۰- کالوندی و همکاران (۱۳۸۹) به منظور آنالیز روش‌های مختلف منحنی سنج رسوب، به مطالعه

آورد رسوب سد دوستی پرداختند. در این پژوهش، عملکرد ۷ روش منحنی سنج عبارت از هم-

بستگی سالیانه، USBR، متوسط دسته‌ها، متوسط دسته‌ها- USBR، متوسط دسته‌ها- فائو،

فرگوسن- USBR و متوسط دسته‌ها- فرگوسن مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، نتایج این

تحقیق برتری روش‌های متوسط دسته‌ها- فائو و متوسط دسته‌ها- فرگوسن را نشان داد.

۱۱- بیلی و بدری علی^۱ (۲۰۱۰) به مطالعه انتقال رسوب در یکی از سرشاخه‌های رود نیل پرداختند و

از اطلاعات مربوط به انتقال رسوب سه واقعه سیلابی بهره گرفتند. در این پژوهش، غلظت بار

رسوبی و تغییرات اندازه رسوبات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، همچنین به منظور بررسی

حرکت بار بستر، به کمک معادلات بگنولد^۱ و مارتین^۲، رابطه مناسبی بین سرعت جریان و نرخ انتقال بار بستر توسعه داده شد.

۱۲- کیا و عمادی (۱۳۹۱) در پژوهشی با کلاسه‌بندی دبی و تفکیک زمانی داده‌ها، چندین مدل رگرسیون آماری را در برآورد بار رسوب معلق سالانه رودخانه بابل‌رود مورد مقایسه قرار دادند و دریافتند که مدل تلفیق حد وسط دسته‌ها به‌روش فائو، مدلی بهینه در برآورد بار رسوب معلق می‌باشد.

۱۳- دیوداتو^۳ و همکاران (۲۰۱۲) تاثیرات تغییرات فصلی و اقلیمی را در آورد رسوب سالانه بالادست رودخانه دانوب^۴ بررسی کردند. آن‌ها در این پژوهش از اطلاعات سالانه رواناب و آورد رسوب حوضه مورد مطالعه، استفاده کردند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی آورد سالانه رسوبات با در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی و بارش و رواناب، به‌دلیل تاثیرات مستقیم بر روی فرسایش خاک، نتایج بهتر و قابل قبول‌تری را ارائه خواهد کرد.

۱۴- ژانگ^۵ و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی با مطالعه اطلاعات ماهانه ۵۰ ساله دبی جریان و غلظت رسوبات معلق رودخانه پیرل^۶ در چین، وابستگی روابط منحنی سنج رسوب را به زمان و تغییرات آن را نشان دادند.

1- Bagnold
2- Martin
3- Diodato
4- Danub
5- Zhang
6- Pearl

۲-۴- پیشینه مطالعات حوضه آبریز و سد مخزنی کرخه

رودخانه کرخه سومین رودخانه بزرگ کشور از نقطه نظر آبدهی است، سد مخزنی و نیروگاه کرخه با قابلیت ذخیره ۱۶٪ از کل منابع آبی کشور و تولید انرژی، نقش مهمی در مدیریت منابع آبی و برقابی کشور ایفا می‌نمایند (خسروپور و بنی‌هاشمی، ۱۳۸۷). لذا توجه به مسایل هیدرولوژیکی، اقلیمی، کشاورزی و منابع آب و خاک این حوضه همواره مورد توجه محققان قرار داشته است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- ایزدبخش و همکاران (۱۳۸۰) به کمک پارامترهای فیزیوگرافیک حوضه از جمله طول آبراهه اصلی، شیب میانگین حوضه، نسبت کشیدگی و درصد تراکم زهکشی، حداکثر دبی میانگین روزانه حوضه‌های گاماسیاب، قره‌سو، سیمره و کشکان را ارزیابی و برآورد کردند. آن‌ها در این پژوهش نشان دادند که به دلیل کوهستانی بودن منطقه مورد مطالعه، پارامترهای طول آبراهه اصلی با نمای مثبت و تراکم زهکشی با نمای منفی، بیشترین سهم را در تولید دبی روزانه دارند. همچنین پارامتر زمان تمرکز نیز با نمای منفی بر شاخص سیل حوضه موثر است.

۲- قمشی و ترابی پوده (۱۳۸۱) معادله‌های برآورد بار رسوب را در رودخانه‌های استان خوزستان از جمله ایستگاه هیدرومتری پای‌پل در بالادست سد مخزنی کرخه ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد:

- استفاده از روش انیشتین^۱ به دلیل پراکندگی در برآورد بار رسوب، در رودخانه‌های استان خوزستان توصیه نمی‌شود.
- روش بگنولد برآورد کم‌تری از میزان بار رسوبات معلق دارد.

1- Einstein

- روش ساماگا^۱ با پراکندگی زیاد، برآورد بیشتری را از بار رسوبات معلق در رودخانه کرخه نشان می‌دهد.
- روش یانگ^۲ در برآورد بار رسوب معلق دارای پراکندگی زیاد و روند نامنظم می‌باشد و به‌کارگیری از آن دارای خطای زیادی خواهد بود.
- روش انگلوند^۳ - هانسن^۴ که مبتنی بر انرژی تبادلی جریان می‌باشد، برآورد نسبتاً مناسبی را از بار رسوب معلق داراست.

۳- حاجی علی‌گل و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی، دبی رسوب ورودی به مخزن سد کرخه را در ایستگاه‌های هیدرومتری جلوگیر و پل زال برآورد کردند. نتایج این مدل‌سازی، برتری روش شبکه عصبی مصنوعی را بر روش منحنی سنج رسوب به‌دلیل دقت بالاتر در پیش‌بینی نشان می‌دهد. مدل فوق با یک لایه پنهان و تابع محرک سیگموئید، به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد. هم‌چنین نتایج این پژوهش نشان داد که روش منحنی سنج رسوب در هر دو ایستگاه، میزان بار رسوبات معلق را کمتر از میزان واقعی برآورد می‌نماید.

۴- بینا و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از پارامترهای فیزیوگرافیک بالادست حوضه کرخه، به برآورد بار رسوبات معلق آن پرداختند. در این پژوهش مدل یک، دو و سه پارامتری خطی و غیرخطی جهت برآورد رسوب متوسط سالانه استخراج گردید که مدل‌های دو پارامتری به‌دلیل دقت خوب و پیچیدگی کمتر و با ضریب تبیین ۰/۸۲-۰/۹۸ انتخاب شدند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان

1- Samaga
2- Yang
3- Englund
4- Hansen

داد که پارامترهای مساحت و شیب حوضه به ترتیب نقش اساسی را در تعیین آورد رسوب ایفا می کنند و میزان رسوبدهی در قسمت های کم شیب، بیشتر است.

۵- ظهیری و همکاران (۱۳۸۸) به کمک اطلاعات روزانه دبی جریان و غلظت رسوبات معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر واقع در بالادست سد مخزنی کرخه، حجم رسوب ورودی به مخزن سد کرخه را با استفاده از روش منحنی سنج رسوب و فائو برآورد کردند و به منظور صحت سنجی نتایج از اطلاعات هیدروگرافی سال ۱۳۸۴ بهره گرفتند. نتایج این پژوهش، برتری روش فائو را در مقایسه با روش منحنی سنج رسوب تایید می نماید.

۶- اوژن و همکاران (۱۳۸۹) به مقایسه روش های امتداد منحنی سنج دبی در ۱۳ ایستگاه هیدرومتری حوضه آبریز کرخه در استان لرستان، به کمک روش های تجربی شزی^۱، مانینگ^۲، لگاریتمی و سرعت- سطح مقطع پرداختند. نتایج، موید برتری روش لگاریتمی جهت امتداد منحنی سنج دبی به منظور تخمین دبی حداکثر می باشد.

۷- ذرتی پور و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از مدل GSTARS-3 به شبیه سازی رسوب گذاری در مخزن سد کرخه پرداختند. مدل مذکور به کمک تابع پارکر^۳ (۱۹۹۰) تحلیل و واسنجی گردید. اطلاعات معرفی شده به مدل شامل سه دسته اطلاعات هندسی، اطلاعات هیدرولیکی و اطلاعات مربوط به رسوب بستر می باشد. نتایج تحلیل آماری و واسنجی مدل با اطلاعات هیدروگرافی سال

1- Chezy
2- Manning
3- Parker

۱۳۸۴، نشان داد که این تابع برای بررسی و پیش‌بینی وضعیت رسوبگذاری در مخزن سد کرخه به‌شکلی موفق عمل می‌نماید.

۸- ماکنالی‌زاده و همکاران (۱۳۸۹) آورد رسوب کل سرشاخه‌های اصلی رودخانه به سد مخزنی کرخه را براساس روش‌های منحنی سنج رسوب و فائو بررسی و نتایج را با نتایج حاصل از هیدروگرافی سال ۱۳۸۴ مقایسه کردند. بر اساس این پژوهش مشخص شد که روش فائو با میزان خطای کم‌تر در مقایسه با روش منحنی سنج رسوب، از دقت بالاتری در برآورد بار رسوب معلق برخوردار است که این نتیجه، با نتیجه پژوهش ظهیری و همکاران (۱۳۸۸) مطابقت دارد.

۹- باغبان‌پور و کاشفی‌پور (۱۳۹۰) به‌کمک مدل عددی FASTER، به مدل‌سازی عددی انتقال رسوب معلق غیرچسبنده در محدوده ایستگاه پای پل تا حمیدیه پرداختند. مجموعه معادلات مورد استفاده در این مدل‌سازی، معادلات هیدرولیکی سنت ونانت^۱ و انتقال- پخشیدگی می- باشند. ضریب زبری مانینگ در این پژوهش، ۰/۰۲۸ برآورد گردید. هم‌چنین مشاهده گردید که معادله برآورد دبی رسوب معلق در شرایط تعادلی فان راین^۲ در رودخانه کرخه، از دقت بالایی برخوردار است.

۱۰- بختیاری و همکاران (۱۳۹۰) روش‌های برآورد بار رسوب کل در رودخانه کرخه را ارزیابی کردند. در پژوهش مذکور، بار کل رسوب رودخانه کرخه در ایستگاه حمیدیه به‌کمک روش‌های مختلف

1- Saint Venant

2- Van Rijn

برآورد بار رسوب در رودخانه‌ها، محاسبه و با نتایج حاصل از مشاهدات صحرایی مقایسه گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که با توجه به بستر ریزدانه کرخه، رابطه یانگ برای برآورد رسوب در آن کاربرد ندارد که این نتیجه با نتایج پژوهش قمشی و ترابی پوده (۱۳۸۱) هماهنگ است. هم-چنین ناکارآمدی روش انگلوند- هانسن نیز در برآورد بار رسوب رودخانه کرخه مشاهده شد که با نتایج پژوهش قمشی و ترابی پوده (۱۳۸۱) مغایرت دارد. در نهایت مشاهده شد که روش‌های بگنولد و کلبی^۱ به ترتیب با دقت ۸۵٪ و ۶۸٪، نسبت به روش‌های دیگر از دقت بالاتری در برآورد بار رسوبات معلق رودخانه کرخه برخوردار هستند.

۱۱- سلاجقه و همکاران (۱۳۹۰) به مطالعه تغییرات کاربری اراضی^۲ حوضه کرخه در دوره‌های زمانی ۱۳۶۷-۱۳۸۱ با استفاده از سنجنده‌های TM و ETM پرداختند و سپس تغییرات کاربری اراضی را بر کیفیت آب رودخانه بررسی نمودند. نتایج نشان داد که در دوره مذکور، تغییرات کاربری اراضی به احتمال ۹۵٪ معنی‌دار است. تغییرات کاربری اراضی طی ۱۴ سال مذکور، به سمت کاهش اراضی مرتعی، جنگلی، باغ‌ها و زراعی و افزایش اراضی بایر در سطح حوضه پیش رفته است. بررسی تاثیر این تغییرات، گواه کاهش نسبی کیفیت آب رودخانه طی زمان بوده است. با توجه به آمار موجود در منطقه در سال آبی ۱۳۷۷-۱۳۷۹ خشکسالی^۳ رخ داده است که بر تشدید کاهش کیفیت آب رودخانه تاثیرگذار بوده است، اما تغییر کاربری اراضی، تاثیرات بیشتری بر کاهش کیفی آب رودخانه دارد.

1- Colby

2- Land Use

3- Drought

۱۲- بایزیدی و همکاران (۱۳۹۱) در حوضه آبریز کرخه، به تحلیل زمانی- مکانی خشکسالی هواشناسی پرداختند. در این پژوهش، ابتدا با یک روش مدل سازی، ترکیبی از توابع متعامد تجربی، مدل سازی استوکستیک^۱ و روش میان یابی کریجینگ^۲، مناطق همگن بارش ماهانه تعیین و ماه- های با بارش صفر نیز حذف شدند. نتایج پژوهش نشان داد که متوسط شدت نسبی خشکسالی ۰/۹، متوسط تداوم خشکسالی در منطقه ۲/۸ ماه و تعداد وقایع خشکسالی در سال به طور متوسط ۱/۴۴ واقعه است. همچنین در بیش از ۶۹٪ موارد، مساحت تاثیر خشکسالی ها بین ۸۰-۴۰٪ است که بیان گر منطقه ای بودن این واقعه می باشد.

۱۳- حیدری و همکاران (۱۳۹۱) به ارزیابی روش های هیدرولوژیکی در تعیین آورد رسوب سرشاخه- های رودخانه کرخه پرداختند و نتایج را با نتایج حاصل از هیدروگرافی سال ۱۳۸۴ مقایسه کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نیز موید مطابقت روش فائو با نتایج حاصل از واقعیت است که با نتایج محققان پیشین همخوانی دارد.

۱۴- ناصری و کاشفی پور (۱۳۹۲) با استفاده از مدل FASTER، هیدرودینامیک جریان و پارامترهای کیفی رودخانه کرخه را شبیه سازی کردند. نتایج نشان داد که مقدار ۰/۰۲۸ برای ضریب زبری مانینگ در رودخانه کرخه مقدار مناسبی است که با نتایج پژوهش باغبان پور و کاشفی پور (۱۳۹۰) مطابقت دارد. همچنین می توان از معادله ارتش امریکا جهت تخمین ضریب زبری در بستر کرخه استفاده کرد. نتایج نشان دهنده توانایی مدل FASTER در شبیه سازی و پیش بینی پارامترهای آلودگی در کرخه نیز می باشد.

1- Stochastic
2- Kriging

۲-۵- پیشینه کاربرد روش‌های هوشمند در مهندسی آب

تکنیک‌های هوشمند محاسباتی مانند شبکه عصبی مصنوعی، محاسبات تکاملی^۱، منطق فازی^۲ و الگوریتم‌های ژنتیک طی دو دهه اخیر به شکل موفقی در مسایل مهندسی آب به کار گرفته شده‌اند (نگی^۳ و همکاران، ۲۰۰۲؛ یانگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ زکریا و همکاران، ۲۰۱۰). به عنوان مثال پیشینه مطالعات در زمینه شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی را می‌توان به موارد زیر خلاصه نمود:

۱- رید و مانیا^۴ (۲۰۰۴) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به مدل‌سازی بارش- رواناب^۵ پرداختند. آن‌ها در این پژوهش از اطلاعات روزانه بارش- رواناب مربوط به سال‌های ۱۹۹۰-۱۹۹۶ حوضه آبریز اوریکا^۶ در مراکش استفاده کردند. نتایج اجرای مدل در هر دو مرحله آموزش^۷ و آزمون^۸، موید توانایی روش شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی و مدل‌سازی بارش- رواناب حوضه می- باشد.

۲- باطنی و همکاران (۲۰۰۷) از سیستم استنتاج تطبیقی- عصبی فازی^۹ (انفیس) و شبکه عصبی مصنوعی به دو روش پرسپترون چندلایه^{۱۰} و تابع بنیادی شعاعی^{۱۱} به منظور ارزیابی عمق آبستگی^{۱۲} پای پل بهره گرفتند و نشان دادند که روش‌های پرسپترون چندلایه، سیستم

-
- 1- Evolutionary Computation
 - 2- Fuzzy Logic
 - 3- Nagy
 - 4- Riad & Mania
 - 5 - Rainfall-Runoff
 - 6- Ourika
 - 7- Train
 - 8- Test
 - 9- Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)
 - 10- Multi-Layer Perceptron (MLR)
 - 11- Radial Basis Function (RBF)
 - 12- Scour

استنتاجی تطبیقی- عصبی فازی و تابع بنیادی شعاعی به ترتیب بهترین برآورد را از عمق آبشستگی ارائه می نمایند.

۳- عظمت الله و همکاران (۲۰۰۸) به کمک شبکه عصبی مصنوعی به تخمین عمق آبشستگی پایین- دست سرریز^۱ پرداختند. در این پژوهش، تابع بنیادی شعاعی و انفیس نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش های هوشمند محاسباتی قادر به پیش بینی عمق آبشستگی پایین- دست سرریز می باشند و می توان این روش ها را جایگزین روش های متداول رگرسیونی محاسبه عمق آبشستگی از جمله فرمول ورونز^۲ و ... نمود.

۴- امامقلی زاده (۲۰۱۲) از روش شبکه عصبی مصنوعی برای محاسبه مختصات هندسی مخروط رسوب شویی تحت فشار^۳ استفاده کرد و نشان داد که روش مذکور قابلیت چشم گیری در تعیین ابعاد حفره رسوب شویی دارد.

۵- حدادچی و همکاران (۲۰۱۳) به کمک معادلات انتقال رسوب و روش شبکه عصبی مصنوعی، میزان رسوب انتقالی حوضه چلچای در استان گلستان را برآورد نمودند. آن ها دریافتند روش شبکه عصبی مصنوعی نسبت به روش های متداول تعیین بار رسوبی از جمله بگنولد، ساماگا و ... برتری دارد.

1- Spillway
2- Veronese
3- Flushing

۶- کاکایی لعدانی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان^۱ به پیش‌بینی بار رسوب معلق روزانه رودخانه دویرج در ایلام پرداختند و نشان دادند که هر دو روش در پیش‌بینی بار رسوب معلق توانمند عمل می‌کنند.

۷- کریمی‌دمنه و امامقلی‌زاده (۱۳۹۲) به کمک شبکه عصبی مصنوعی و روش پرسپترون چندلایه، ضریب هوادهی دریچه تخلیه کننده تحتانی مدل‌های آزمایشگاهی پنج سد، ساخته شده در موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو را برآورد کردند. نتایج این پژوهش برتری تابع محرک گوس را بر دیگر توابع نشان داد. همچنین مشخص گردید که روش شبکه عصبی مصنوعی بدون نیاز به معرفی تابع و با سرعت بالا، قابلیت کشف روابط بین داده‌های ورودی و خروجی را داراست و روشی مناسب جهت تخمین ضریب هوادهی دریچه‌های تخلیه کننده تحتانی سدها به‌شمار می‌رود.

۸- امامقلی‌زاده و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه، تابع بنیادی شعاعی و انفیس به بررسی کیفیت آب^۲ رودخانه کارون پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که نتایج هر سه روش در مطابقت با نتایج آزمایشگاهی بررسی کیفیت آب رودخانه بوده است. هم- چنین روش پرسپترون چندلایه، بر دو روش دیگر برتری دارد.

1- Support Vector Machine (SVM)
2- Water Quality

۹- موهارانا^۱ و خاطوا^۲ (۲۰۱۴) از سیستم استنتاج تطبیقی- عصبی فازی، ضریب زبری کانال‌های روباز پیچ و خم‌دار^۳ را پیش‌بینی و نتایج را با نتایج پژوهش محققان پیشین مقایسه کردند. نتایج این پژوهش، توانایی انفیس را در پیش‌بینی ضریب زبری مانینگ این کانال‌ها نشان می‌دهد و موید قابلیت این روش در برقراری یک رابطه غیر خطی بین ضریب زبری و پارامترهای بی بعد موثر بر آن می‌باشد.

۲-۵-۱- پیشینه مطالعات برنامه‌ریزی بیان ژن در مهندسی آب

تعداد مطالعات در زمینه کاربردهای برنامه‌ریزی بیان ژن در مهندسی آب محدود است (گوون^۴ و آیتک، ۲۰۰۹؛ زکریا و همکاران، ۲۰۱۰). در این خصوص می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد:

۱- زکریا و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن، به برآورد بار بستر پرداختند و نتایج را با نتایج دو روش انگلوند هانسن و یانگ مقایسه نمودند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که برنامه‌ریزی بیان ژن، با ضریب همبستگی بالاتر و متوسط خطای مطلق کم-تر، نسبت به دو روش مذکور برتری دارد.

۲- گوون و ارسین تالو^۵ (۲۰۱۰) به منظور برآورد بار رسوب معلق بخش میانی حوضه فرات در ترکیه، از برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده کردند. نتایج حاصل از GEP با نتایج منحنی سنج رسوب مقایسه گردید که بیان‌گر برتری GEP بر روش رگرسیونی است.

1- Moharana
2- Khatua
3- Meandering
4- Guven
5- Ersin Talu

۳- حشمی^۱ و همکاران (۲۰۱۱) برنامه‌ریزی بیان ژن را برای پهنه‌بندی^۲ آماری بارش حوضه کلوزا^۳ در نیوزیلند مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان‌گر آن است که GEP راه حل ساده‌تر و دقیق‌تری را در پهنه‌بندی ارائه می‌نماید.

۴- عظمت الله و همکاران (۲۰۱۱) به کمک برنامه‌ریزی بیان ژن به توسعه منحنی دبی- اشل رودخانه پاهنگ^۴ مالزی پرداختند و نتایج را با روش‌های رگرسیونی، شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌ریزی ژنتیک مقایسه کردند. برنامه‌ریزی بیان ژن با دارا بودن ضریب همبستگی بیشتر و جذر میانگین مربعات خطای^۵ کمتر، بهترین اجرا را در مقایسه با دیگر روش‌ها از خود نشان داد.

۵- کیسی و همکاران (۲۰۱۲) از برنامه‌ریزی ژنتیک و برنامه‌ریزی بیان ژن در تخمین بار رسوب معلق دو ایستگاه هیدرومتری از رودخانه کمبرلند^۶ در ایلات متحده امریکا استفاده و نتایج را با نتایج شبکه عصبی مصنوعی، انفیس و ماشین بردار پشتیبان مقایسه کردند. ضریب همبستگی بالا و متوسط خطای مطلق پایین GEP در مقایسه با دیگر روش‌ها، موید توانایی این روش در تخمین بار رسوب معلق می‌باشد.

1- Hashmi

2- Downscaling

3- Clutha

4- Pahang

5- Root of Mean Squares Error (RMSE)

6- Cumberland

۶- کیسی و شیر (۲۰۱۲) بار رسوب معلق رودخانه ایل^۱ در کالیفرنیا را با استفاده از تغییرات آب و هوا و روش‌های هوشمند عبارت از شبکه عصبی مصنوعی، انفیس و برنامه‌ریزی بیان ژن برآورد کردند. مقایسه نتایج نشان داد که مدل GEP توانایی بیشتری در برآورد بار رسوب معلق دارد.

۷- اقبالی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن، روند توسعه زمانی ابعاد حفره آبشستگی اطراف بال‌شکن بال‌دار^۲ را شبیه‌سازی کردند. تطابق خوب بین داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر محاسبه شده، نشان‌دهنده دقت خوب و بالای این روش در تعیین عمق و ابعاد حفره آب-شستگی می‌باشد.

۸- عظمت الله (۲۰۱۲) از GEP، به منظور پیش‌بینی عمق آبشستگی پایین‌دست آبیانه^۳ها استفاده کرد. در این پژوهش، پارامترهای آماری ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا به عنوان معیار سنجش توانایی و دقت مدل محاسبه گردیدند. نتایج حاصل از پژوهش، توانایی این مدل را در تخمین عمق آبشستگی نشان می‌دهد.

۹- عظمت الله و هاگو^۴ (۲۰۱۲) به کمک برنامه‌ریزی بیان ژن به پیش‌بینی عمق آبشستگی خروجی کالورت^۵ پرداختند. نتایج حاصل با روش رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی مقایسه و مشاهده شد که GEP با ضریب همبستگی بالاتر و خطای کم‌تر، به دو روش دیگر ارجحیت دارد.

1- Eal

2- Wing-wall Abutment

3- Sills

4- Haque

5- Culvert

۱۰- عظمت الله و جرت^۱ (۲۰۱۳) در برآورد ضریب زبری مانینگ در آبراهه‌های پرشیب از برنامه‌ریزی بیان ژن و تابع بنیادی شعاعی استفاده کردند. این پژوهش نشان داد برنامه‌ریزی بیان ژن با ضریب همبستگی بالا بر تابع بنیادی شعاعی و فرمول جرت (۱۹۸۴)، برتری دارد.

۱۱- کیسی و همکاران (۲۰۱۳) بارش رواناب یک حوضه کوچک در ترکیه را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج تطبیقی- عصبی فازی و برنامه‌ریزی بیان ژن مدل‌سازی و نتایج حاصل را با مدل رگرسیون چند خطی^۲ مقایسه کردند. توانایی مدل‌ها در مدل‌سازی بارش رواناب حوضه به کمک پارامترهای آماری ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا، متوسط خطای مطلق و ضریب کارایی^۳ سنجیده شد. نتایج، موید برتری مدل GEP در مدل‌سازی بارش رواناب حوضه مورد نظر می‌باشد.

۱۲- موسی (۲۰۱۳) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌ریزی بیان ژن، به پیش‌بینی عمق آب‌شستگی واقع در پایین‌دست کانال‌های مثلثی پرداخت و نشان داد که GEP، به‌ترتیب بر شبکه عصبی مصنوعی و روش متداول رگرسیونی برتری دارد.

۱۳- روشن‌گر و همکاران (۲۰۱۴) به‌منظور برآورد بار مواد بستر حوضه ارس، از برنامه‌ریزی بیان ژن و سیستم استنتاج تطبیقی- عصبی فازی استفاده کردند. در این پژوهش، نتایج مدل‌های مذکور با نتایج معادلات متداول تعیین بار بستر عبارت از بگنولد، ایکرز وایت^۴، انگلوند هانسن و لارسن^۵ مقایسه گردید. پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین نشان دادند

1- Jarrett

2- Multi Linear Regression (MLR)

3- Coefficient of Efficiency (CE)

4- Ackers and White

5- Laursen

که مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و انفیس به شکل دقیق‌تری بار مواد بستر را برآورد می‌نمایند. هم-
چنین رابطه ارائه شده توسط GEP، موید توانایی و برتری این روش هوشمند در ارائه یک رابطه
صریح و کاربردی ریاضی است که قابلیت تعمیم نتایج را به مسایل مشابه دارا می‌باشد.

بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون پژوهشی به کمک روش برنامه‌ریزی بیان ژن در حوضه آبریز
کرخه انجام نگرفته است و پژوهش حاضر برای نخستین بار از روش مذکور در برآورد بار رسوب معلق
این حوضه استفاده کرده است.

فصل سوم

مواد و روش انجام

پژوهش

۳-۱- مقدمه

بررسی رسوبدهی زیرحوضه‌های یک رودخانه بزرگ و سرشاخه‌های آن، در مسایل زیست محیطی، عملیات حفاظت خاک و آبخیزداری، طراحی و نگهداری سازه‌های آبی و مخازن، مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب و افزایش عمر مفید تجهیزات الکتریکی و برقایی اهمیت به‌سزایی دارد. از جمله روش‌های مرسوم در تعیین بار رسوبات، روش‌های متداول رگرسیونی است. طی سال‌های اخیر، محققان از روش‌های هوشمند در پیش‌بینی بار رسوب معلق رودخانه‌ها استفاده کرده‌اند که در مقایسه با روش‌های مرسوم رگرسیونی از دقت بالاتری برخوردار است.

در این فصل ابتدا شرح مختصری از مفاهیم زیست شناسی ارائه می‌گردد، سپس روش برنامه‌ریزی بیان ژن و پارامترهای مورد استفاده در استخراج مدل ارائه شده و در ادامه حوضه آبریز و سد مخزنی کرخه معرفی خواهد شد.

۳-۲- آشنایی با مفاهیم زیست شناختی طبیعی

موجودات زنده از مجموعه‌ای سلول تشکیل می‌شوند، هر سلول نیز حاوی مجموعه‌ای مشابه شامل یک یا چند کروموزوم است. کروموزوم‌ها از رشته‌هایی به نام DNA تشکیل شده‌اند که حامل نقشه کد تشکیل موجود زنده است. هر کروموزوم به‌طور مفهومی از ژن‌هایی^۱ که هریک کد تشکیل پروتئین به‌خصوصی را حمل می‌کنند تشکیل شده‌است. هر ژن نماینده ویژگی به‌خصوصی از موجود زنده مانند رنگ چشم است. صورت‌های مختلف این ویژگی مانند آبی، سبز و یا قهوه‌ای اصطلاحاً آلل^۲ نامیده می‌شود. موجودات زنده کروموزوم‌های متعددی در هر سلول دارند و جایگاه هر ژن در کروموزوم معین است. مجموعه کروموزوم‌ها

1- Genes

2- Allele

یا مواد ژنتیکی را ژنوم می‌نامند. به مجموعه معینی از ژن‌های یک ژنوم، عبارت ژنوتیپ^۱ اطلاق می‌گردد. هر دو موجودی که ژنوم‌های مشابه داشته باشند، ژنوتیپ مشابه دارند. ژنوتیپ‌ها پس از رشد موجود زنده، مشخصات فیزیکی و ذهنی مانند رنگ پوست، رنگ چشم، قد و میزان هوش را ایجاد می‌نمایند که اصطلاحاً فنوتیپ^۲ نامیده می‌شوند (البرزی، ۱۳۸۸).

۳-۳- الگوریتم‌های تکاملی^۳

الگوریتم‌های تکاملی مجموعه‌ای از روش‌های ابتکاری هستند که با اشکال متنوع و پیچیدگی‌های مختلف، تحت نام کلی محاسبات تکاملی^۴ مورد استفاده قرار می‌گیرند. برتری این روش‌ها، انعطاف‌پذیری در بهینه‌سازی توابع مختلف است (خلج، ۱۳۹۰). الگوریتم‌های ژنتیک یکی از انواع الگوریتم‌های تکاملی هستند که از علم زیست‌شناسی مانند وراثت^۵، جهش^۶، انتخاب ناگهانی، انتخاب طبیعی و ترکیب^۷ الهام گرفته‌اند (مطیع قادر و همکاران، ۱۳۸۹). این الگوریتم‌ها از لحاظ ساختاری به سه دسته الگوریتم ژنتیک (GA)، برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) تقسیم بندی می‌شوند که تفاوت‌های اساسی آن‌ها به صورت زیر برشمرده می‌شوند (فریرا، ۲۰۰۱):

۱- الگوریتم ژنتیک (GA) با افرادی شامل کروموزوم‌های با طول ثابت و بدون بیان پیچیده است. در این سیستم، کروموزوم‌ها طبق برتری فردی و براساس شایستگی حفظ می‌شوند.

1- Genotype
2- Phenotype
3 - Evolutionary algorithms
4 - Evolution computations
5 - Inheritance
6 - Mutation
7- Crossover

۲- برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) با افرادی با ساختار شاخه‌ای^۱ با اندازه‌ها و اشکال متفاوت است که در مقایسه با GA، عوامل بیشتری را در نظر می‌گیرند.

۳- برنامه‌ریزی ژنتیک (GEP) با افرادی کدگذاری شده به شکل کروموزوم‌های خطی با طول ثابت است که به شکل ساختار شاخه‌ای و با اندازه و اشکال متفاوت بیان می‌گردند. در این سیستم‌ها، کروموزوم‌ها به وسیله برتری عوامل سببی روی فنوتیپ (ساختار شاخه‌ای) حفظ می‌شوند.

۳-۳-۱- الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک در سال ۱۹۶۰ توسط جان هلند^۲ ابداع شد. الگوریتم‌های ژنتیک بر نظریه تکامل داروین^۳ استوار می‌باشند و از این نظریه در سیستم‌های کامپیوتری استفاده می‌کنند. در این روش راه حل‌های مسئله در رشته‌هایی با طول ثابت و به صورت ۰ و ۱ کدگذاری می‌شوند که کروموزوم نام دارند، فرآیند حل مسئله با مجموعه‌ای از این کروموزوم‌ها آغاز می‌گردد که جمعیت اولیه^۴ نامیده می‌شوند، و جواب‌های حاصل برای تولید جمعیت بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. انتخاب جواب‌ها از بین کل جواب‌ها (والدین^۵) به منظور ایجاد جواب‌های جدید (فرزندان^۶) براساس شایستگی یا میزان برازش^۷ در دامنه مسئله صورت می‌پذیرد. طبیعی است جواب‌های سازگارتر، شانس بیشتری برای ابقا و انتخاب مجدد دارند. این فرآیند در نهایت به تکامل جمعیتی از اعضا ختم می‌گردد که نسبت به اعضای اولیه جمعیت (والدین)، با محیط سازگاری بیشتری دارند (البرزی، ۱۳۸۸؛ مطیع قادر و همکاران، ۱۳۸۹؛ خلیج، ۱۳۹۰).

1- Ramified structures
2- John Holland
3- Darwin
4 - Population
5 - Parents
6- Offspring
7- Fitness

۳-۱-۱- عملگرهای الگوریتم ژنتیک

۳-۱-۱-۱- عملگر انتخاب و تولید مثل

در مرحله انتخاب، ابتدا به کمک تابع برازش^۱، به هر عضو جمعیت، ارزشی نمایانگر میزان سازگاری آن تعلق می‌گیرد. تابع برازش میزان برازندگی و عملکرد هر عضو جمعیت را در حل مسئله ارزیابی می‌کند. در جهان طبیعی، این تابع نشان‌دهنده قدرت و توانایی موجودات برای زنده ماندن در محیط اطراف خودشان است.

پس از ارزش‌گذاری، اعضای سازگارتر، شانس بیشتری برای انتخاب خواهند داشت. هنگامی که میزان سازگاری هر عضو تعیین شود، اعضا را می‌توان با احتمالی متناسب با میزان سازگاری نسبی^۲ آن‌ها برای تولید نسل بعدی انتخاب کرد.

۳-۱-۱-۲- عملگر تقاطع (ترکیب)

این عملگر امکان ترکیب ویژگی‌های دو کروموزوم را برای تولید نسل جدید فراهم می‌کند. در این مرحله به اندازه نرخ ترکیب، دو کروموزوم انتخاب شده و با یکدیگر ترکیب می‌شوند. ترکیب انواع مختلف دارد که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود:

۳-۱-۱-۳- ترکیب تک نقطه‌ای^۳

رایج‌ترین نوع ترکیب، ترکیب تک نقطه‌ای است. در این روش همان‌طور که در شکل (۳-۱) نشان داده شده است، کروموزوم‌های والدین در یک نقطه تصادفی به دو قسمت تقسیم شده و هر فرزند با انتخاب قسمت اول از کروموزوم یک والد و قسمت دوم از کروموزوم والد بعدی ساخته می‌شود.

1- Fitness Function

2- Relative fitness

3- Single Crossover



شکل (۱-۳) - ترکیب تک نقطه‌ای

۳-۳-۱-۱-۲ ترکیب دونقطه‌ای^۱

به کمک این عملگر می‌توان زن‌هایی که خصوصیات مناسب دارند را حفظ نمود. در این روش، پس از انتخاب والدین و انتخاب دو نقطه تصادفی بر روی رشته‌های کروموزوم، محتویات بین دو نقطه تبادل می‌گردد (شکل ۲-۳).



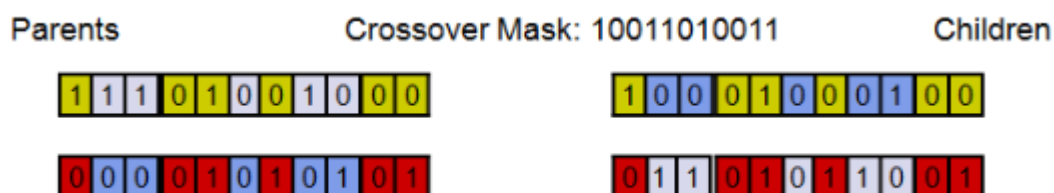
شکل (۲-۳) - ترکیب دونقطه‌ای

۳-۳-۱-۱-۳ ترکیب یکنواخت^۲

در ترکیب یک و دونقطه‌ای، انتقال خصوصیات به صورت جابه‌جایی قسمتی از رشته کروموزوم مورد نظر انجام می‌گیرد. اما در شرایطی که زن‌ها با خصوصیات مناسب در طول کروموزوم پراکنده باشند، این ترکیب مفیدتر از دو روش قبل عمل می‌کند و خصوصیات مناسب بعضی از زن‌ها را که در طول رشته

1- Two point Crossover
2- Uniform Crossover

کروموزوم پراکنده شده‌اند را منتقل می‌نماید. در ترکیب یکنواخت، به‌منظور تولید فرزندان، بعضی از بیت-ها در رشته والدین به‌طور تصادفی جابه‌جا می‌گردند (شکل ۳-۳).



شکل (۳-۳) - ترکیب یکنواخت

۳-۱-۱-۳-۳ - عملگر جهش

پس از انجام عملیات ترکیب بر روی کروموزوم‌ها، نوبت به عملگر جهش می‌رسد. این عملگر، به جمعیت اولیه ویژگی‌هایی می‌دهد که ممکن است در جمعیت اولیه وجود نداشته باشد. هم‌چنین مانع از همگرایی سریع الگوریتم ژنتیک خواهد شد. عملگر جهش در کروموزوم‌هایی که به‌صورت صفر و یک کدگذاری شده‌اند، بیت‌های تشکیل دهنده کروموزوم را به‌صورت تصادفی و با احتمال ناچیزی مثلاً ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۱ تغییر می‌دهد (شکل ۴-۳). افزایش نرخ جهش، به الگوریتم آزادی بیشتری برای جستجو در فضای مسئله می‌دهد. عملگر جهش بر روی کروموزوم‌های نسل آخر اعمال نمی‌شود.

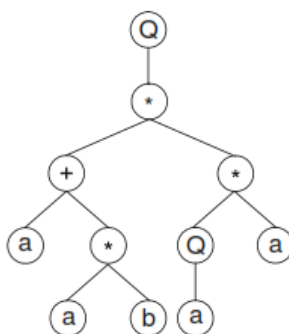


شکل (۴-۳) - جهش تک نقطه‌ای کروموزوم‌های صفر و یک

۳-۲-۲- برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)

برنامه‌ریزی ژنتیک ابتدا در سال ۱۹۸۵ توسط کرامر^۱ ابداع شد و پس از آن در سال ۱۹۹۲ توسط کوزا^۲ توسعه پیدا کرد. این روش با ایجاد ساختارهای غیرخطی (درخت تجزیه)، با اندازه‌ها و اشکال متفاوت، قادر به ایجاد راه حل‌های تناوبی برای مسایل با طول ثابت می‌باشد. به‌منظور آشنایی با درخت تجزیه، در شکل (۳-۵) ساختار درختی رابطه (۳-۱) نشان داده شده‌است (Q ریشه دوم است).

$$\sqrt{(a+(a \times b)) \times (\sqrt{a} \times a)} \quad (۳-۱)$$



شکل (۳-۵)- بیان درختی رابطه (۳-۱) (فریرا، ۲۰۰۱)

الفبای مورد استفاده در GP، متفاوت‌تر از ۰ و ۱ در الگوریتم ژنتیک است و سیستم انطباق‌پذیرتری را ایجاد می‌نماید. ساختارهای غیرخطی در GP مانند کروموزوم‌های GA دارای نقش دوگانه ژنوتیپ- فنوتیپ هستند. در GP عملگرهای ژنتیکی مستقیماً بر روی درختان تجزیه عمل می‌کنند، این موضوع در نگاه اول مفید قلمداد می‌گردد اما در حقیقت این امر بسیار محدودکننده است و تنها در دامنه محدودی از بهسازی‌ها امکان‌پذیر خواهد بود (فریرا، ۲۰۰۱).

1- Cramer
2- Koza

عملگرهای ژنتیکی در GP شامل سه عملگر ترکیب، جهش و جایگشت^۱ می‌باشد که در ادامه به‌طور مختصر معرفی خواهند شد:

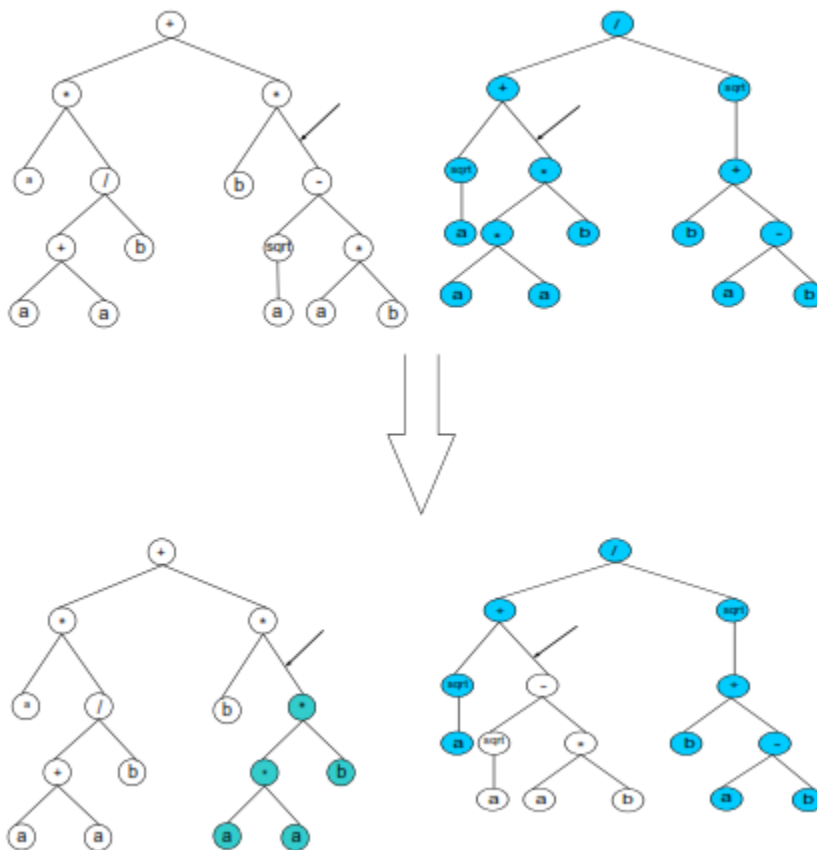
۳-۲-۱- عملگر ترکیب

این عملگر رسیدن به جواب بهینه عمومی را با ترکیب کردن مقادیر متغیر فرزندان تامین می‌کند (شکل (۳-۶)). در بیشتر موارد تنها از این عملگر در GP استفاده می‌شود، در این مورد برای ایجاد فرزندان، شاخه‌هایی به‌طور تصادفی بر روی دو درخت والد انتخاب شده و سپس به‌طور تصادفی معاوضه می‌شوند. هدف از اعمال این عملگر، استنتاج راه حل‌های پیچیده‌تری است که از نظر قواعد ساختار صحیحی داشته باشند (فریرا، ۲۰۰۱).

در حقیقت، ترکیب به معنای باز ترکیب اطلاعات مابین کروموزوم‌ها می‌باشد. این عملگر، خصایص والدین را برای ساختن فرزندان ترکیب می‌کند تا کروموزوم‌های بهتری ایجاد شوند. به‌طور معمول این عملگر روی یک جفت از کروموزوم‌ها عمل می‌کند و دو فرزند برای هر جفت تولید می‌شود. عملگر ترکیب می‌تواند روی چندین والد نیز عمل کند که در این صورت خصیصه‌های بیش از دو والد را برای تولید فرزندان، ترکیب می‌نماید. علاوه بر این، عملگر ترکیب می‌تواند بیش از دو فرزند را برای هر گروه از والدین تولید کند.

وظیفه اصلی این عملگر بهبود برازندگی جمعیت می‌باشد و به‌منظور حفظ تنوع و گوناگونی جمعیت، مانع از به ارث بردن تنها ژن‌های خوب خواهد شد (مطیع‌قادر و همکاران، ۱۳۸۹).

1- Permutation

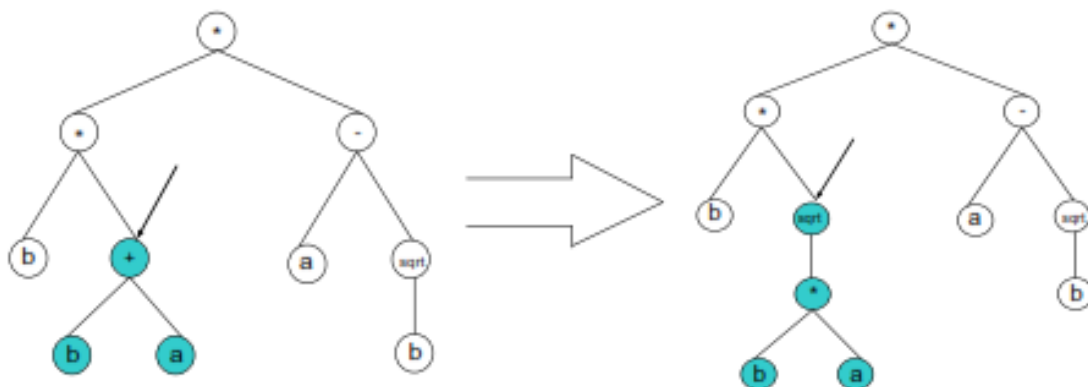


شکل (۳-۶) - ترکیب خطی در برنامه‌ریزی ژنتیک (پیکان‌ها نشانه نقاط ترکیب هستند)

۳-۲-۲- عملگر جهش

عملگر جهش یک گره^۱ در درخت تجزیه انتخاب کرده و شاخه زیرین آن را با یک شاخه جدید تولیدشده به صورت تصادفی جابه‌جا می‌نماید (شکل (۳-۷)). در این حالت شکل درخت تجزیه دستخوش تغییرات زیادی نخواهد شد. این عملگر دستیابی برنامه‌ریزی ژنتیک را به جواب‌های بهینه تضمین می‌نماید (فریرا، ۲۰۰۱).

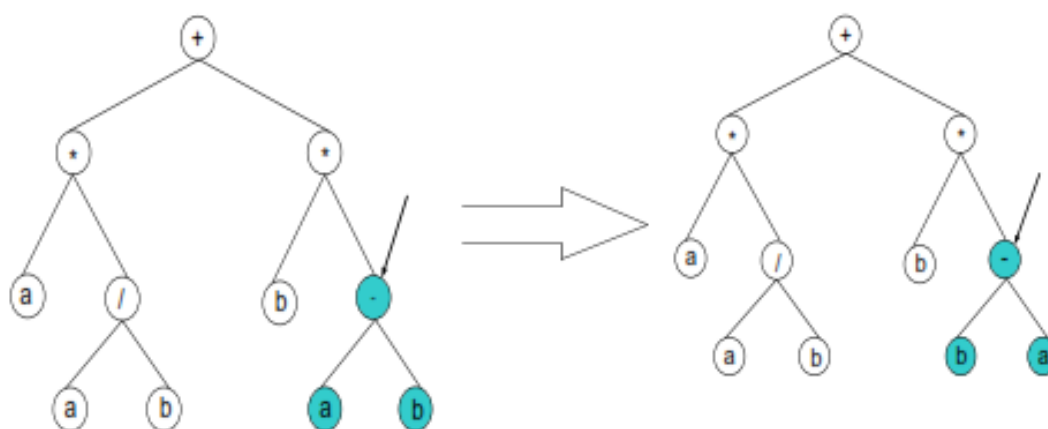
1- Node



شکل (۷-۳) - جهش درختی در برنامه‌ریزی ژنتیک (پیکان محل جهش را نشان می‌دهد)

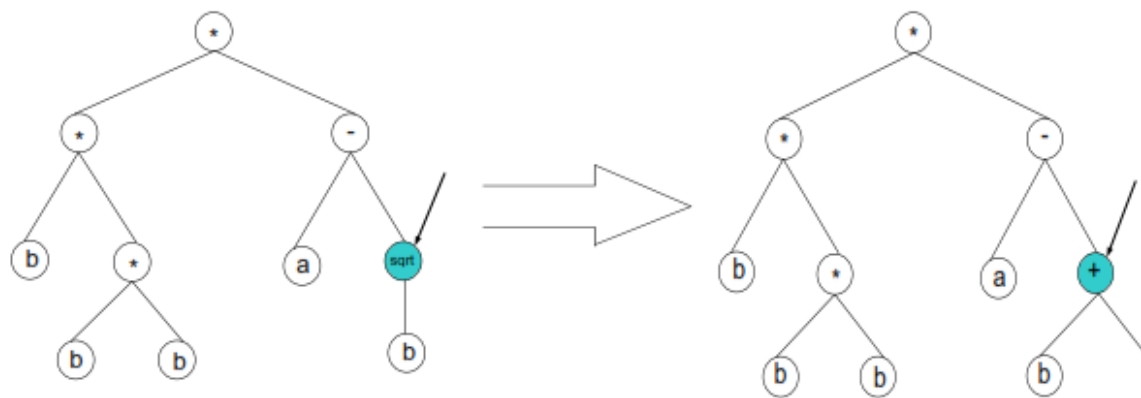
۳-۲-۳-۳ - عملگر جایگشت

این عملگر محافظه‌کارترین عملگر در برنامه‌ریزی ژنتیک است، روش اعمال آن به این صورت است که در ابتدا متغیرهایی به‌طور تصادفی روی درخت تجزیه انتخاب شده و به‌شکل اتفاقی با هم معاوضه می‌شوند (شکل (۸-۳)). در این حالت شکل کلی درخت تجزیه بدون تغییر باقی می‌ماند (فریرا، ۲۰۰۱).



شکل (۸-۳) - متغیر جایگشت در برنامه‌ریزی ژنتیک (پیکان نقطه جایگشت را نشان می‌دهد)

در روش برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده از عملگرهای جهش، ترانهش^۱ و یا وارون‌سازی^۲ با تکرار زیاد، موجب ایجاد ساختارهای نامعتبر و نادرست خواهد گردید و فضای مسئله را به‌طور کشف نشده باقی می‌گذارد (فریرا، ۲۰۰۶). در شکل (۹-۳) نمونه‌ای از جهش نقطه‌ای در GP نشان داده شده است که درخت ایجاد شده ساختار صحیحی ندارد.



شکل (۹-۳) - یک واقعه فرضی از جهش نقطه‌ای در برنامه‌ریزی ژنتیک و ساختار نامعتبر درخت ایجاد شده

اگرچه کوزا عملگرهای ترکیب، جهش و جایگشت را به‌عنوان عملگرهای اصلی GP معرفی کرده است، اما در عمل، عملگر ترکیب بیشترین نقش را داراست و استفاده از این عملگر، مانع از ورود مواد ژنتیکی جدید به منبع ژنتیکی GP خواهد شد (فریرا، ۲۰۰۱).

از جمله مزیت‌های برنامه‌ریزی ژنتیک در مقایسه با سیستم‌های عصبی آن است که در برنامه‌ریزی ژنتیک ابتدا ساختار بلوک‌ها (متغیرهای ورودی، هدف و مجموعه توابع) تعریف شده و سپس ساختار بهینه مدل و ضرایب طی فرایند آموزش تعیین می‌شوند، همچنین GP به‌طور خودکار قادر به گزینش

1- Transposition
2- Inversion

متغیرهای ورودی با بیشترین تاثیر در مدل می‌باشد. از آنجایی که در برنامه‌ریزی ژنتیک، درختان تجزیه هم نقش ژنوتیپی دارند و هم به‌عنوان فنوتیپ عمل می‌کنند، از مقایسه GA و GP می‌توان نتیجه گرفت که هر دو روش توانایی بیان ساده ندارند و در همه موارد از کل درخت تجزیه به‌عنوان راه حل استفاده می‌شود (فریرا، ۲۰۰۱).

۳-۳-۳- برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

روش برنامه‌ریزی بیان ژن، ترکیب و توسعه یافته روش‌های GA و GP است که در سال ۱۹۹۹ توسط فریرا ابداع شد. در این روش، کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، مشابه با الگوریتم ژنتیک و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه و اشکال متفاوت، مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک ترکیب می‌شوند. به‌طور خلاصه می‌توان بیان داشت که در این روش فنوتیپ و ژنوتیپ از هم جدا شده و سیستم قادر خواهد بود از تمام مزایای تکاملی بهره گیرد. با وجود این که فنوتیپ در GEP مشابه ساختار شاخه‌ای GP می‌باشد، اما ساختار شاخه‌ای در GEP که بیان درختی نیز نامیده می‌شود، بیان گر تمام ژنوم‌های مستقل است.

در مجموع، به‌طور خلاصه می‌توان بیان داشت که در GEP بهسازی‌ها در یک ساختار خطی اتفاق می‌افتد و سپس به‌صورت ساختار درختی بیان می‌شود، این امر سبب خواهد شد که تنها ژنوم اصلاح‌شده به نسل بعد انتقال یابد و نیازی به ساختارهای سنگین تکثیر و جهش نباشد (فریرا، ۲۰۰۴).

۳-۳-۳-۱- الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن

اولین مرحله در GEP، تشکیل جمعیت اولیه از راه حل‌هاست. سپس کروموزوم‌ها به بیان درختی (ETs) نشان داده می‌شوند. در مرحله بعد باید کارایی یا میزان سازگاری هر عضو از جمعیت کروموزوم‌ها توسط تابع برازش ارزیابی شود. اگرچه در حل مسایل به‌روشن GEP نیازی به دانستن دقیق ساختار ریاضی

مسایل نیست، اما باید به روشی میزان مطلوبیت جواب‌های بالقوه مسئله (کروموزوم‌ها) و میزان سازگاری آن‌ها را تعیین کنیم و با حذف جواب‌های ضعیف‌تر و حفظ جواب‌های سازگارتر، به پاسخ بهینه مسئله نزدیک شویم. در پدیده تکامل و در نظام انتخاب طبیعی این نقش برعهده طبیعت است که پاسخ‌های سازگارتر را بر دیگر جواب‌ها ترجیح می‌دهد. در سیستم GEP معیارهای توقف یک و یا ترکیب دلایل زیر می‌باشد:

✓ معیار دستیابی به هدف: عدم مشاهده تفاوت محسوس بین پاسخ‌های بهینه طی چند نسل، می‌تواند معیاری برای دستیابی به پاسخ بهینه باشد.

✓ معیار تکرار: اگر پس از تعداد نسل معین، به پاسخ بهینه دست یابیم، فرایند تولید نسل متوقف خواهد شد.

✓ معیار زمان: اگر پس از طی زمانی معین، در بهترین جواب حاصل از تولید نسل بهبودی حاصل نگردد، محاسبات متوقف خواهد شد.

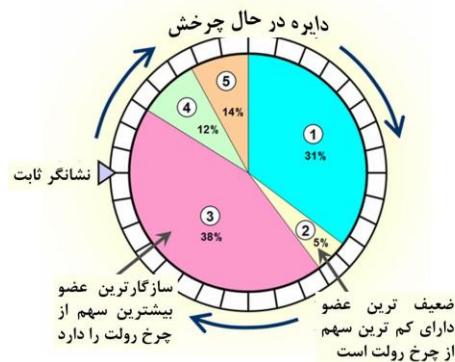
به‌طور کلی مراحل اصلی الگوریتم‌های تکاملی ذکرشده را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

فرایند با تولید تصادفی کروموزوم‌ها از جمعیت اولیه آغاز می‌شود. سپس کروموزوم‌های ایجادشده در GP و GEP به‌صورت درختی بیان می‌گردند. در ادامه به‌کمک تابع هدف میزان برازندگی و کارایی هر فرد ارزیابی می‌شود، پس از آن اعضای سازگارتر انتخاب و اصلاح شده تا فرزندان جدیدتر ایجاد شوند، فرزندان ایجادشده نیز تحت فرایند توسعه‌ای قرار می‌گیرند تا پاسخ خوب و مناسب پیدا شود (فریرا، ۲۰۰۴).

لازم به‌ذکر است که منظور از تولید مثل، تکثیر^۱ و اصلاحات ژنتیکی است. منظور از تکثیر، حفظ چندین فرد مناسب از نسل حاضر برای نسل بعد است. واضح است که تکثیر به‌تنهایی نمی‌تواند نشانگر

تغییرات باشد و تغییرات ژنتیکی به واسطه عملگرهایی از قبیل جهش، وارون سازی، ترانهش^۱ IS، ترانهش ریشه^۲ RIS، ترانهش ژنی، ترکیب تک نقطه‌ای، ترکیب دونقطه‌ای و ترکیب ژنی^۳ انجام می‌شود (فریرا، ۲۰۰۱).

در GEP از روش چرخ رولت^۴ برای انتخاب اعضا استفاده می‌شود. در این روش، اعضا براساس میزان سازگاری نسبی گزینش می‌گردند، برای این منظور ابتدا میزان سازگاری خام تمام اعضا را جمع کرده، سپس عدد حقیقی به دست آمده (sum) را به نسبت احتمال مورد انتظار انتخاب (میزان سازگاری‌های نسبی) اعضا تقسیم‌بندی می‌کنیم. با این شرایط هر عضو در یکی از این تقسیمات منظور می‌شود. برای این منظور از دایره‌ای که در شکل (۳-۱۰) آمده است استفاده می‌کنیم. محیط دایره به اندازه sum و اندازه هر تکه به اندازه سازگاری نسبی یا خام عضو مربوط است. اگر این دایره را مانند فرفره به چرخش درآوریم، احتمال قرارگیری نشانه ثابت در کنار هر یک از مقاطع به اندازه آن مقطع یا سازگاری نسبی آن ارتباط خواهد داشت (البرزی، ۱۳۸۸). مثلاً در شکل (۳-۱۰) عضو شماره ۳ بیشترین احتمال انتخاب و عضو شماره ۲ کم‌ترین احتمال گزینش را خواهد داشت.



شکل (۳-۱۰) - چرخ گردان

-
- 1- Insrtion- Sequence
 - 2- Root- Insertion- Sequence
 - 3- Gene Recombination
 - 4- Roulette wheel

در GEP برخلاف GA و GP چندین عملگر ژنتیکی به منظور اصلاح نسل مورد استفاده قرار می گیرند که در ادامه معرفی خواهند شد (لوپز و وینرت^۱، ۲۰۰۴).

۳-۳-۲- ساختار برنامه ریزی بیان ژن

برنامه ریزی بیان ژن، با خلق کروموزوم ها و بیان درختی، دارای بینشی گسترده در ایجاد راه حل های جدید برای محاسبات تکاملی است. لذا به منظور کدگذاری اطلاعات و بیان کروموزوم ها، یک زبان جدید موسوم به کاروا^۲ توسط فریرا خلق شد. همچنین، ساختار کروموزوم ها به گونه ای طراحی شده است که شرایط ایجاد چندین ژن که هریک برای بیان درختی یا برنامه کوچک تر کدگذاری می شود را فراهم کند (فریرا، ۲۰۰۱).

سیستم سلولی GEP به شکل خودکار و بسیار ظریف، مجموعه توابع تعریف شده را به کار می گیرد (فریرا، ۲۰۰۶). ساختار ساده و در عین حال قابل تغییر و تحول ژن های GEP، علاوه بر متصور ساختن کدگذاری برنامه ها، شرایط تکامل را نیز فراهم می سازند. همچنین با ساختاری تطبیق پذیر و به کارگیری مجموعه ای قدرتمند از عملگرهای ژنتیکی، به گونه ای مناسب فضای راه حل را جستجو می نمایند. درست مشابه با آنچه در طبیعت دیده می شود، عملگرهای GEP نیز ساختارهای صحیح و مناسب را جستجو می کنند و به طور قابل ملاحظه ای منطبق بر تنوع ژنتیکی هستند (فریرا، ۲۰۰۴).

در ساختار فنوتیپ GEP نیز مانند GP، درختان توابع و ترمینال وجود دارد، با این تفاوت که در GP فرایند ترجمه^۳ (کدگذاری ژن ها) وجود ندارد و فنوتیپ و ژنوتیپ دارای یک ساختار هستند، اما در GEP، فنوتیپ از ترجمه یک کروموزوم خطی به دست می آید. به عبارت دیگر، در GEP ژنوم ها کروموزوم های خطی هستند و فنوتیپ ها، بیان درختی (ET) می باشند که به صورت مجزا وجود دارند.

1- Lopes & Weinert

2- Karva

3- Translation

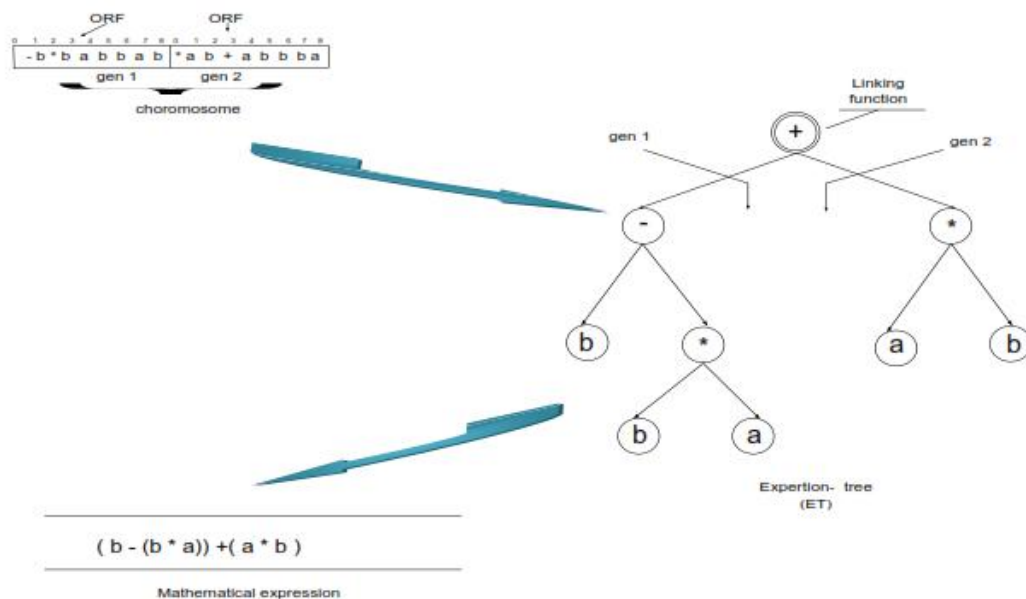
بیان درختی، تحت فرایند ترجمه از کروموزومها استنتاج می‌شود. در واقع کروموزومها تحت انتخاب و عملگرهای ژنتیکی قرار می‌گیرند و میزان سازگاری آنها با بیان درختی نمایش داده می‌شود (ویلسون^۱، ۲۰۰۸).

۳-۳-۳-۳ ساختار افراد در GEP

۳-۳-۳-۳-۱ ORF و بیان درختی ژنها

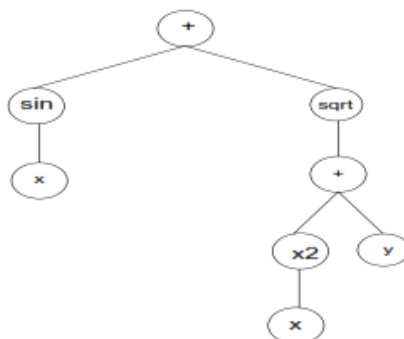
در GEP، ژنها به شکل درختی بیان و کدگذاری می‌شوند. در مورد کروموزومهای چند ژنی، تمامی بیان درختی‌ها به وسیله تابع پیوند^۲، از محل گره ریشه^۳ خود به یکدیگر متصل می‌شوند. هر ژن، یک ناحیه کدگذاری به نام ORF^۴ (چارچوب تفسیر باز) یا بیان K° دارد که پس از کدبرداری و رمزگشایی به صورت ساختار درختی (ET) بیان می‌شود و نمایش‌دهنده یک راه حل برای مسئله است. شکل (۳-۱۱) نشان می‌دهد که چگونه یک کروموزوم با دو ژن به صورت یک رشته خطی کدگذاری شده و سپس به صورت ET بیان شده است. دو ژن نشان داده شده در شکل، مشابه با توالی‌های ژنهای بیولوژی، نواحی کدگذاری شده و نشده دارند (لوپز و وینرت، ۲۰۰۴).

1- Wilson
2- Linking Function
3- Root Node
4- Open Reading Frame
5- K- Expression



شکل (۱۱-۳) - کدگذاری به شکل رشته خطی و کدگذاری به صورت ET یک کروموزوم با دو ژن در GEP

مثال‌های زیر برای درک بهتر از نحوه کدگذاری ORF و کدگذاری به شکل ET ارائه شده است. به-
عنوان مثال رابطه ریاضی $F(x) = \sin(x) + \sqrt{x^2 + y}$ را در نظر بگیرید، دیاگرام و بیان درختی آن
به صورت شکل (۱۲-۳) نشان داده شده است.



شکل (۱۲-۳) - بیان درختی رابطه $F(x) = \sin(x) + \sqrt{x^2 + y}$

این دیاگرام فنوتیپ افراد را در GEP نمایش می‌دهد. ژنوتیپ افراد نیز با تفسیر فنوتیپ و خواندن ET از چپ به راست و بالا به پایین به صورت عبارت (۲-۳) به دست خواهد آمد.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 (۲-۳)

+Sin sqrt x + ^ y x 2

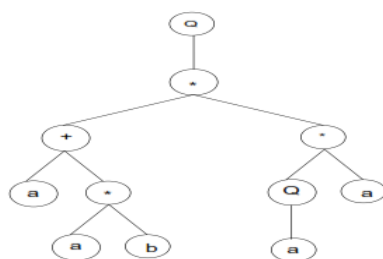
بیان (۲-۳) یک ORF است که در + (موقعیت ۰) شروع شده و در ۲ (موقعیت ۸) خاتمه می‌یابد. فرایند معکوس، یعنی ترجمه بیان K به صورت بیان درختی (ET) هم به سادگی صورت می‌پذیرد.

بیان ORF زیر را در نظر بگیرید.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 (۳-۳)

Q * + * a * Q a a b a

نقطه شروع ORF متناظر با گره ریشه از ET است که در مثال فوق، + می‌باشد. در ادامه، توابع به صورت شاخه‌های افزایشی به آن متصل می‌گردند، تا جایی که شناسه توابع وجود داشته باشد. عمل اضافه شدن زمانی خاتمه می‌یابد که خط انتهایی که فقط شامل ترمینال‌ها (متغیرها یا مقادیر مورد استفاده در یک مسئله) است، تشکیل گردد. بیان ET رابطه فوق به شکل زیر می‌باشد (فریرا، ۲۰۰۱).



شکل (۱۳-۳) - بیان درختی رابطه (۳-۳)

در GEP کروموزومها طول ثابت دارند و از یک یا چند ژن با طول مساوی تشکیل شده‌اند، لذا تنها طول ORFs در GEP تغییر می‌کند و طول ژن‌ها ثابت باقی می‌ماند. با این‌که در GEP محل شروع همیشه اولین نقطه از یک ژن است، اما نقطه انتهایی همیشه منطبق بر آخرین محل یک ژن نیست. معمولاً برای ژن‌های GEP، نواحی کدگذاری نشده در قسمت بعد از نقطه انتهایی وجود دارد. نواحی کدگذاری نشده، ماهیت GEP و قدرت استنتاج آن هستند، چون اجازه اصلاحات و بهسازی‌های ژنوم را بدون محدودیت و با استفاده از هر عملگر ژنتیکی می‌دهند و همیشه از نظر قواعد برنامه‌های صحیحی را بدون نیاز به قواعد ویرایشی پیچیده یا روش‌های تحمیلی در جهت اجرای عملگرهای ژنتیکی، تولید می‌نمایند. این بزرگ‌ترین تفاوت بین GEP و GP بدون ژنوم‌های خطی است (فریرا، ۲۰۰۱).

۳-۳-۲- ساختار ژن‌ها در برنامه‌ریزی بیان ژن

یک کروموزوم از یک یا چند ژن تشکیل شده است و هر ژن به یک سر^۱ و یک دنباله^۲ تقسیم می‌شود. اندازه سر (h)، به وسیله کاربر تعیین می‌شود اما اندازه دنباله (t)، به صورت تابعی از h و پارامتر n، به دست می‌آید. پارامتر n، بیشترین تعداد پارامتر مستقل یافت‌شده در مجموعه توابع مورد استفاده است. رابطه (۳-۴) طول دنباله را با توجه به پارامترهای دیگر تعیین می‌کند (لوپز و وینرت، ۲۰۰۴).

$$t = h(n-1) + 1 \quad (4-3)$$

مسایل رگرسیونی با استفاده از مجموعه‌ای از توابع و ترمینال‌ها مدلسازی می‌شوند. مجموعه توابع معمولاً شامل توابع اصلی حسابی $\{+, -, \times, \div\}$ ، توابع مثلثاتی یا هر نوع تابع ریاضی دیگر مانند $\{\cos, \sin, \exp, \log, x^2\}$ و یا توابع تعریف‌شده توسط کاربر است. توابع و ترمینال‌ها در بخش سر ژن وجود دارند، و دنباله تنها شامل ترمینال‌هاست (لوپز و وینرت، ۲۰۰۴).

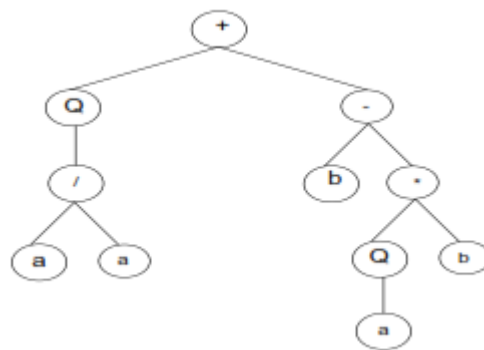
1- Head
2- Tail

به عنوان مثال ژنی را به صورت $\{Q, \times, \div, +, -, a, b\}$ در نظر بگیرید. در این مورد تعداد متغیرهای مستقل (n) با ۲ برابر است. برای مقادیر طول سر برابر با ۱۰ و طول دنباله برابر با ۱۱، طول ژن برابر با ۲۱ خواهد بود. این ژن در عبارت (۵-۳) نشان داده شده است که در آن، قسمت ابتدایی سر و قسمت انتهایی دنباله است و رنگها تفکیک شده اند (فریرا، ۲۰۰۱).

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 9 0 (۵-۳)

+ Q - / b * a a Q b **a a b a a b b a aab**

و پس از کدبرداری، بیان درختی آن مطابق شکل (۱۴-۳) خواهد بود:



شکل (۱۴-۳)- بیان درختی رابطه (۵-۳)

در این مورد، ORF در موقعیت ۱۰ خاتمه می یابد، اما ژن در موقعیت ۲۰ خاتمه می یابد که موقعیت کدگذاری نشده را نشان می دهد.

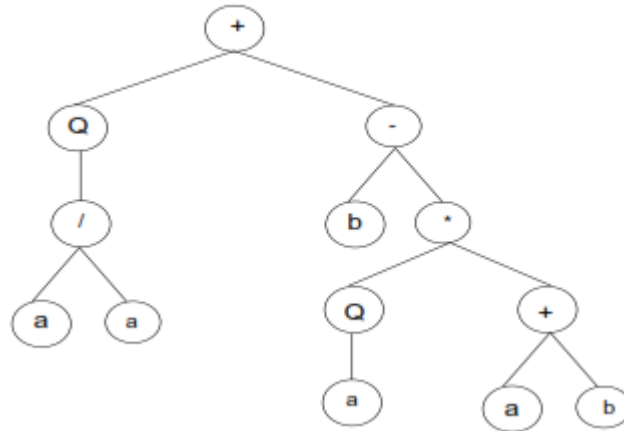
حال در موقعیت ۹ یک جهش را در نظر بگیرید که سبب تغییر "b" به "+" شده است. پس ژن به- صورت عبارت (۶-۳) نوشته خواهد شد (فریرا، ۲۰۰۱).

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

(۶-۳)

+ Q -/ b * a a Q + **a a b a a b b a aab**

شکل (۱۵-۳) بیان درختی رابطه حاصل را نشان می‌دهد.



شکل (۱۵-۳) - بیان درختی رابطه (۶-۳)

بر اثر جهش حاصل، موقعیت انتهایی ORF، دو موقعیت به سمت راست جابه‌جا شده است (موقعیت ۱۲).

حال اگر در رابطه (۳-۳)، در اثر جهش در موقعیت ۵، "*" به "a" تغییر کند، مطابق با رابطه (۷-۳)،

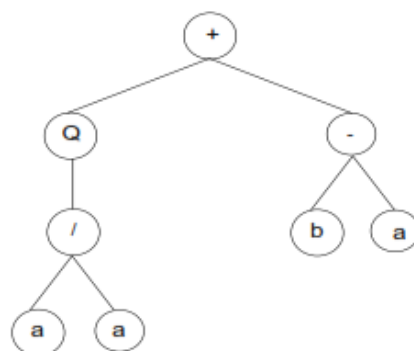
طول ORF، به جای افزایش، کاهش پیدا می‌کند.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

(۷-۳)

+ Q -/ baa aQ b **a a b a a b b a aab**

و بیان درختی آن مطابق شکل زیر خواهد بود:



شکل (۳-۱۶) - بیان درختی رابطه (۳-۷)

در این مثال، ORF، در موقعیت ۸ خاتمه می‌یابد و ET اولیه، کوتاه شده و به سه گره می‌رسد.

هر ژن، با وجود طول ثابت توانایی کدگذاری برای ETs با اندازه و اشکال متفاوت دارد. ساده ترین نوع آن، فقط از یک گره (زمانی که اولین المان از یک ژن ترمینال باشد) و بزرگ‌ترین نوع آن از تعداد زیادی گره، به اندازه طول ژن (زمانی که تمام المان‌های بخش سر، توابع با تعداد حداکثر متغیرهای مستقل باشند) تشکیل می‌شود (فریرا، ۲۰۰۱).

۳-۳-۴- تابع برازش

یکی از موارد مهم در برنامه‌ریزی بیان ژن، تعیین تابع برازش به‌منظور یافتن راه حلی است که در تمامی موارد برازش، برای یک خطای معین به‌خوبی عمل کند. برای برخی کاربردهای ریاضی، استفاده از خطای نسبی یا مطلق کوچک برای یافتن راه حل مناسب، موثر است. اما اگر محدوده انتخابی بی‌نهایت کوچک باشد، جمعیت به‌کندی استنتاج شده و در نتیجه برای یافتن راه حل مناسب ناتوان خواهد بود. به‌علاوه، اگر محدوده انتخابی وسیع باشد، راه‌حل‌های متعددی با برازش حداکثر ظاهر می‌گردد که از راه‌حل‌های مناسب دور خواهند بود. به‌منظور رفع این مشکل، یک راه حل تکاملی اختراع شده است که اجازه یافتن

راه حل مناسب را بدون توقف تکامل می‌دهد. بنابراین، سیستم قادر به یافتن راه حل مناسب با کم‌ترین خطا خواهد بود (فریرا، ۲۰۰۱).

۳-۴- حوضه آبریز کرخه

رودخانه کرخه، پس از کارون و دز سومین رودخانه بزرگ ایران از نقطه نظر آبدهی محسوب می‌گردد و رودخانه‌ای وحشی با رژیم سیلابی می‌باشد. کرخه از مناطق میانی و جنوب‌غربی رشته کوه‌های زاگرس در نواحی غرب و شمال‌غرب کشور سرچشمه گرفته و پس از طی مسافتی در حدود ۹۰۰ کیلومتر (۵۵۹ مایل) در امتداد شمال به جنوب، در مرز مشترک ایران و عراق به مرداب هورالعظیم و هورالهویزه در جنوب‌غربی استان خوزستان می‌ریزد.

حوضه آبریز رودخانه کرخه بین ۴۶ درجه و ۷ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی، ۳۱ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. این حوضه با وسعتی در حدود ۵۰۰۰۰ کیلومترمربع، شامل استان‌های همدان، کرمانشاه، لرستان، ایلام، کردستان و خوزستان می‌باشد. شاخه‌های اصلی تشکیل دهنده رودخانه کرخه، رودخانه‌های گاماسیاب، قره سو، سیمره، چرداول و کشکان می‌باشند. یکی از مشخصه‌های طبیعی رودخانه کرخه، احتمال وقوع سیلاب و خطرات ناشی از آن است (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۰).

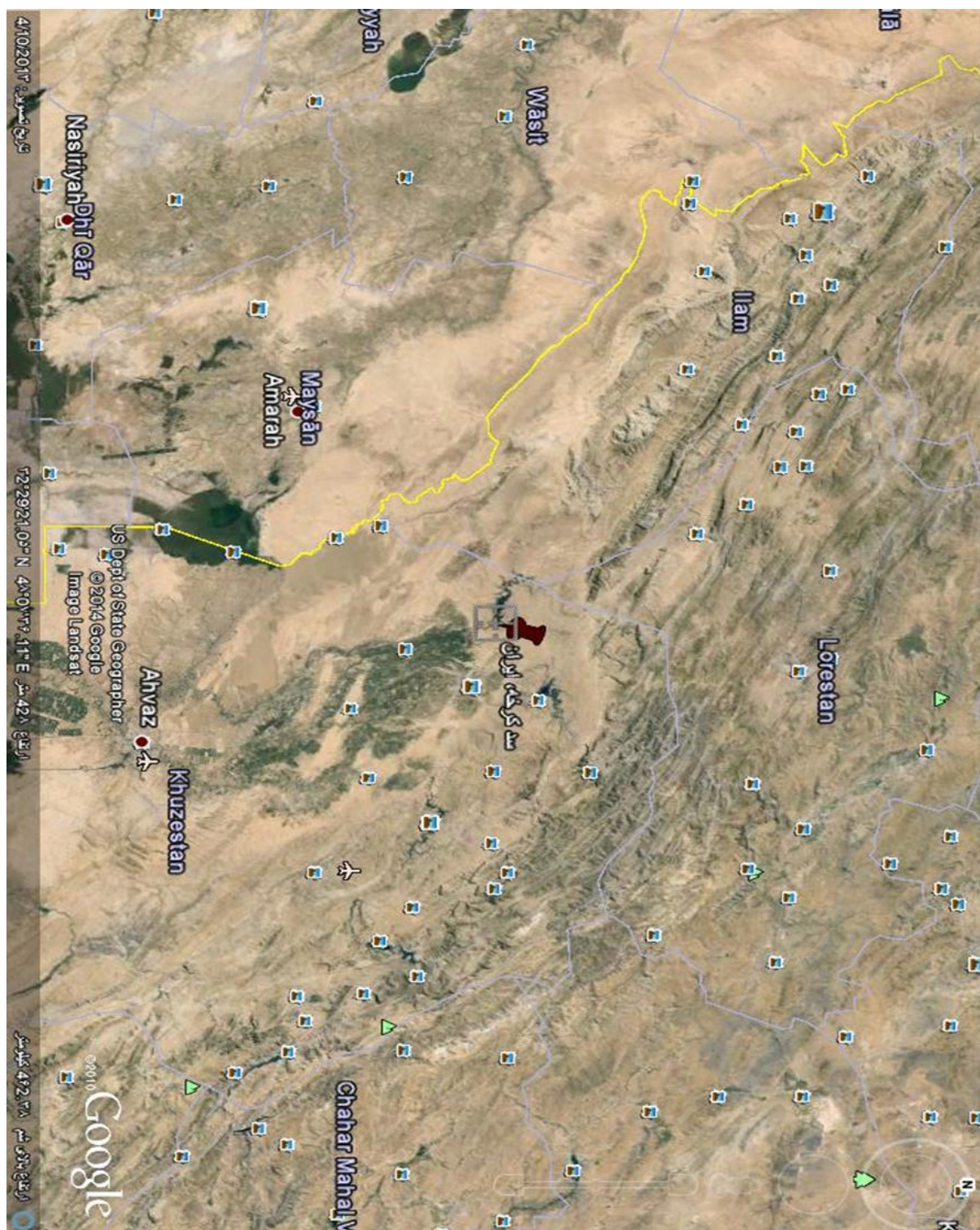
کرخه دارای چهار زیرحوضه به نام‌های گاماسیاب - دیناور با سهم ۲۷٪، قره سو با سهم ۱۲٪، سیمره - چرداول - کَرند با سهم ۳۹٪ و کشکان با سهم ۲۲٪ از مساحت کل حوضه می‌باشد (حیدری و همکاران، ۱۳۹۱). این حوضه از شمال به حوضه آبریز سفیدرود، از غرب به حوضه‌های آبخیز مرزی، از شرق به حوضه آبخیز دز و از جنوب به کرخه پایین محدود می‌شود (سلاجقه و همکاران، ۱۳۹۰).

مهم‌ترین رودخانه‌های حوضه آبریز کرخه، رودخانه سیمره با متوسط آبدهی سالانه ۹۲ متر مکعب بر ثانیه و رودخانه کشکان با متوسط آبدهی سالانه ۴۶ متر مکعب بر ثانیه است (اوژن و همکاران، ۱۳۸۹).

سد کرخه بزرگ‌ترین سد مخزنی در ایران، ششمین سد خاکی از نظر طول تاج و یازدهمین سد خاکی از نظر حجم بدنه و حجم مخزن در جهان، با هدف مهار حدود ۷۰٪ از جریان‌های سطحی آب رودخانه کرخه در فاصله ۲۲ کیلومتری شمال غرب اندیمشک در استان خوزستان، برروی آن احداث گردیده است. این سد از نوع خاکی با هسته مخلوط رسی، به ارتفاع ۱۲۷ متر از پی و طول تاج ۳۰۳۰ متر است که عرض آن در تاج ۱۲ متر و در پی ۶۶۵ متر بوده و حجم خاکریز طراحی شده در حدود ۲۶/۵ میلیون متر مکعب است. دریاچه این سد با طول حدود ۶۰ کیلومتر و با عرض متوسط ۳ کیلومتر، در سطحی حدود ۱۶۶ کیلومترمربع در رقوم نرمال، قادر به تامین مخزنی با گنجایش ۷/۶ میلیارد مترمکعب در تراز حداکثر است (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۰).



شکل (۳-۱۷) - حوضه آبریز و سد کرخه (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۰)



شکل (۳-۱۸)- تصویر ماهواره‌ای سد کرخه (گوگل ارث، ۲۰۱۴)

۳-۴-۱- وضعیت هواشناسی حوضه

در حوضه آبریز کرخه شرایط آب و هوایی متنوعی وجود دارد، به این ترتیب که دشت خوزستان و بخش‌های جنوبی حوضه از اقلیم نیمه خشک، زمستان‌های ملایم و تابستان‌های گرم و طولانی برخوردار است، در حالی که مناطق شمالی حوضه دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های ملایم است. درجه حرارت نیز در این حوضه از ۲۵ درجه سانتی‌گراد زیر صفر تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد بالای صفر تغییر می‌کند.

متوسط سالانه ریزش‌های جوی در این حوضه از ۳۰۰ میلی‌متر تا ۸۰۰ میلی‌متر متغیر است که فصل زمستان نیمی از بارش‌ها را به خود اختصاص داده و پس از آن بیش‌ترین بارش مربوط به فصل‌های بهار و پاییز می‌باشد. ریزش‌های جوی در فصل تابستان بسیار ناچیز بوده و از یک درصد کل بارش‌ها تجاوز نمی‌کند

برخی از پارامترهای هواشناسی حوضه در محل سد به شرح زیر می‌باشد:

- بارندگی: میزان بارندگی سالانه در محل ایستگاه پای‌پل (نزدیک‌ترین ایستگاه به سد) در حدود ۲۹۰/۶ میلی‌متر می‌باشد.
- درجه حرارت: درجه حرارت متوسط سالانه در محل سد حدود ۲۴/۶ درجه سانتی‌گراد است. براساس آمار ایستگاه هواشناسی دزفول، بیشینه دمای مشاهده شده ۵۳/۶ درجه سانتی‌گراد و کم‌ترین دمای مشاهده شده ۹/۵- درجه سانتی‌گراد می‌باشد.
- یخبندان: تعداد روزهای یخبندان در محل سد بسیار کم و معادل ۴/۵ روز می‌باشد.
- رطوبت نسبی: میزان رطوبت نسبی در محل ایستگاه دزفول ۴۵/۵٪ می‌باشد.
- باد: سرعت متوسط باد در محل طرح ۲/۵ متر بر ثانیه بوده و حداکثر سرعت مشاهده شده در محل طرح ۴۱/۲ متر بر ثانیه با جهت غالب غرب می‌باشد.

- ساعات آفتابی: ساعات آفتابی به طور متوسط ۲۷۶۲/۷ ساعت در سال می باشد (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، وزارت نیرو، ۱۳۸۰).

۳-۴-۲- حداکثر بارندگی محتمل

براساس آمار ۱۱۶ ایستگاه سینوپتیک، کلیماتولوژی، تبخیرسنجی و باران سنجی معمولی در حوضه آبریز رودخانه کرخه، بارندگی متوسط سالانه در این حوضه، ۵۱۷/۹ میلی متر با درجه حرارت متوسط سالانه بین ۱۱ تا ۲۴ درجه سانتی گراد می باشد. حداکثر بارندگی محتمل نیز برای یک دوره ۷ روزه از ۲۸۰ میلی متر تا ۳۶۵/۵ میلی متر برآورد گردیده است (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، وزارت نیرو، ۱۳۸۰).

۳-۴-۳- فرسایش حوضه

به طور کلی فرسایش به اشکال مختلف شیاری، سطحی، توده ای، لغزشی، خمیری، عمودی و رودخانه ای در حوضه آبریز کرخه مشاهده می شود. سالانه متجاوز از ۶۰ میلیون تن خاک از دامنه های ارتفاعات حوضه از بستر اصلی خود جدا شده و تقریباً ۴۰ میلیون تن به تالاب هورالعظیم می ریزد. ۲۰ میلیون تن باقی مانده در پستی های حوضه تجمع کرده و رسوب می کند، به این ترتیب، سالانه ۲۰ هزار هکتار از زمین های زراعی این حوضه کارایی خود را از دست می دهند.

زیرحوضه سیمره با ۲۵ میلیون تن فرسایش خاک، در رتبه نخست و زیرحوضه های قره سو، کشکان، گاماسیاب و کرخه پایین به ترتیب با ۱۵/۵، ۱۲/۵، ۵ و ۲ میلیون تن در خاک در رتبه های بعدی فرسایش قرار گرفته اند (ذرتی پور و همکاران، ۱۳۸۹).

۳-۴-۴- اهداف طرح

هدف اصلی از اجرای طرح سد مخزنی کرخه، مهار ۷۰٪ از جریان‌های سطحی آب رودخانه کرخه به‌منظور آبیاری ۲۲۰ هزار هکتار از اراضی غرب و شمال‌غرب استان خوزستان، محافظت ۸۰ هزار هکتار از اراضی پایین‌دست از خطر سیلاب و تولید انرژی برقی به‌میزان ۹۳۴ گیگاوات ساعت برق در سال با توان ۴۰۰ مگاوات می‌باشد (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۰).

۳-۵- داده‌های مورد استفاده

به‌منظور پیش‌بینی بار رسوب معلق سد کرخه به‌کمک روش برنامه‌ریزی بیان ژن، اطلاعات روزانه دبی رودخانه و دبی رسوب از دو ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و پای پل واقع در بالادست سد مخزنی کرخه، مربوط به سال‌های ۹۰-۱۳۴۷ از سازمان آب و برق خوزستان جمع‌آوری گردید.

مساحت زیرحوضه جلوگیر ۳۹۳۸۰ کیلومتر مربع می‌باشد. ارتفاع متوسط این زیرحوضه، ۱۶۲۷ متر و ارتفاع ایستگاه هیدرومتری ۳۵۰ متر است. زمان تمرکز در این زیرحوضه ۱۰۴ ساعت و متوسط بارش سالیانه، ۴۴۰ میلی‌متر می‌باشد. مساحت حوضه رودخانه کرخه نیز در محل ایستگاه هیدرومتری پای‌پل، ۴۲۶۴۴ کیلومترمربع و مساحت حوضه بین این ایستگاه و محور سد، حدود ۶۳ کیلومتر مربع می‌باشد. ارتفاع متوسط زیرحوضه پای‌پل، ۱۵۴۸ متر و ارتفاع ایستگاه هیدرومتری زیرحوضه مذکور، ۹۰ متر می‌باشد. زمان تمرکز این حوضه، ۱۲۸ ساعت و متوسط بارش سالیانه در این ایستگاه، ۴۵۰ میلی‌متر می‌باشد (طرازکار و صدق‌آمیز، ۱۳۸۷).

میزان آبدهی متوسط سالانه رودخانه کرخه با استفاده از آمار ۳۳ ساله این ایستگاه، ۱۷۷ مترمکعب در ثانیه برآورد گردیده است که معادل ۵۵۸۲ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد (وزارت نیرو، ۱۳۸۰).

ایستگاه پای پل در سال ۱۳۳۲ تاسیس شده و به علت مشکلات ناشی از جنگ تحمیلی، آمار این ایستگاه در سال‌های ۱۳۵۹-۱۳۶۰ و ۱۳۶۱-۱۳۶۰ وجود نداشت.

یکی از دیگر عوامل موثر در انتقال رسوب و میزان فرسایش، شدت بارندگی و مدت دوام آن است (وزارت نیرو، ۱۳۹۱). لذا به منظور بررسی تاثیرات بارش در پیش‌بینی بار رسوبات معلق، اطلاعات روزانه بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی جلوگیری و پای پل مربوط به سال‌های آماری ۱۳۶۵-۹۰ نیز از سازمان آب و برق خوزستان جمع‌آوری گردید و مورد استفاده قرار گرفت.

در جدول زیر، بیشینه و کمینه داده‌های مورد استفاده نشان داده شده است:

جدول (۱-۳) - بیشینه و کمینه داده‌های جمع‌آوری شده

R (mm)		Q _s (ton/day)		Q _d (m ³ /s)		ایستگاه
min	max	min	max	min	max	
۰/۵	۴۹	۱۶/۸۳۱	۲۹۶۸۹۳۰	۳/۳۴	۱۷۰۱	جلوگیر
۰/۲	۴۷	۱۱/۳۷	۹۳۱۳۲۵۶	۰/۷۹	۲۰۳۲	پای پل

در جدول فوق، Q_d دبی جریان روزانه در واحد مترمکعب بر ثانیه، Q_s دبی رسوب در واحد تن بر روز و R ارتفاع باران در واحد میلی‌متر است.

۳-۶- مراحل اجرای مدل

در پژوهش حاضر از روش‌های منحنی سنج رسوب، فائو و برنامه‌ریزی بیان ژن برای پیش‌بینی بار رسوب معلق سد کرخه استفاده شده و نتایج با یکدیگر مقایسه گردیده است، به‌منظور اجرای روش برنامه‌ریزی بیان ژن نرم افزار GenXproTools (فریرا، ۲۰۰۱) مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه مراحل پیش‌بینی به کمک این نرم افزار ارائه گردیده است.

۳-۶-۱- روش منحنی سنج رسوب (USBR)

معادله منحنی سنج رسوب به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$Q_s = aQ_d^b \quad (۳-۸)$$

ضرایب ثابت a و b از برازش یک رابطه رگرسیونی بین $\log Q_s$ و $\log Q_d$ به دست می‌آید. ضریب a شاخصی از شدت فرسایش است، مقدار بالای آن نشان‌دهنده فرسایش بالای تشکیلات زمین‌شناسی است که انتقال می‌یابند. ضریب b توان فرساینده رودخانه را نشان می‌دهد، افزایش اندک دبی جریان، قدرت فرساینده را به شدت افزایش می‌دهد (داداش‌زاده اصل و همکاران، ۱۳۸۸). همچنین در این رابطه، Q_d دبی جریان روزانه و Q_s دبی رسوب می‌باشد.

۳-۶-۲- روش فائو

این روش اصلاح شده روش USBR است که در آن شیب خط رگرسیونی منحنی سنج رسوب ثابت فرض شده و عرض از مبدا افزایش می‌یابد تا به نوعی اثر دبی‌های سیلابی لحاظ گردد (ماکنالی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹). این رابطه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q_s = a' Q_d^b \quad (9-3)$$

در رابطه فائو، عرض از مبدا (a') حاصل تقسیم میانگین دبی رسوب بر دبی رودخانه است (ظہیری و همکاران، ۱۳۸۸).

$$a' = \frac{\bar{Q}_s}{Q_d^b} \quad (10-3)$$

۳-۶-۳- برنامه ریزی بیان ژن

۳-۶-۳-۱- تعیین تابع برازش

مقدار کمی که نمایش گر کیفیت یک کروموزوم به عنوان یک جواب از مسئله است و در مقابل هزینه قرار دارد و میزان شایستگی یک کروموزوم را در بین جمعیت کروموزومی نشان می دهد، به عنوان تابع برازش شناخته می شود. در واقع تابع برازش شاخصی برای انتخاب جفت های مناسب و جفت گیری آن ها در جمعیت کروموزوم ها فراهم می آورد. فرایند GEP مانند سایر الگوریتم ها زمانی خاتمه می یابد که به ضابطه تعیین شده ای مثل میزان معین خطای میانگین کارایی اعضای جمعیت رسیده باشد و یا چرخه فرایند به تعداد دلخواهی ادامه یافته باشد، در این صورت بهترین راه حل یافت شده، گزارش داده می شود و در غیر این صورت، بهترین راه حل از نسل حاضر نگه داشته می شود و بقیه راه حل ها به فرایند گزینشی واگذار می شوند که براساس آن بهترین افراد شانس بیشتری برای تولید فرزندان دارند. با تکرار روند ذکر شده و با پیش رفتن نسل به جلو، کیفیت جمعیت بهبود یافته و به پاسخ بهینه نزدیک خواهیم شد (لوپز و وینرت، ۲۰۰۴).

در واقع تابع برازش برای ارزیابی عملکرد هر برنامه خروجی بر مبنای خطای نسبی انتخاب می‌شود و آن را به وسیله یک محدوده انتخابی و میزان دقت کاوش می‌کند. از لحاظ ریاضی، تابع برازش f_i به صورت رابطه (۱۱-۳) بیان می‌شود (فریرا، ۲۰۰۶):

$$f_i = \sum_{j=1}^n \left(R - \left| \frac{P_{ij} - T_j}{T_j} \cdot 100 \right| \right) \quad (11-3)$$

که در آن R محدوده انتخابی، P_{ij} مقدار پیش‌بینی شده به وسیله برنامه انفرادی i برای مورد برازش j (از میان n برازش) و T_j مقدار هدف برای مورد برازش j است. عبارت داخل قدر مطلق متناظر با مقدار خطای نسبی است و دقت^۱ نامیده می‌شود. چنانچه $P_{ij} = T_j$ باشد، خطا صفر خواهد بود. بنابراین برای یک برازش کامل که در آن خطا صفر باشد، مقدار f_i از یک برنامه انفرادی i برابر با $f_i = f_{\max} = Nr$ خواهد بود (فریرا، ۲۰۰۶).

در پژوهش حاضر طول محدوده انتخابی (R) برابر با ۱۰۰ است، و تعداد برازش (n) با ۱۰ برابر است، لذا حداکثر مقدار تابع برازش برابر با ۱۰۰۰ خواهد بود. مزیت این نوع تابع برازش آن است که سیستم به کمک آن راه حل بهینه را پیدا می‌کند. ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای مطلق، به عنوان معیار خطای تابع برازش انتخاب شدند.

۳-۶-۳- انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و مجموعه توابع

مرحله دوم شامل انتخاب مجموعه ترمینال‌ها و مجموعه توابع برای ایجاد کروموزوم‌هاست. برای برقراری رابطه بین داده‌های ورودی و خروجی لازم است توابعی تعریف شود، در پژوهش حاضر علاوه بر چهار عمل اصلی $\{+, -, \times, /\}$ ، توابع $\{x^2, x^3, x^{1/3}, \sqrt{x}, \exp, \log, \cos, \sin, \tan^{-1}x\}$ نیز مورد استفاده قرار

گرفته‌اند. لازم به یادآوری است که در ساختار کروموزوم‌ها، توابع و ترمینال‌ها در بخش سر ژن قرار می‌گیرند و ترمینال‌ها در قسمت دنباله قرار دارند.

در این پژوهش، به‌منظور پیش‌بینی بار رسوب معلق، یک رابطه بین دبی جریان، دبی رسوب و ارتفاع بارندگی برقرار گردیده است.

$$Q_s = f(Q_d, R) \quad (۱۲-۳)$$

در رابطه فوق Q_s دبی رسوب، Q_d دبی جریان و R ارتفاع بارندگی است. رابطه مذکور ساختار مقدماتی برنامه‌ریزی ژنتیک را نشان می‌دهد.

۳-۶-۳- انتخاب ساختار کروموزوم‌ها

مرحله سوم انتخاب ساختار کروموزوم‌هاست. این مرحله شامل تعیین طول سر و تعداد ژن‌هاست. در پژوهش حاضر با سعی و خطا^۱ بر روی تعداد کروموزوم‌ها، ژن‌ها و اندازه سر، ساختار کروموزوم‌ها و اندازه دنباله از رابطه (۳-۴) تعیین گردید.

در سعی و خطا به‌منظور تعیین تعداد کروموزوم‌ها توجه به این نکته ضروری است که در تعداد کم کروموزوم‌ها، امکان شکل‌گیری فضای جستجو وجود ندارد، هم‌چنین تعداد بسیار زیاد کروموزوم‌ها روند جستجو را کند خواهد کرد. براساس تحقیقات، جمعیت‌های مناسب بین ۲۰ تا ۳۰ کروموزوم دارند. البته گاه جمعیت‌هایی با ۵۰ تا ۱۰۰ کروموزوم نیز بهترین جواب را داده‌اند. تحقیقات دیگر نیز نشان داده‌اند که اندازه جمعیت باید بر اساس نوع مسئله و کدگذاری آن تعریف گردد و افزایش بیشتر آن بی‌فایده خواهد بود و کمکی به حل مسئله نخواهد کرد (مطیع قادر و همکاران، ۱۳۸۹).

1- Trial & Error

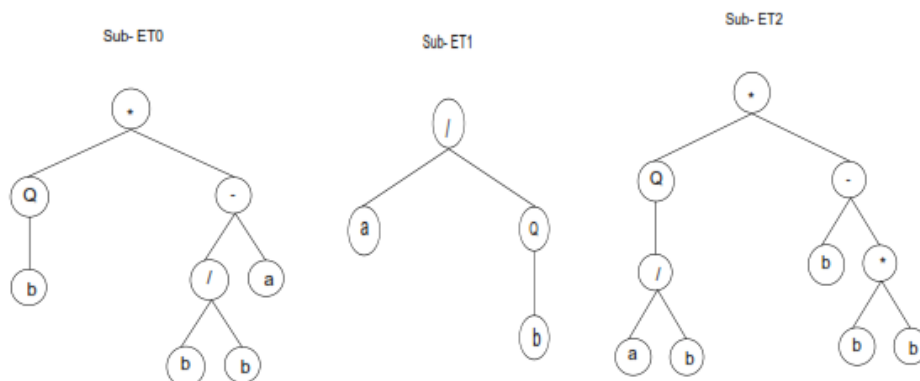
۳-۶-۳-۴- انتخاب تابع پیوند

کروموزوم‌ها در GEP، معمولاً از چندین ژن با طول مساوی تشکیل شده‌اند. برای هر مسئله یا هر اجرا، تعداد ژن‌ها نیز مانند طول سر قابل انتخاب است. هر ژن، به‌صورت یک زیربیان درختی کدگذاری می‌شود. استفاده از کروموزوم‌های چندژنی، جهت استنتاج راه حل در مسایل پیچیده مناسب‌تر است، نتایج استفاده از هر دو نوع سیستم‌های تک ژنی و چندژنی، نشان می‌دهد که در اکثر موارد سیستم‌های چندژنی موثرتر از سیستم‌های تک ژنی عمل می‌کنند (خلج، ۱۳۹۰). در پژوهش حاضر نیز از سیستم چندژنی استفاده شده است که در آخر ژن‌های انتخابی از طریق تابع مجموع به‌یکدیگر پیوند داده می‌شوند.

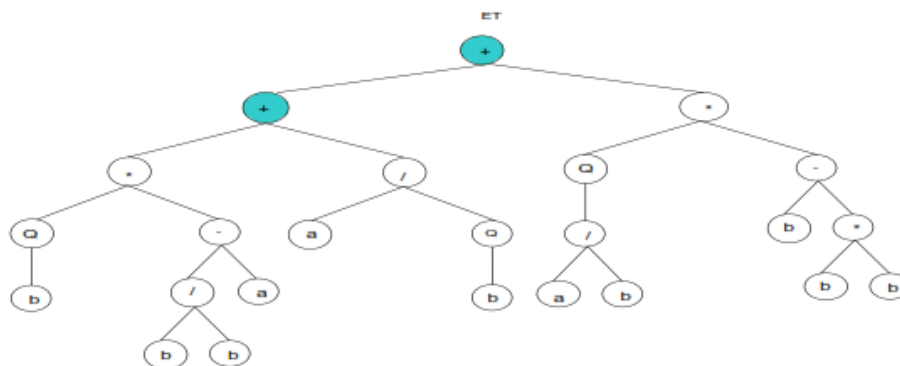
به‌عنوان مثال شکل (۳-۱۹) تابع پیوند یک سیستم سه ژنی را با رنگ آبی نشان داده است (فریرا،

۲۰۰۶).

a.



b.



شکل (۳-۱۹) (a) کدگذاری سه ژن، (b) پیوند سه ژن که در آن تابع پیوند با رنگ آبی نشان داده شده است

۳-۶-۵- انتخاب عملگرهای ژنتیکی

هدف از عملیات تکثیر، نگهداری اعضای یک نسل برای تولید نسل بعدی است. در حقیقت، این یک عملیات احتمالی است که در طول انتخاب با استفاده از چرخ رولت رخ می‌دهد و افراد تکثیرشده در معرض فعالیت عملگرهای ژنتیکی از قبیل ترکیب، جهش و ... قرار خواهند گرفت. یکی از عملگرهایی که در برنامه‌ریزی بیان ژن مورد استفاده قرار می‌گیرد عملگر جهش است. هدف عملگر جهش، بهسازی تصادفی داخل مجموعه کروموزوم‌هاست. با این عمل کروموزوم‌های جدیدی که به احتمال زیاد در کل جمعیت وجود نداشته‌اند به‌وجود می‌آیند (مطیع قادر و همکاران، ۱۳۸۹).

به منظور بهبود عملکرد عملگر جهش، می توان از تدابیری در آن استفاده کرد. به عنوان مثال می توان گرایش عملگر را نسبت به اعضای ضعیف تر افزایش داد تا ضمن حفظ خصوصیات اعضای برآورنده تر، شانس جستجو در اعضای ضعیف افزایش یابد. در این الگوریتم ها، به دلیل نخبه گرایی^۱ بر روی بهترین کروموزوم هر نسل جهش انجام نمی شود و بهترین جواب بدون هیچ تغییری به نسل بعد انتقال می یابد، این امر سبب می گردد بهترین جواب نسل حاضر حداقل به خوبی جواب نسل پیشین باشد.

عملگر دیگری که در GEP مورد استفاده قرار می گیرد عملگر ترکیب است. در GEP علاوه بر ترکیب تک نقطه ای و دونقطه ای، ترکیب ژنی نیز کاربرد دارد. در این نوع از ترکیب، ژن ها به طور کامل ترکیب می شوند. اگرچه در ترکیب تک نقطه ای، فرایند انتخاب و برش به صورت تصادفی شکل می گیرد، اما بیشترین تمایل به تغییر بخش های ابتدایی کروموزوم ها دیده می شود، لذا کیفیت کروموزم از ابتدا تا انتها به تدریج کاهش می یابد. از این رو علاوه بر ترکیب تک نقطه ای، ترکیب دونقطه ای و ژنی نیز مورد استفاده قرار می گیرد (خلج، ۱۳۹۰).

در GEP دو عملگر ترانهش یا جابه جایی مورد استفاده قرار می گیرند که عبارتند از ترانهش IS و ترانهش RIS (ریشه IS). عامل IS، ردیفی از المان ها با اندازه های متغیر است که از یک نقطه شروع و داخل ژنوم انتخاب شده استخراج می گردد. در ژنوم مکان دیگری به عنوان نقطه درج انتخاب می شود. این نقطه باید داخل قسمت سر ژن باشد، المان های IS از قسمت سر حذف می شوند و ساختار تشکیلات حفظ می شود. در واقع عملگر IS، ترانهش یافت شده در ساختار ژنوم های بیولوژیکی را شبیه سازی می کند. عملگر RIS نیز مشابه با ترانهش IS عمل می کند، با این تفاوت که اولین المان ردیف درج شده، بایستی تابع باشد و نقطه درج نیز می بایست اولین المان از ژن (ریشه) باشد (لوپز و وینرت، ۲۰۰۴).

1- Elitism

در این پژوهش، به منظور پیش‌بینی بار رسوب معلق سد کرخه به کمک برنامه‌ریزی بیان ژن از عملگرهای جهش، واژگونی، ترانپس IS و RIS، ترکیب تک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای و ژنی استفاده گردیده است. عملگرهای مذکور در سطح ژنوتیپ عمل می‌کنند و بر اساس نرخ تعیین شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال بر اساس احتمال (نرخ جهش^۱) یکی از ترمینال‌ها انتخاب شده و مقدار آن تغییر داده می‌شود. انتخاب ترمینال برای جهش بر اساس عدد مربوط به ترمینال صورت می‌گیرد، این عدد به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت تولید می‌شود، اگر عدد حاصل از نرخ جهش کمتر باشد، جهش بر روی ترمینال صورت می‌پذیرد.

۳-۶-۳-۶- الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن

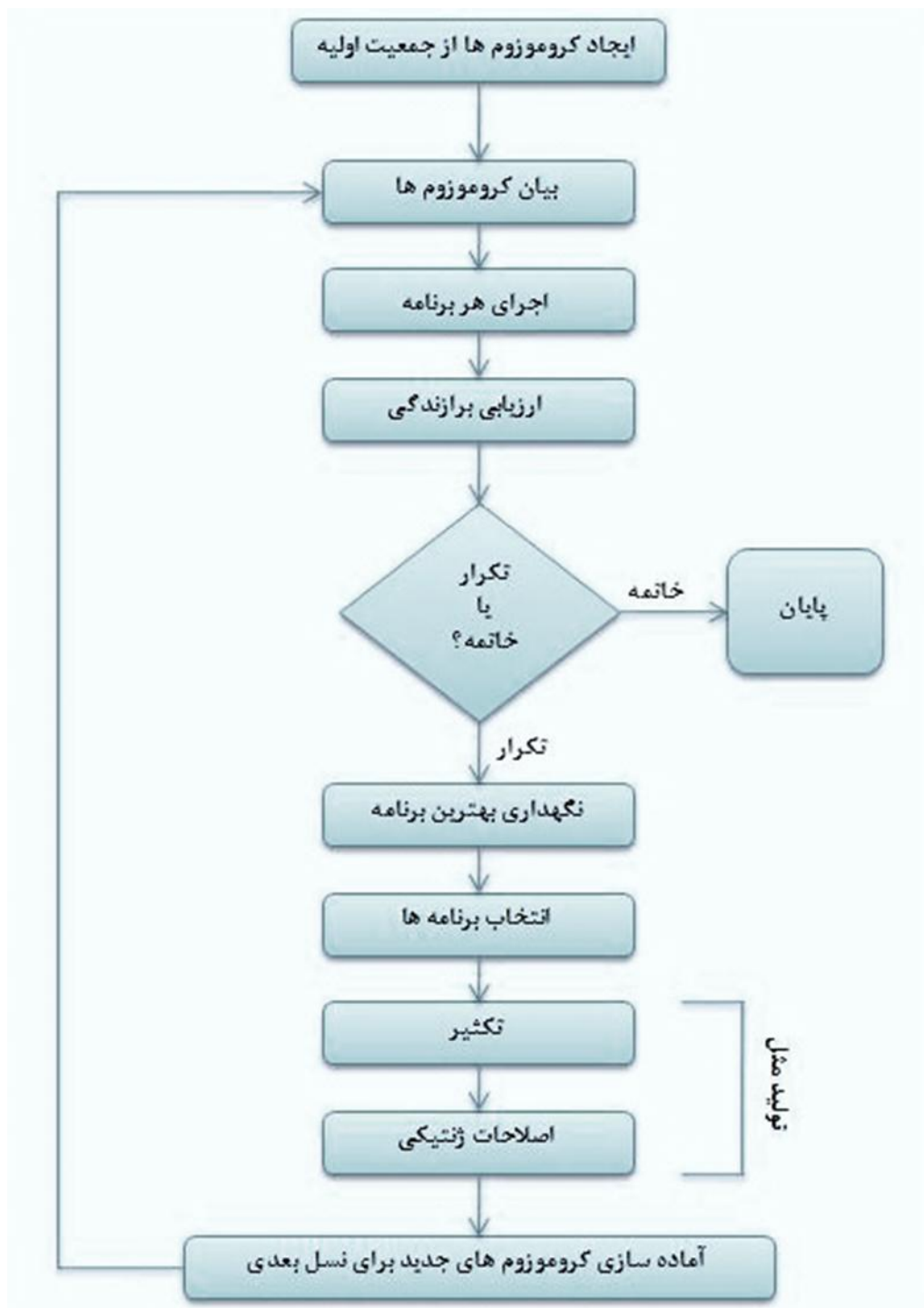
حل مسئله به کمک GEP از الگوریتم زیر پیروی می‌کند:

- ۱- فرایند با تولید تصادفی کروموزوم‌ها از تعداد معینی افراد (جمعیت اولیه) آغاز می‌گردد.
- ۲- کروموزوم‌ها به شکل درختی بیان می‌گردند.
- ۳- میزان برازندگی هر فرد تعیین می‌شود.
- ۴- در صورت حصول شرایط مطلوب، فرایند تولید نسل متوقف شده و جمعیت موجود به عنوان بهترین نسل انتخاب می‌گردد، در غیر این صورت:
- ۵- بهترین افراد نسل حاضر بدون تغییر باقی می‌مانند.
- ۶- بقیه افراد جمعیت حاضر براساس عملکرد انتخاب می‌شوند.
- ۷- بر روی جمعیت انتخاب شده، عملگرهای ژنتیکی و تکثیر صورت می‌پذیرد تا فرزندان با ویژگی‌های جدید رشد کنند.

۸- فرزندان جدید نیز در یک چرخه، تحت فرایندهای توسعه‌ای، تکثیر، انتخاب بر اساس برازندگی یا اصلاحات ژنتیکی قرار می‌گیرند.

این فرایندها بر روی تعداد معینی از نسل‌ها تکرار می‌گردد تا به پاسخ بهینه دست پیدا کنیم.

در شکل (۳-۲۰) الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن نشان داده شده است:



شکل (۳-۲۰) - الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن (فریرا، ۲۰۰۱)

۳-۷- شاخص‌های آماری سنجش مدل‌ها

برای سنجش سه روش منحنی سنجه رسوب، فائو و برنامه‌ریزی بیان ژن از معیارهای آماری ضریب همبستگی (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و متوسط خطای مطلق (MAE) استفاده شد که به‌ترتیب در روابط (۳-۱۳) تا (۳-۱۵) تعریف شده‌اند:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (۳-۱۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (۳-۱۴)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad (۳-۱۵)$$

در روابط فوق، N تعداد داده‌ها، O مقدار مشاهده شده و P مقدار پیش‌بینی شده است. همچنین نماد بار بر میانگین داده‌ها دلالت دارد.

فصل چهارم

بحث و نتایج

۴-۱- مقدمه

همان‌طوری که در فصل‌های قبلی اشاره گردید، در پژوهش حاضر از روش‌های منحنی سنج رسوب، فائو و برنامه‌ریزی بیان ژن برای پیش‌بینی بار رسوب معلق سد کرخه استفاده گردیده است. در مدل ارائه شده توسط GEP، علاوه بر داده‌های متناظر دبی جریان و دبی رسوب، از اطلاعات متناظر باران دو ایستگاه باران‌سنجی جلوگیر و پای پل نیز بهره گرفته شده است. این در حالی است که بیشتر مدل‌های مشابه، تنها از اطلاعات دبی جریان و دبی رسوب استفاده می‌نمایند و تاثیر ارتفاع باران را در میزان رسوب‌گذاری، نادیده می‌گیرند. لذا در این تحقیق از دو سناریو در پیش‌بینی بار رسوب معلق بهره گرفته شده است. نخست، تنها از داده‌های متناظر دبی جریان و دبی رسوب برای پیش‌بینی استفاده می‌گردد، در این سناریو از ترکیب دبی جریان و دبی رسوب، به‌طور ساده و با تاخیر زمانی به‌عنوان ورودی مدل استفاده شد و در سناریوی دوم از ترکیب آمار دبی جریان، ارتفاع باران و دبی رسوب، به‌طور ساده و با تاخیر زمانی، به‌عنوان ورودی مدل بهره گرفته شد. در نهایت توانایی مدل GEP با به‌کار بردن هر دو سناریو ذکر شده، نسبت به روش‌های رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفت.

به‌منظور مقایسه نتایج پیش‌بینی بار رسوب معلق به‌روش‌های منحنی سنج رسوب، فائو و برنامه‌ریزی بیان ژن، شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، متوسط خطای مطلق (MAE) و ضریب همبستگی (R^2) برای هر سه روش محاسبه گردیده است. بدیهی است هرچه میزان R^2 به یک نزدیک‌تر، و خطاها کم‌تر باشد، مدل مورد نظر در پیش‌بینی بار رسوب معلق، دقیق‌تر و توانمندتر خواهد بود.

با توجه به آنچه ذکر شد، روش‌های متداول تعیین بار رسوب از دقت نسبتاً کمی برخوردار هستند و منجر به پیش‌بینی بیشتر^۱ یا کمتر^۲ از میزان واقعی، خواهند گردید. لذا استفاده از روش‌های هوشمند از جمله برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی بار رسوب، امری ضروری به‌نظر می‌رسد. در این پژوهش روش GEP مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفته است.

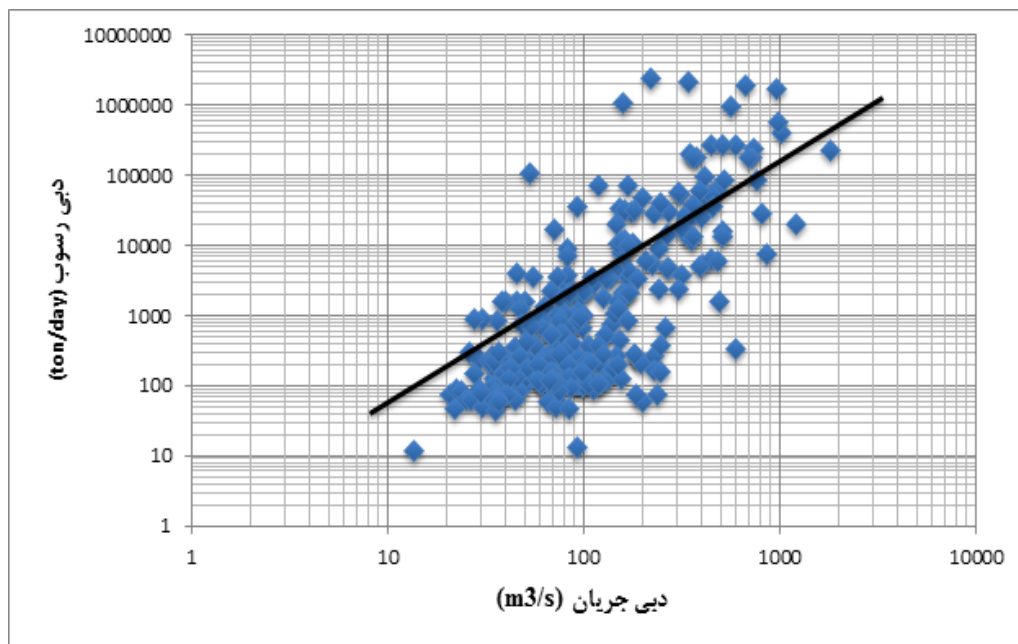
۴-۲- منحنی سنج رسوب

۴-۲-۱- ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

به‌منظور پیش‌بینی بار رسوب معلق سد کرخه، اطلاعات دبی جریان و دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر، مربوط به سال‌های آماری ۱۳۹۰-۱۳۴۷ از سازمان آب و برق خوزستان جمع‌آوری گردید، هم-چنین اطلاعات مربوط به ارتفاع باران زیرحوضه مذکور، مربوط به سال‌های آماری ۱۳۹۰-۱۳۶۵ نیز تهیه شد. با توجه به عدم وجود آمار مربوط به ارتفاع بارش در سال‌های ۱۳۶۵-۱۳۴۷، و به‌منظور یکسان‌سازی فضای مقایسه، از اطلاعات دبی جریان و دبی رسوب سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۶۵ استفاده گردید و پس از حذف آمار مشکوک دبی جریان و دبی رسوب متعلق به این سال‌های آماری، تعداد ۴۵۹ سری داده مورد استفاده قرار گرفت. ۸۰ درصد داده‌ها، مربوط به سال‌های آماری ۱۳۸۲-۱۳۶۵ به‌عنوان آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده، به‌عنوان آزمون در نظر گرفته شدند.

شکل (۴-۱) نمودار دبی-دبی رسوب داده‌های این ایستگاه را نشان می‌دهد. پراکندگی داده‌ها، تراکم نمونه‌برداری را در دبی‌های پایین و نمونه‌برداری معدود از دبی‌های سیلابی را نشان می‌دهد.

1- Overestimate
2- Underestimate



شکل (۱-۴) - نمودار دبی- دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

رابطه (۸-۳) که در فصل قبل به آن اشاره شد به صورت زیر می باشد:

$$Q_s = aQ_d^b$$

پارامترهای a و b از روابط زیر محاسبه شد (N تعداد داده ها را نشان می دهد):

$$\log a = \frac{\sum_{i=1}^N \log Q_s - b \sum_{i=1}^N \log Q_d}{N} \quad (۱-۴)$$

$$b = \frac{(\sum_{i=1}^N \log Q_d \times \log Q_s) - (\sum_{i=1}^N \log Q_d \times \sum_{i=1}^N \log Q_s)}{N(\sum_{i=1}^N (\log Q_d)^2 - \sum_{i=1}^N (\log Q_s)^2)} \quad (۲-۴)$$

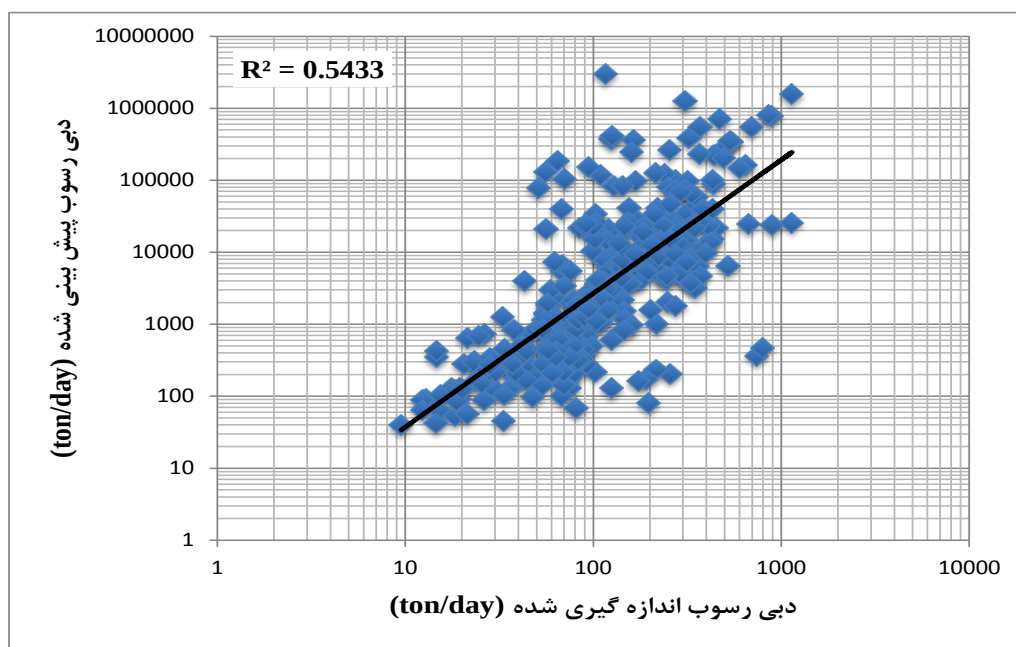
لذا این پارامترها برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیری، به صورت زیر تعیین گردید:

$$a = 1/0.266, b = 1/7256$$

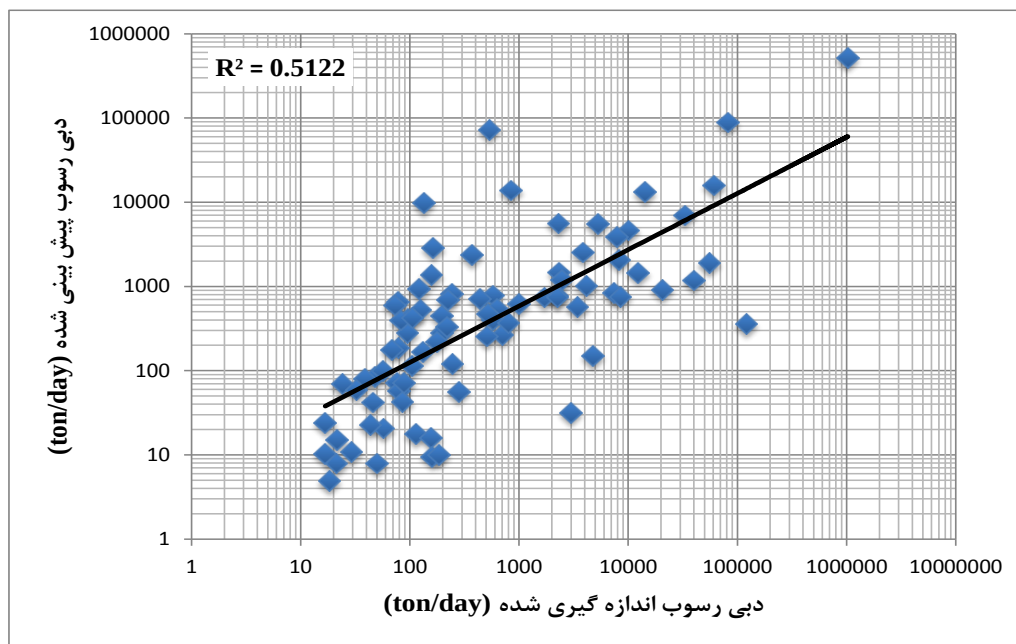
و رابطه USBR برای این ایستگاه به صورت زیر نوشته شد:

$$Q_s = 1.0266 Q_d^{1.7256} \quad (3-4)$$

نمودارهای برازش رابطه مذکور در هر دو مرحله آموزش و آزمون در شکل‌های (۲-۴) و (۳-۴) نشان داده شده است.



شکل (۲-۴) - منحنی سنج رسوب ایستگاه هیدرومتری جلوگیری در مرحله آموزش



شکل (۴-۳)- منحنی سنج رسوب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر در مرحله آزمون

جدول (۴-۱)- نتایج حاصل از برازش منحنی سنج رسوب بر روی داده‌های رسوب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

مرحله برازش	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
آموزش	۰/۵۴۳۳	۲۴۱۱۱۲	۷۵۴۱۰
آزمون	۰/۵۱۲۲	۴۸۱۳۵۴	۲۹۷۰۰۲

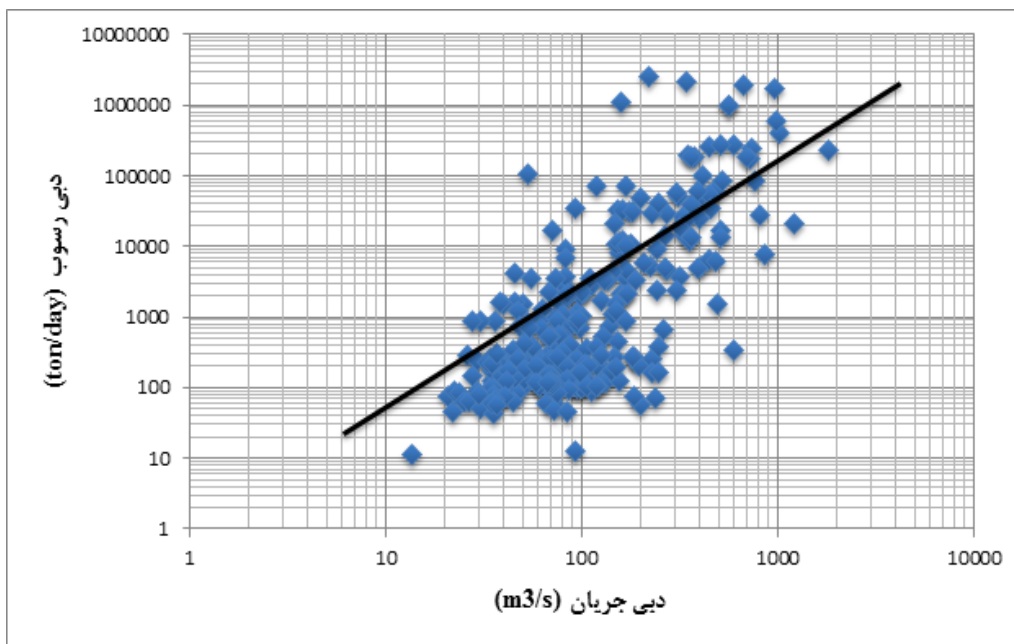
از نتایج اشکال و جدول فوق برمی‌آید ضریب همبستگی رابطه USBR با مقادیر ۰/۵۴۳۳ و ۰/۵۱۲۲ به ترتیب در هر دو مرحله آموزش و آزمون نسبتاً پایین می‌باشد. به عبارتی روش مورد استفاده از توانایی و کارآمدی چشم‌گیری در تعیین بار رسوب معلق برخوردار نمی‌باشد، هم‌چنین میزان خطای بالای این روش

با $RMSE = 241112$ (ton/day) در مرحله آموزش و با $RMSE = 481354$ (ton/day) در مرحله آزمون، موید دیگری بر عدم اطمینان پذیری رابطه به دست آمده و تعمیم نتایج می باشد.

۴-۲-۲- ایستگاه هیدرومتری پای پل

با هدف تعیین بار رسوب معلق این ایستگاه، اطلاعات دبی جریان روزانه و دبی رسوب متعلق به سال های آماری ۱۳۹۰-۱۳۴۷ و اطلاعات مربوط به ارتفاع باران متعلق به سال های آماری ۱۳۹۰-۱۳۶۵، از سازمان آب و برق خوزستان تهیه گردید. در مجموع، ۵۹۱ سری داده دبی و دبی رسوب تهیه شد، اما به دلیل نبود اطلاعات ارتفاع باران سال های ۱۳۶۵-۱۳۴۷، مشابه با ایستگاه هیدرومتری جلوگیر، اطلاعات متناظر دبی جریان روزانه، دبی رسوب و ارتفاع باران متعلق به سال های آماری ۱۳۹۰-۱۳۶۵ مورد استفاده قرار گرفت. در این میان، ۸۰ درصد اطلاعات مربوط به سال های آماری ۱۳۸۴-۱۳۶۵ برای آموزش و مابقی اطلاعات برای بخش آزمون در نظر گرفته شد.

به منظور تعیین بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای پل به کمک روش USBR، از اطلاعات دبی جریان روزانه و دبی رسوب متناظر این ایستگاه بهره گرفته شد. پراکندگی داده های دبی- دبی رسوب این ایستگاه در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. شکل، تراکم بالای نمونه برداری را در دبی های پایین و پراکندگی نمونه برداری را در دبی های سیلابی نشان می دهد.

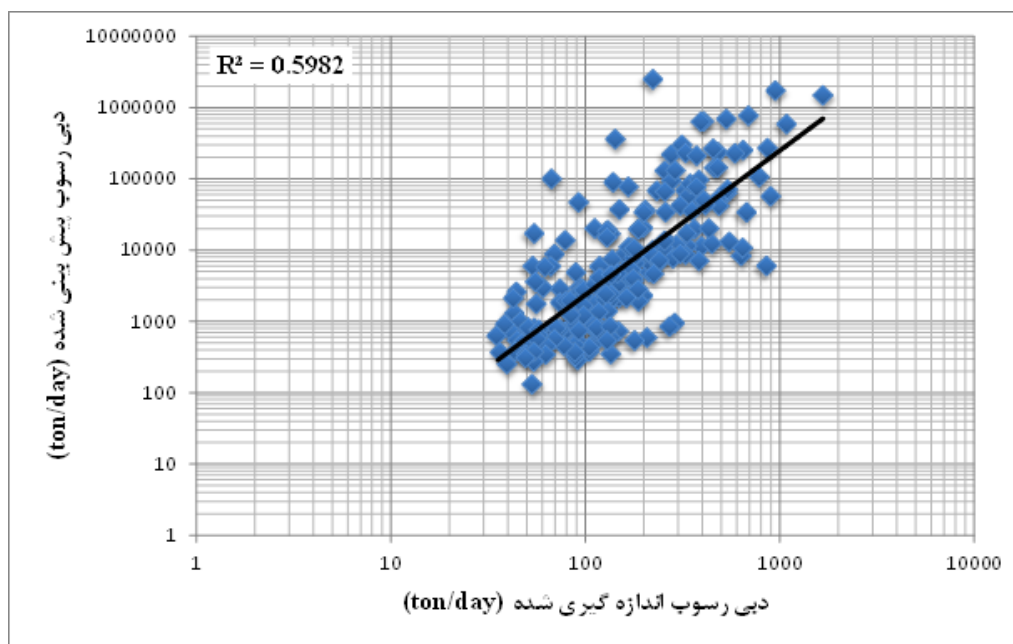


شکل (۴-۴) - نمودار دبی- دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری پای پل

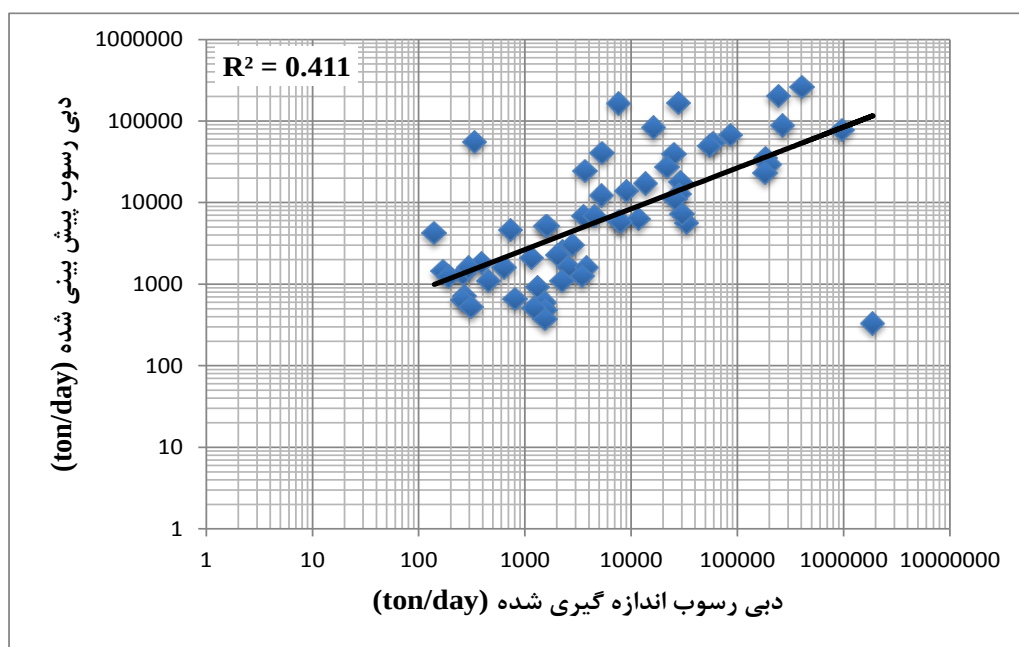
پس از تعیین پارامترهای a و b ایستگاه مذکور، رابطه USBR این ایستگاه به شکل زیر تعیین گردید:

$$Q_s = 0.2115Q_d^{2.0237} \quad (۴-۴)$$

پس از برازش رابطه مذکور به دو بخش آموزش و آزمون، نمودارهای (۴-۵) و (۴-۶) ترسیم شدند:



شکل (۴-۵)- منحنی سنج رسوب ایستگاه هیدرومتری پای پل در مرحله آموزش



شکل (۴-۶)- منحنی سنج رسوب ایستگاه هیدرومتری پای پل در مرحله آزمون

جدول زیر، نتایج اجرای روش فوق را در برآورد بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای پل نشان می-دهد.

جدول (۲-۴) - نتایج حاصل از برازش منحنی سنج رسوب بر روی داده‌های رسوب ایستگاه هیدرومتری پای پل

مرحله برازش	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
آموزش	۰/۵۹۸۲	۲۷۹۳۰۶	۱۲۰۵۳۷
آزمون	۰/۴۱۱	۵۹۳۲۵۰	۴۹۰۳۳۶

با توجه به ضرایب همبستگی پایین ۰/۵۹۸۲ و ۰/۴۱۱ و نیز خطای بالای (ton/day) $RMSE = 279306$ و $RMSE = 593250$ (ton/day) به ترتیب در مراحل آموزش و آزمون، می‌توان به ناتوانی و عدم اطمینان‌پذیری روش USBR، در پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای پل اشاره نمود.

پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه‌های هیدرومتری جلوگیری و پای پل با روش منحنی سنج رسوب، موید ضعف این روش در برآورد بار رسوب معلق می‌باشد. این نتیجه با نتایج پژوهش محققانی چون عرب-خدری و همکاران (۲۰۰۴)، صادقی (۱۳۸۴)، کرودر^۱ و همکاران (۲۰۰۷)، مساعدی و همکاران (۱۳۸۸)، ماکنالی‌زاده و همکاران (۱۳۸۹) و هرینگتون^۲ (۲۰۱۳) مطابقت دارد. آن‌ها در مطالعات خود به این نتیجه دست یافتند که دقت روش منحنی سنج رسوب در برآورد بار رسوب معلق پایین بوده است و در تمامی

1- Crowder

2- Harrington

موارد منحنی سنج رسوب باعث برآورد کم‌تر از میزان واقعی، از حداقل ۴۰ درصد تا حداکثر ۸۰ درصد می‌شود.

۴-۳- روش فائو

۴-۳-۱- ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

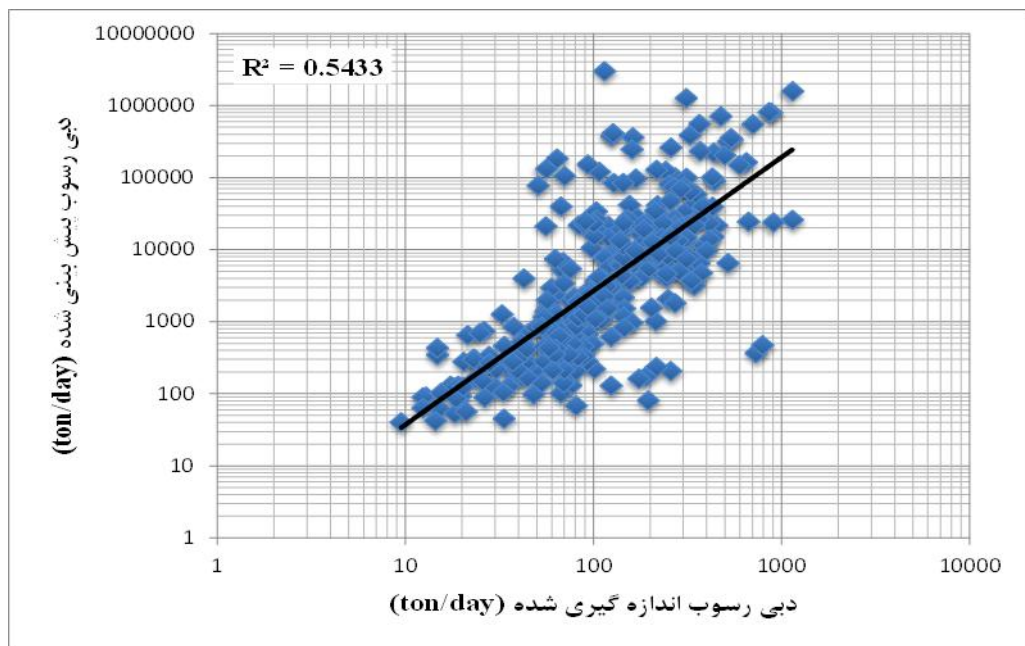
طبق رابطه (۳-۱۰)، ضریب a' به صورت زیر تعیین گردید:

$$a' = 6/1$$

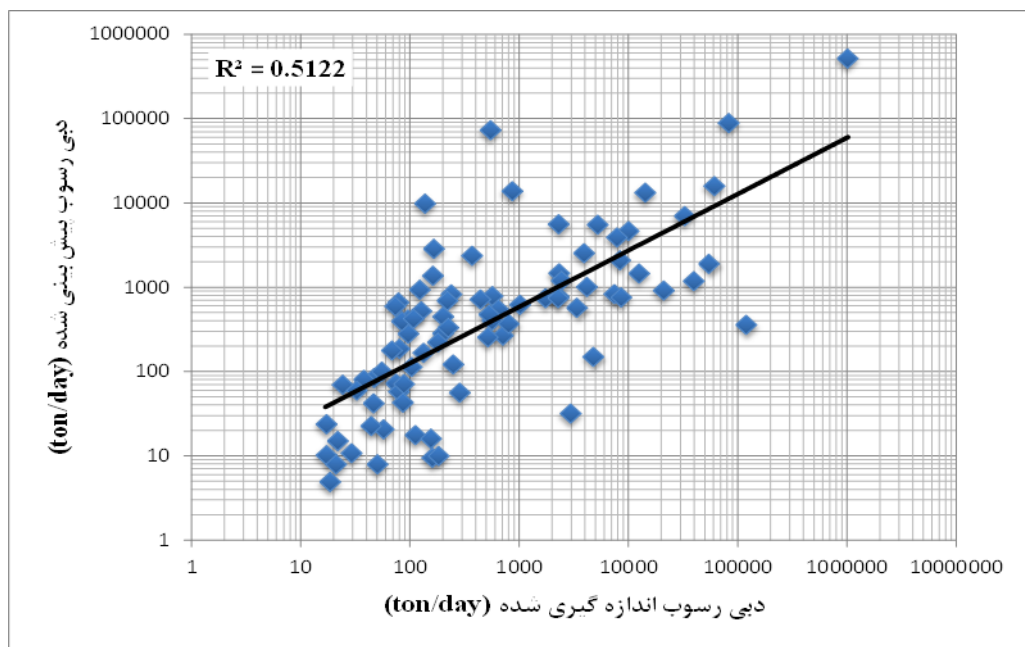
لذا رابطه فائو برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر، به صورت رابطه (۴-۵) نوشته شد:

$$Q_s = 6.1Q_d^{1.7256} \quad (4-5)$$

شکل‌های (۴-۷) و (۴-۸)، نتایج برازش رابطه فائو به مراحل آموزش و آزمون و دقت این رابطه را در پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر نشان می‌دهند، هم‌چنین در ادامه میزان خطای حاصل از برازش این رابطه در جدول (۴-۳) ارائه گردیده است.



شکل (۴-۷) - رابطه بین دبی رسوب اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از رابطه فائو در مرحله آموزش



شکل (۴-۸) - رابطه بین دبی رسوب اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از رابطه فائو در مرحله آزمون

جدول (۴-۳) - نتایج حاصل از برازش رابطه فائو بر روی داده‌های رسوب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

مرحله برازش	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
آموزش	۰/۵۴۳۳	۲۵۶۸۸۵	۱۰۶۰۹۰
آزمون	۰/۵۱۲۲	۵۸۲۷۶۳	۴۵۲۶۱۲

رابطه فائو با ضرایب همبستگی پایین ۰/۵۴۳۳ و ۰/۵۱۲۲ و همچنین خطای بالای (ton/day) $RMSE = ۲۵۶۸۸۵$ و $RMSE = ۵۸۲۶۷۳$ (ton/day) به ترتیب در دو بخش آموزش و آزمون، در برآورد بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر، موفق عمل نکرد. نتایج، نشان گر دقت ناکافی و خطای نسبتا بالای این روش در پیش‌بینی بار رسوب معلق می‌باشد.

۴-۳-۲- ایستگاه هیدرومتری پای پل

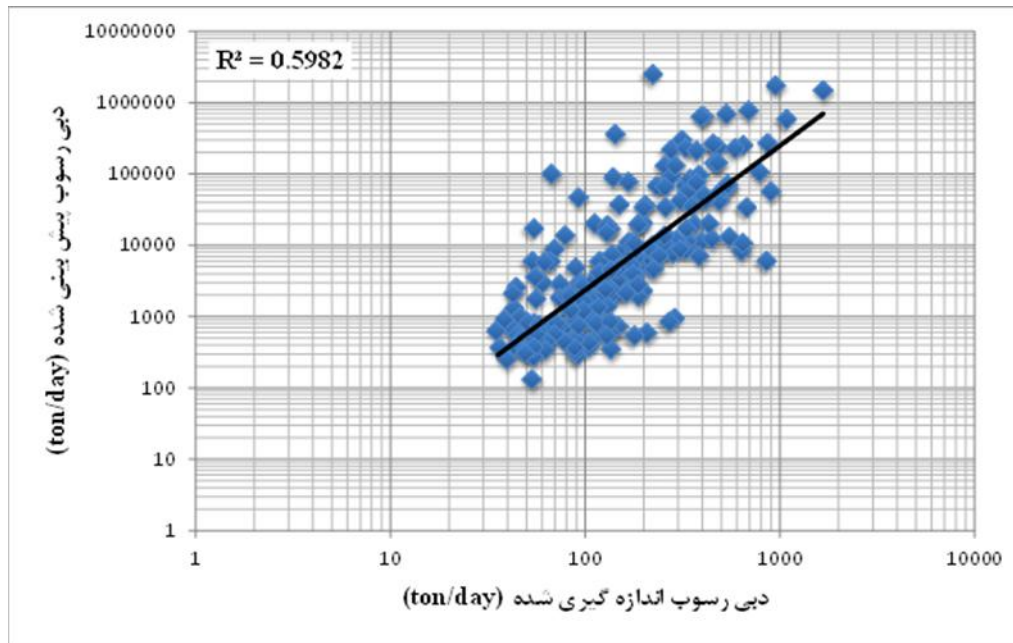
مشابه با ایستگاه قبلی، با توجه به رابطه (۳-۱۲)، ضریب a' در رابطه فائو ایستگاه هیدرومتری پای پل به صورت زیر محاسبه شد:

$$a' = ۱/۳۱۷$$

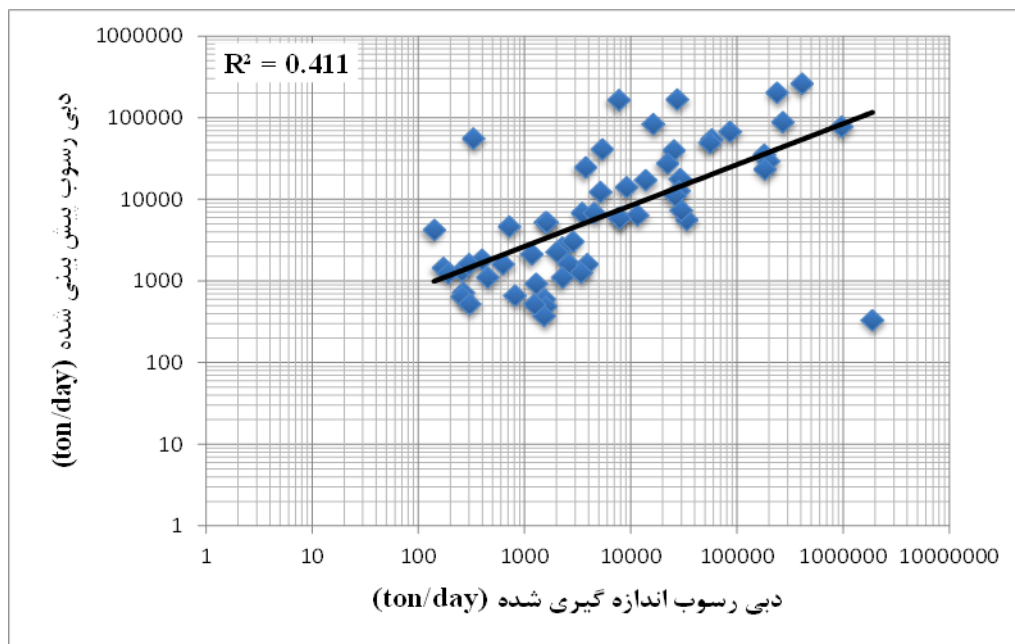
و با توجه به ضریب a' ، رابطه فائو ایستگاه هیدرومتری پای پل مطابق رابطه (۴-۶) تعیین گردید:

$$Q_s = 1.317 Q_d^{2.0237} \quad (۴-۶)$$

شکل‌های (۹-۴) و (۱۰-۴) دبی رسوب معلق پیش‌بینی شده ایستگاه هیدرومتری پای پل را به کمک رابطه فائو نشان می‌دهند.



شکل (۹-۴) - رابطه بین دبی رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه فائو در مرحله آموزش



شکل (۴-۱۰) - رابطه بین دبی رسوب اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از رابطه فائو در مرحله آزمون

جدول زیر، نتایج اجرای روش فوق را در برآورد بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای پل نشان می-

دهد:

جدول (۴-۴) - نتایج حاصل از برازش رابطه فائو بر روی داده های رسوب ایستگاه هیدرومتری پای پل

MAE (ton/day)	RMSE (ton/day)	R^2	مرحله برازش
۱۷۵۴۳۶	۳۵۹۵۴۲	۰/۵۹۸۲	آموزش
۷۲۹۶۲۱	۷۴۳۵۱۷	۰/۴۱۱	آزمون

با توجه به ضرایب همبستگی $0/5433$ و $0/411$ و خطای بالای $RMSE = 359542$ (ton/day) و $RMSE = 743517$ (ton/day) به ترتیب در مراحل آموزش و آزمون، می توان به ناتوانی و عدم اطمینان پذیری رابطه فائو در پیش بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای پل اشاره کرد.

نتایج برازش رابطه فائو بر روی داده های رسوب دو ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و پای پل، وجود خطای چشم گیر در برآورد بار رسوب معلق، با استفاده از این روش را تایید می نماید. این نتیجه با نتایج تحقیقات پژوهشگرانی از جمله حمادی و نوذریان (۱۳۸۵) و صمدی بروجنی و همکاران (۱۳۹۲) مطابقت و با نتیجه پژوهش های وروانی و خلیقی (۱۳۸۷) و داداش زاده اصل و همکاران (۱۳۸۸) مغایرت دارد. علت این مغایرت را می توان به دقت پایین در نمونه برداری دانست. عدم وجود اطلاعات دبی و دبی رسوب در مواقع سیلابی عامل دیگری است که در آمار مربوط به هر دو ایستگاه دیده می شد.

۴-۴- مقایسه روش های منحنی سنج رسوب و فائو

جداول (۴-۵) و (۴-۶) مقایسه کمی نتایج برازش دو روش USBR و FAO را بر روی داده های رسوب ایستگاه های هیدرومتری جلوگیر و پای پل نشان می دهند.

جدول (۴-۵)- مقایسه نتایج روش FAO نسبت به روش USBR در برآورد دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

مرحله اجرا	RMSE	MAE
آموزش	۶/۵ درصد افزایش	۴۰ درصد افزایش
آزمون	۲۱ درصد افزایش	۵۲ درصد افزایش

جدول (۴-۶) - مقایسه نتایج روش FAO نسبت به روش USBR در برآورد دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری پای پل

مرحله اجرا	RMSE	MAE
آموزش	۲۸ درصد افزایش	۴۵ درصد افزایش
آزمون	۲۵ درصد افزایش	۴۸ درصد افزایش

نتایج دو جدول فوق نشان می‌دهند روش فائو با افزایش میزان خطا در برآورد بار رسوب معلق هر دو ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و پای پل، از توانایی کمتری نسبت به روش منحنی سنج رسوب برخوردار است. نتایج به دست آمده در تطابق با نتایج پژوهش میرزایی (۱۳۸۰) بوده است. وی در مطالعات خود به این نتیجه رسید که روش‌های مختلف برآورد بار رسوب از جمله منحنی سنج رسوب و فائو، تا ۱۳ برابر نسبت به یکدیگر اختلاف دارند. همچنین این نتیجه با نتیجه پژوهش پوراغنیایی و همکاران (۱۳۸۶) که روش فائو را روش موفق‌تری معرفی نمود، مغایرت دارد. با توجه به آن‌چه اشاره گردید، رویدادهای سیل و نمونه‌برداری از غلظت و دبی رسوب سیلابی، در تعیین بار رسوب معلق از اهمیت ویژه برخوردار است. این ضعف در آمار مربوط به هر دو ایستگاه، به‌ویژه ایستگاه هیدرومتری پای پل مشاهده شد.

۴-۵- برنامه‌ریزی بیان ژن

با توجه به آن‌چه که اشاره شد، روش‌های متداول رگرسیونی به دلیل دقت کم و خطای بالا در تعیین بار رسوب معلق، از عدم قطعیت برخوردار هستند. در پژوهش حاضر از روش برنامه‌ریزی بیان ژن برای پیش-بینی بار رسوب معلق بهره گرفته شده است. به این منظور دو سناریو تعریف و اجرا گردید. با هدف

یکسان‌سازی فضای مقایسه و صحت اجرا، برای هر دو سناریو، پارامترهای GEP به‌طور همسان تعیین شدند که به‌طور خلاصه در جدول (۷-۴) ارائه گردیده است.

یکی از برتری‌های روش برنامه‌ریزی بیان ژن در مقایسه با دیگر روش‌های هوشمند از جمله شبکه عصبی مصنوعی، قابلیت برقراری رابطه ریاضی بین پارامترهای مستقل و پارامتر وابسته است. در این پژوهش، پس از اجرای سناریوهای تعریفی و تعیین بهترین گزینه، یک رابطه ریاضی برای پیش‌بینی بار رسوب معلق هر یک از ایستگاه‌ها ارائه گردید، هم‌چنین بیان درختی رابطه مذکور نیز شرح داده شد.

۴-۵-۱- سناریوی اول

در این سناریو، از ترکیب دبی جریان روزانه و دبی رسوب با تاخیرهای زمانی، به‌عنوان ورودی مدل استفاده شد.

۴-۵-۱-۱- ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

در جدول (۷-۴)، پارامترهای مورد استفاده و مقادیر آن‌ها، در برآورد بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر به‌کمک روش برنامه‌ریزی بیان ژن نشان داده شده است. این پارامترها به‌کمک سعی و خطا تعیین می‌گردند.

جدول (۴-۷) - مقادیر پارامترهای برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیری

پارامتر	مقدار
اندازه سر (Head Size)	۸
تعداد کروموزوم‌ها (Number of 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 تک‌نقطه‌ای (One-Point Recombination Rate)	۰/۳
نرخ ترکیب دونقطه‌ای (Two-Points Recombination Rate)	۰/۳
نرخ ترکیب ژن (Gene Recombination Rate)	۰/۱
نرخ ترانزپوزیشن (IS Transposition Rate)	۰/۱
نرخ ترانزپوزیشن ریشه درج متوالی (RIS Transposition Rate)	۰/۱
نرخ ترانزپوزیشن ژنی (Gene Transposition Rate)	۰/۱
معیار خطای تابع برازش (Fitness Function Error Type)	RRSE ¹
تابع پیوند (Linking Function)	جمع (+)

1- Root Relative Squared Error

به منظور اجرای مدل برنامه ریزی بیان ژن در این ایستگاه، از شش ترکیب ورودی که در ادامه در جدول (۸-۴) ارائه شده است، استفاده گردید. واضح است که با تغییر در ترکیب ورودی‌ها، اندازه دنباله نیز با توجه به رابطه (۳-۴) تغییر می‌کند که برای هر ترکیب، محاسبه شد.

جدول (۸-۴) - ترکیب پارامترهای ورودی در سناریوی اول برنامه ریزی بیان ژن

ترکیب	پارامتر ورودی	اندازه دنباله
۱	Q_d	۱
۲	Q_d, Q_{s-1}	۹
۳	Q_d, Q_{d-1}	۹
۴	Q_d, Q_{s-1}, Q_{s-2}	۱۷
۵	Q_d, Q_{d-1}, Q_{s-1}	۱۷
۶	$Q_d, Q_{d-1}, Q_{d-2}, Q_{s-1}, Q_{s-2}$	۳۳

در ترکیب اول، مشابه با روش‌های رگرسیونی تنها از دبی جریان به عنوان ورودی مدل استفاده گردید. سپس با هدف دستیابی به پاسخ مطلوب‌تر، در ترکیب دوم از دبی جریان و دبی رسوب با یک گام تاخیر زمانی (Q_d, Q_{s-1}) به عنوان ورودی استفاده شد. در ترکیب سوم دبی جریان و دبی جریان با یک گام تاخیر زمانی به عنوان ورودی به مدل معرفی گردید، ترکیب‌های چهارم تا ششم نیز از دبی جریان و دبی رسوب با یک گام و دو گام تاخیر زمانی بهره گرفت. لازم به ذکر است که با افزایش ورودی‌ها، برنامه به طور خودکار پارامترهای کم تاثیر را حذف می‌کند.

ترکیب‌های فوق با توجه به مطالعات محققانی چون آیتک و کیسی (۲۰۰۸)، گوون و ارسین تالو (۲۰۱۰) و گوون و کیسی (۲۰۱۱) انتخاب گردیده‌اند.

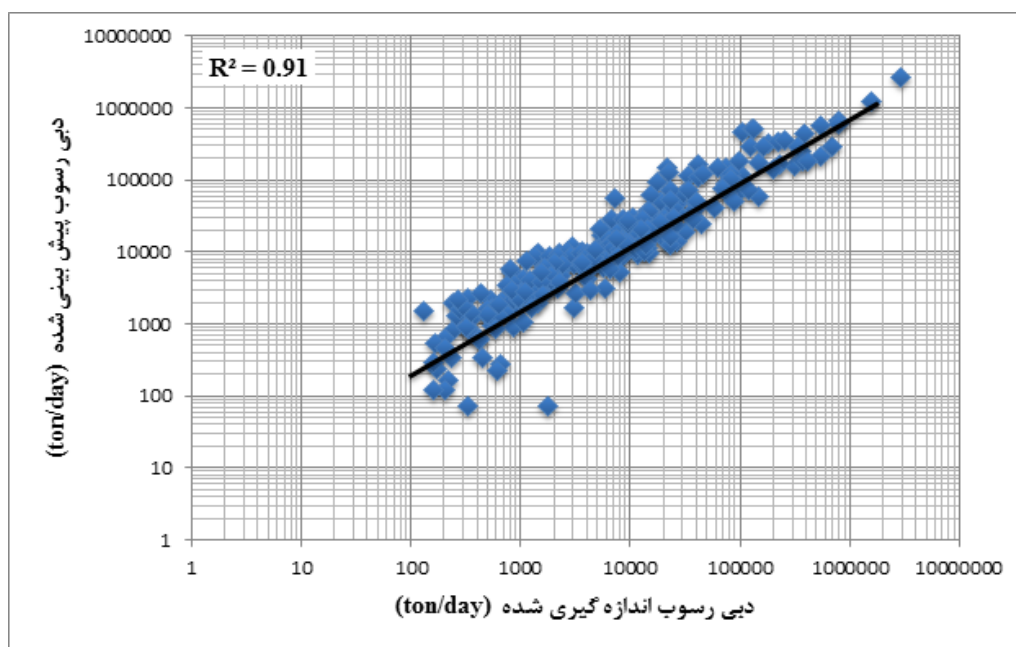
در جدول (۹-۴) ضرایب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین حاصل از اجرای ترکیب‌های مذکور در هر دو مرحله آموزش و آزمون، ارائه گردیده است. مدل مطلوب و بهینه مدلی است که با دارا بودن بیشترین تابع برازش و ضریب همبستگی، کمترین میزان خطا را به خود اختصاص بدهد.

جدول (۴-۹) - پارامترهای آماری دقت مدل‌های حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن در سناریوی اول

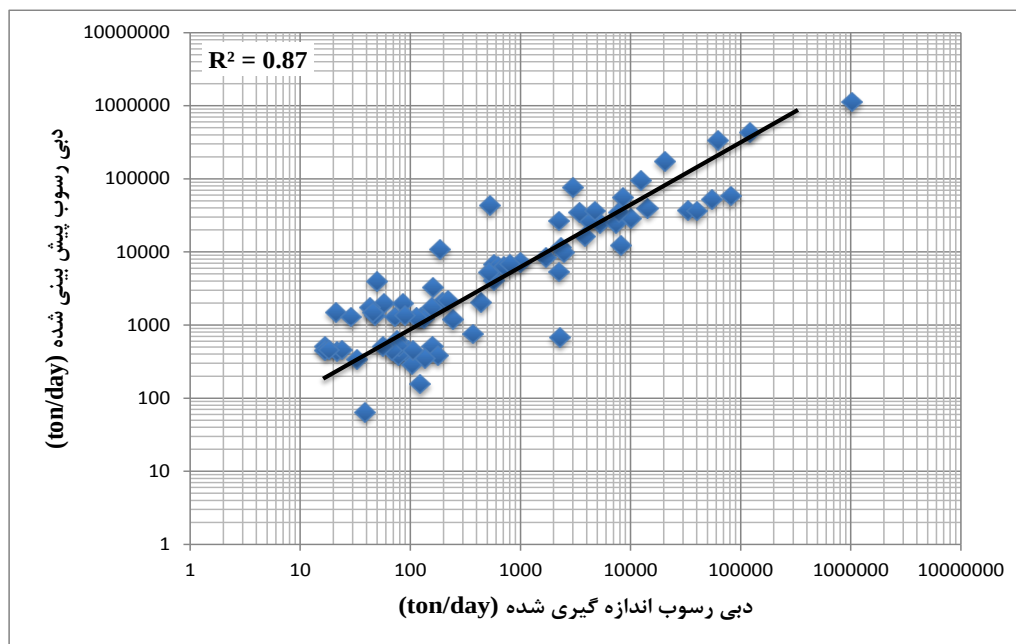
الگو	مرحله اجرا	مقدار تابع برازش	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
۱	آموزش	۷۰۳/۸۲۳	۰/۸۲	۸۶۹۰۰	۲۵۰۰۰
	آزمون	۴۸۹/۹۵۱	۰/۵۲	۱۱۶۰۰۰	۳۱۵۰۰
۲	آموزش	۷۰۷/۸۳۷	۰/۹۰	۶۵۵۰۲	۲۸۸۰۰
	آزمون	۶۶۳/۰۸۷	۰/۸۰	۵۷۱۰۰	۲۴۵۰۰
۳	آموزش	۷۶۳/۴۸۴	۰/۹۱	۶۷۸۰۰	۲۴۴۰۰
	آزمون	۶۸۶/۸۵۵	۰/۸۷	۵۱۲۰۰	۱۹۵۰۰
۴	آموزش	۷۴۹/۸۷۸	۰/۸۹	۶۹۰۰۰	۲۵۱۰۰
	آزمون	۶۴۹/۷۵۶	۰/۸۷	۵۷۷۰۰	۲۱۳۰۰
۵	آموزش	۷۵۶/۵۸۷	۰/۹۰	۶۹۱۰۰	۲۹۸۰۰
	آزمون	۶۳۱/۲۳۴	۰/۸۶	۵۱۳۰۰	۲۴۳۰۰
۶	آموزش	۷۵۸/۵۹۴	۰/۹۲	۶۵۸۷۵	۲۶۳۰۰
	آزمون	۶۷۶/۳۲۰	۰/۸۲	۵۴۱۰۰	۲۳۱۰۰

مقایسه نتایج جدول فوق، نشان داد که ترکیب سوم با ورودی دبی جریان و دبی جریان با یک‌گام تاخیر زمانی، با دارا بودن بیشترین ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۱ و ۰/۸۷، بیشترین توابع برازش برابر با ۷۶۳/۴۸۴ و ۶۸۶/۸۵۵ و کم‌ترین خطا برابر با $RMSE = 67800$ (ton/day) و ۲۴۴۰۰ (ton/day)

RMSE= ۵۱۲۰۰، به ترتیب در بخش‌های آموزش و آزمون مدل بهینه می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که الگوی مورد نظر، با دارا بودن ضریب همبستگی ۰/۸۷ در بخش آزمون، از توانایی قابل قبولی در برآورد بار رسوب معلق برخوردار است و به عبارتی نتایج قابل اطمینانی را در پیش‌بینی بار رسوب معلق، ارائه می‌کند. در شکل‌های (۱۱-۴) و (۱۲-۴) نمودارهای حاصل از اجرای الگوی سوم در هر دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده شده است.



شکل (۱۱-۴)- نمودار اجرای ترکیب سوم سناریوی اول GEP برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر در مرحله آموزش



شکل (۴-۱۲)- نمودار اجرای ترکیب سوم سناریوی اول GEP برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر در مرحله آزمون

مدل‌های درختی مربوط به برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر، شامل سه زیردرخت (ژن) می‌باشد که ساختار آن در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است. در این شکل، Sub-ET1، Sub-ET2 و Sub-ET3 به ترتیب ژن‌های اول تا سوم و پارامترهای آن‌ها به صورت $d_0=Q_d$ و $d_1=Q_d-1$ می‌باشد. جدول (۴-۱۰) مقادیر ثابت در شکل (۴-۱۳) را نشان می‌دهد. در جدول مذکور، G_1 ، G_2 و G_3 به ترتیب بیان‌گر زیردرخت یا ژن‌های ۱، ۲ و ۳ است و C مقدار ثابت عددی است. فرم ریاضی مدل حاصل با توجه به تابع پیوند جمع بین ژن‌ها، به منظور پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر، با قرار دادن مقادیر ثابت و پارامترهایی که در ساختار بیان درختی مدل برنامه‌ریزی ژن به کار رفته، تعیین گردید.

جدول (۴-۱۰) - مقادیر ثابت در بیان درختی سناریوی اول مدل پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیری

G3C1	G3C0	G2C1	G2C0	G1C1	G1C0
۴/۱۴۹۳۵۳	-۱/۱۱۵۵۰۹	۹/۱۶۸۴۸۷	۵/۰۱۶۷۲۳	-۷/۸۸۲۳۲۵	-۲/۸۷۹۱۵۱

ساختار ORF ژن‌های مورد نظر به زبان کاروا به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$-.*.*.d1.c0.-.c1.d0.d1.d0.c1.d0.d1.d0.d1$

+

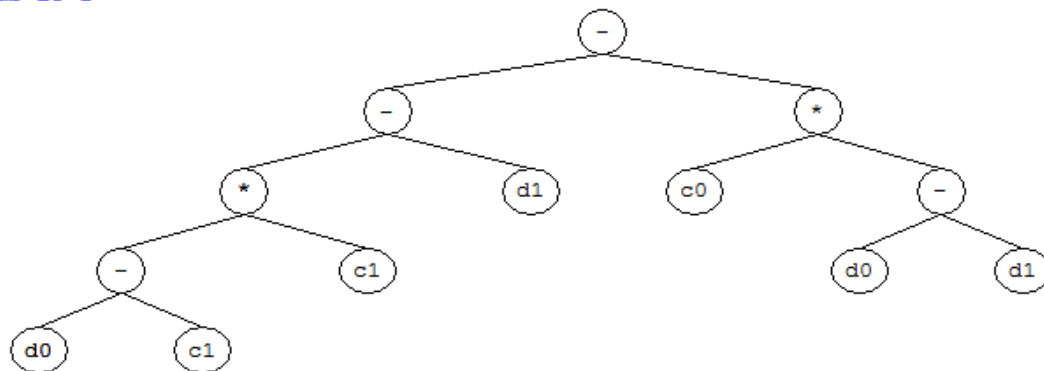
$*.-./d1.*.+.Sqrt.c1.d0.d1.d1.c1.d0.c0.d0.c0$

+

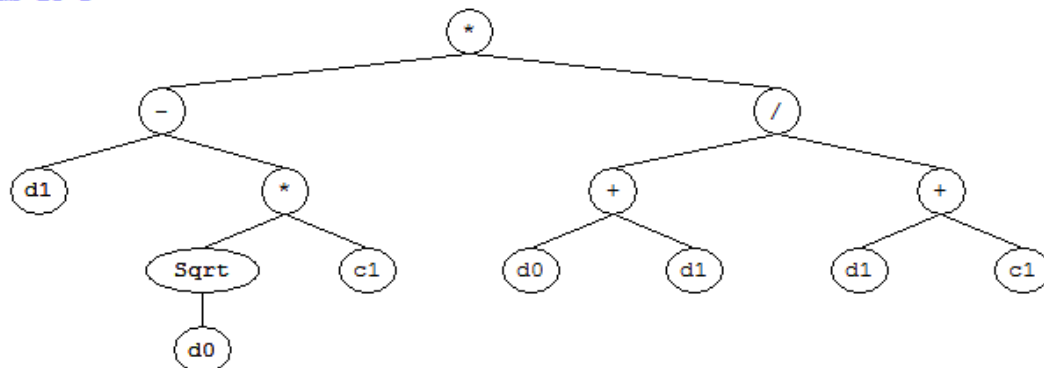
$.*.*.c1.Cos.+Ln.*.d0.d0.d1.c0.d0.d1.d0.d0.d1$

در این عبارت، d_0 دبی جریان روزانه و d_1 دبی جریان با یک‌گام تاخیر زمانی است.

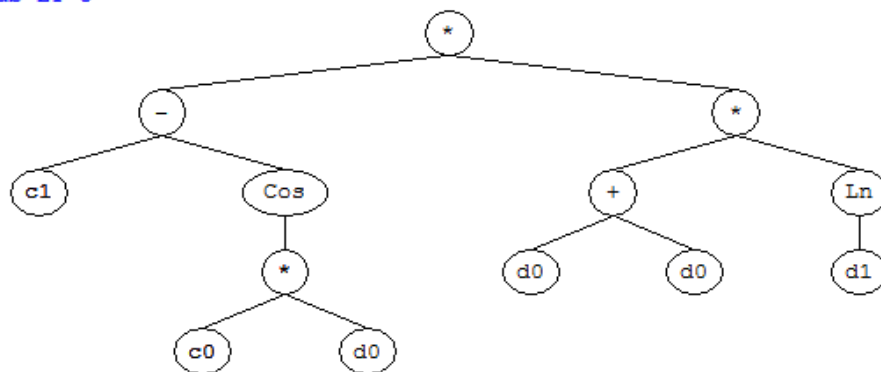
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



شکل (۴-۱۳)- بیان درختی ژن‌های ۱، ۲ و ۳ در سناریوی اول پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیری

۴-۵-۱-۲- ایستگاه هیدرومتری پای پل

در جدول (۱۱-۴) پارامترهای مورد استفاده در پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای پل با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن نشان داده شده است. این مقادیر به کمک سعی و خطا تعیین شده‌اند.

جدول (۱۱-۴)- مقادیر پارامترهای برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای پل

پارامتر	مقدار
اندازه سر (Head Size)	۱۰
تعداد کروموزوم‌ها (Number of 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 تک‌نقطه‌ای (One-Point Recombination Rate)	۰/۳
نرخ ترکیب دو نقطه‌ای (Two-Points Recombination Rate)	۰/۳
نرخ ترکیب ژن (Gene Recombination Rate)	۰/۱
نرخ ترانهش (IS Transposition Rate)	۰/۱
نرخ ترانهش ریشه درج متوالی (RIS Transposition Rate)	۰/۱
نرخ ترانهش ژنی (Gene Transposition Rate)	۰/۱
معیار خطای تابع برازش (Fitness Function Error Type)	RRSE
تابع پیوند (Linking Function)	جمع (+)

جدول (۴-۱۲) - ترکیب پارامترهای ورودی در سناریوی اول برنامه‌ریزی بیان ژن

ترکیب	پارامتر ورودی	اندازه دنباله
۱	Q_d	۱
۲	Q_d, Q_{s-1}	۱۱
۳	Q_d, Q_{d-1}	۱۱
۴	Q_d, Q_{s-1}, Q_{s-2}	۲۱
۵	Q_d, Q_{d-1}, Q_{s-1}	۲۱
۶	$Q_d, Q_{d-1}, Q_{d-2}, Q_{s-1}, Q_{s-2}$	۴۱

مانند روش‌های رگرسیونی، در ترکیب اول تنها از ورودی دبی جریان روزانه برای برآورد بار رسوب معلق استفاده گردید و به‌منظور بررسی تاثیرات دبی رسوب و دبی جریان یک‌گام و دو گام قبل، ترکیب‌های ۲ تا ۶ نیز مورد مطالعه قرار گرفتند. در این الگوها، از دبی جریان روزانه و دبی رسوب با تاخیرهای زمانی استفاده شد. نتایج حاصل از اجرای هر یک از الگوهای فوق، در جدول (۴-۱۳) نشان داده شده است. در نهایت ترکیب ورودی با دارا بودن بیشترین ضریب همبستگی و تابع برازش، و کم‌ترین میزان خطا در هر دو بخش آموزش و آزمون، به‌عنوان ترکیب مطلوب انتخاب شد. با توجه به تغییر ورودی‌ها در الگوهای شش‌گانه فوق، اندازه دنباله نیز برای هر یک از ترکیب‌ها محاسبه گردید که در جدول فوق ارائه شده است.

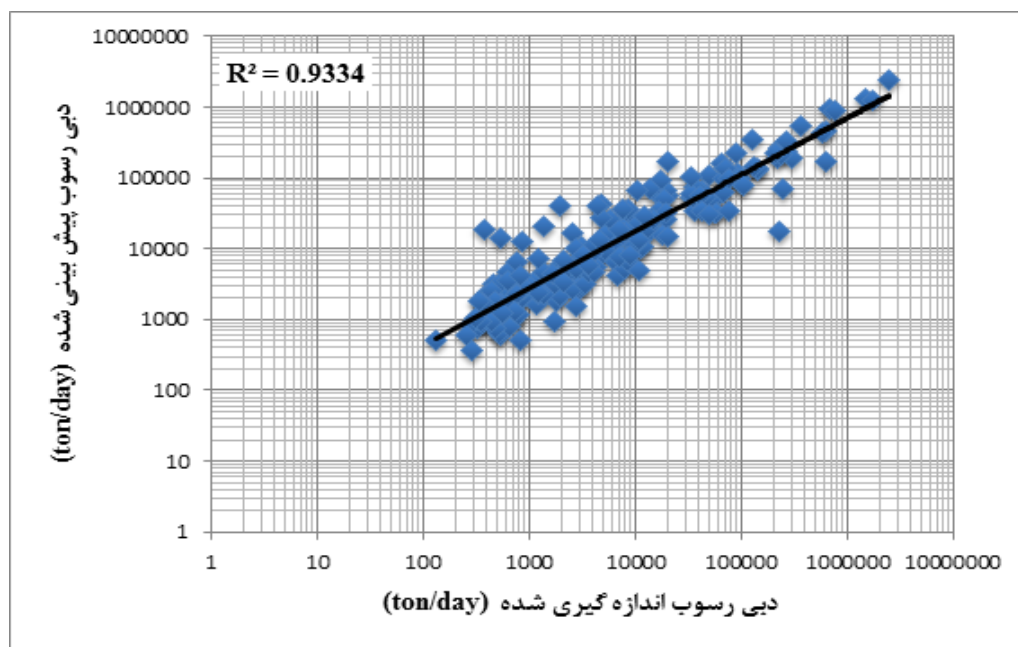
جدول (۴-۱۳) - پارامترهای آماری دقت مدل‌های حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن در سناریوی اول

الگو	مرحله اجرا	مقدار تابع برازش	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
۱	آموزش	۷۰۹/۳۴۷	۰/۸۹	۸۶۵۰۰	۳۴۸۰۰
	آزمون	۵۶۳/۲۳۶	۰/۷۷	۲۰۰۰۰۰	۵۳۳۰۰
۲	آموزش	۷۹۲/۶۲۳	۰/۹۳۳۴	۶۳۵۰۰	۲۲۹۰۰
	آزمون	۶۶۶/۹۶۷	۰/۸۴۷۳	۱۳۸۹۸۷	۳۷۰۰۰
۳	آموزش	۷۸۷/۳۰۹	۰/۹۱	۸۹۴۶۸	۲۹۴۰۰
	آزمون	۶۰۱/۳۳	۰/۸۳	۱۶۳۰۰۰	۶۲۰۴۰
۴	آموزش	۶۸۲/۲۰۳۰	۰/۷۸۴۳	۱۱۳۰۰۰	۴۳۷۰۰
	آزمون	۶۳۱/۱۷	۰/۷۳	۲۰۳۹۱۷	۶۱۵۰۰
۵	آموزش	۷۱۵/۹۷	۰/۸۵	۹۶۰۹۰	۳۰۹۰۰
	آزمون	۶۴۲/۱۲	۰/۷۴	۲۰۱۹۱۷	۵۷۸۰۰
۶	آموزش	۷۵۳/۵۴	۰/۹۰	۹۱۲۳۰	۳۰۹۰۰
	آزمون	۵۷۹/۴۰۹	۰/۸۴	۱۵۴۰۰۰	۵۷۲۰۰

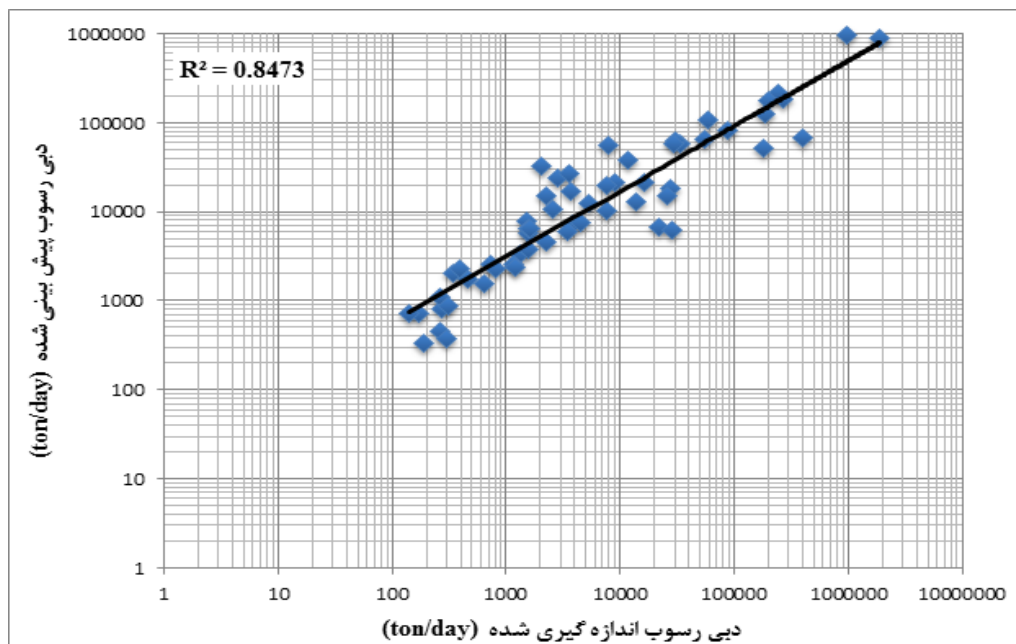
نتایج جدول نشان داد الگوی دوم با ترکیب ورودی دبی جریان روزانه و دبی رسوب یک گام قبل، با دارا بودن بیشترین ضرایب همبستگی برابر با ۰/۹۳۳۴ و ۰/۸۴۷۳، بیشترین توابع برازش برابر با ۷۹۲/۶۲۳ و ۶۶۶/۹۶۷، و کمترین میزان خطا برابر با $RMSE = ۶۳۵۰۰$ (ton/day) و ۵۷۲۰۰ (ton/day)

به ترتیب در بخش‌های آموزش و آزمون، بهترین نتیجه را به خود اختصاص داد و لذا $RMSE=138978$ به عنوان مدل مطلوب انتخاب شد.

نمودارهای حاصل از اجرای مدل مذکور در ادامه، در شکل‌های (۴-۱۴) و (۴-۱۵) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۴) - نمودار اجرای ترکیب دوم سناریوی اول GEP برای ایستگاه هیدرومتری پای پل در مرحله آموزش



شکل (۴-۱۵)- نمودار اجرای ترکیب دوم سناریوی اول GEP برای ایستگاه هیدرومتری پای پل در مرحله آزمون

در جدول (۴-۱۴) مقادیر پارامترهای ثابت مدل برتر، ارائه شده است. همان‌طور که اشاره گردید، G_1 ، G_2 و G_3 زن‌های ۱، ۲ و ۳ می‌باشند.

جدول (۴-۱۴)- مقادیر ثابت در بیان درختی سناریوی اول مدل پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای پل

G3C1	G3C0	G2C1	G2C0	G1C1	G1C0
-۷/۸۵۹۸۶۴	-۹/۵۵۲۰۶۳	-۳/۲۵۷۰۸	۹/۸۰۳۴۹۸	۵/۸۰۳۷۴۲	۱/۹۱۸۰۹۱

هم‌چنین ساختار ORF زن‌های مورد نظر به زبان کاروا به صورت زیر می‌باشد:

$$*.*.c1.Atan.*.X3.Cos.*./.*.d0.c1.d0.d1.c0.d1.d1.c0.d0.d1.c0$$

+

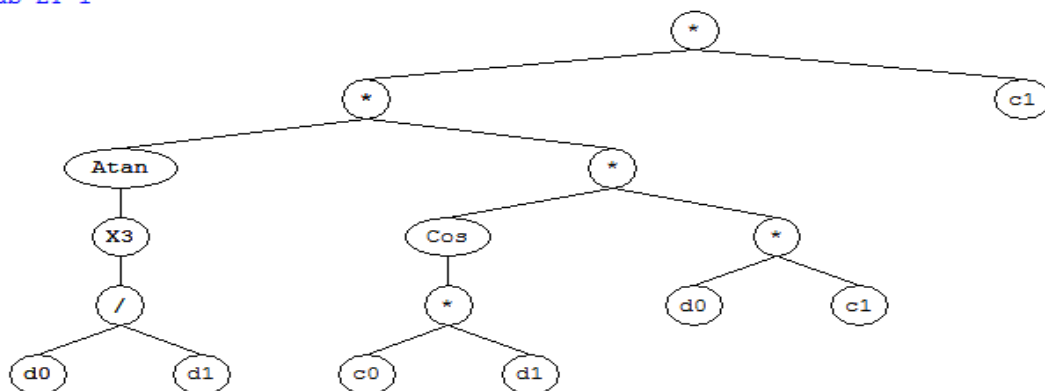
$$*.*.Atan.c0.*.3Rt.Sin.+.+.*.d0.d0.c1.d1.d1.c1.c1.d1.c1.d0.d0$$

+

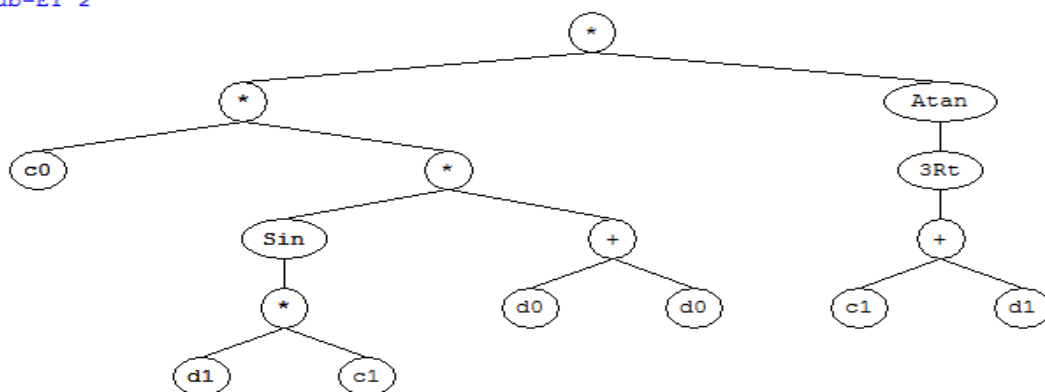
$$.*c1.-.Atan.*.*.Ln.+.*.X3.d0.d0.c0.d0.d0.d1.c0.d1.c1.d1.d1$$

ساختار درختی ترکیب مورد نظر در شکل (۴-۱۶) نمایش داده شده است، در این ساختار، d_0 دبی جریان روزانه و d_1 دبی رسوب با یک گام تاخیر زمانی است.

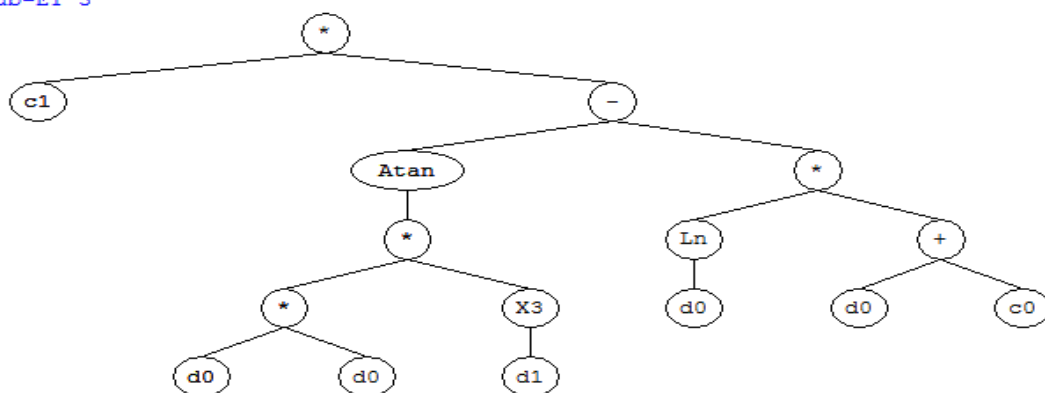
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



شکل (۴-۱۶)- بیان درختی ژن های ۱، ۲ و ۳ در سناریوی اول پیش بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای پل

در جدول (۴-۱۵) نتایج اجرای سناریوی اول GEP برای پیش‌بینی بار رسوب معلق هر دو ایستگاه در بخش آزمون نشان داده شده است.

جدول (۴-۱۵)- نتایج برازش سناریوی اول GEP بر روی داده‌های رسوب هر دو ایستگاه در مرحله آزمون

ایستگاه	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
جلوگیر	۰/۸۷	۵۱۲۰۰	۱۹۵۰۰
پای‌پل	۰/۸۴۷۳	۱۳۸۹۸۷	۳۷۰۰۰

ضرایب همبستگی برابر با ۰/۸۷ و ۰/۸۴۷۳، و خطای نسبتا کم $RMSE = 51200$ (ton/day) و $RMSE = 138978$ (ton/day) به‌ترتیب برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و پای‌پل نشان داد که بهتر است به‌دلیل رفع اثر برازش کاذب بین دبی جریان روزانه و دبی رسوب، برآورد بار رسوب معلق تنها با دبی جریان صورت نگیرد. این نتیجه با نتایج تحقیق پژوهشگرانی از جمله آیتک و کیسی (۲۰۰۸)، گوون و ارسین تالو (۲۰۱۰) و کیسی و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد. به‌عنوان مثال در پژوهش گوون و ارسین تالو (۲۰۱۰) در برآورد بار رسوب معلق حوضه فرات، با $(Q_s)_{max} = 650000$ (ton/day) مقدار $RMSE$ در حدود 3000 (ton/day) تعیین گردید. همچنین آن‌ها در مطالعات خود دریافتند که استفاده از ترکیب‌های متفاوت دبی جریان روزانه، دبی جریان با تاخیر زمانی و دبی رسوب با تاخیر زمانی، در بهبود روند پیش‌بینی بار رسوب معلق، افزایش دقت و کاهش خطا موثر است.

۴-۵-۲- سناریوی دوم

در این سناریو از ترکیب دبی جریان روزانه، ارتفاع باران متناظر و دبی رسوب، به‌طور ساده و با تاخیر زمانی، برای پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیری و پای‌پل استفاده شده است.

۴-۵-۲-۱- ایستگاه هیدرومتری جلوگیری

در جدول (۴-۱۶) ترکیب پارامترهای ورودی در این سناریو و اندازه دنباله برای هر الگو، نشان داده شده است.

جدول (۴-۱۶)- ترکیب پارامترهای ورودی در سناریوی دوم برنامه‌ریزی بیان ژن

ترکیب	پارامتر ورودی	اندازه دنباله
۱	Q_d, R	۹
۲	Q_d, Q_{d-1}, R	۱۷
۳	$Q_d, R, R-1$	۱۷
۴	$Q_d, Q_{d-1}, R, R-1$	۲۵
۵	$Q_d, Q_{d-1}, R, R-1, Q_{s-1}$	۳۳

در نخستین ترکیب از این سناریو، از دبی جریان و ارتفاع باران متناظر در اجرای مدل مورد نظر استفاده گردیده است. سپس، با هدف دستیابی به پاسخ بهینه، در مراحل بعد از ترکیب ساده و با تاخیر زمانی اطلاعات دبی جریان، باران و دبی رسوب بهره گرفته شد. اندازه دنباله نیز با توجه به اندازه سر و تعداد متغیرهای مستقل تعیین می‌شود که برای هر یک از الگوهای مورد نظر، در جدول فوق منظور گردیده است.

کارایی هر یک از الگوهای مورد نظر به کمک پارامترهای آماری ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین سنجیده شد و مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به ضرورت تشابه در مقایسه سناریوی اول و دوم، در این سناریو نیز از مقادیر ژنی سناریوی اول استفاده گردیده است.

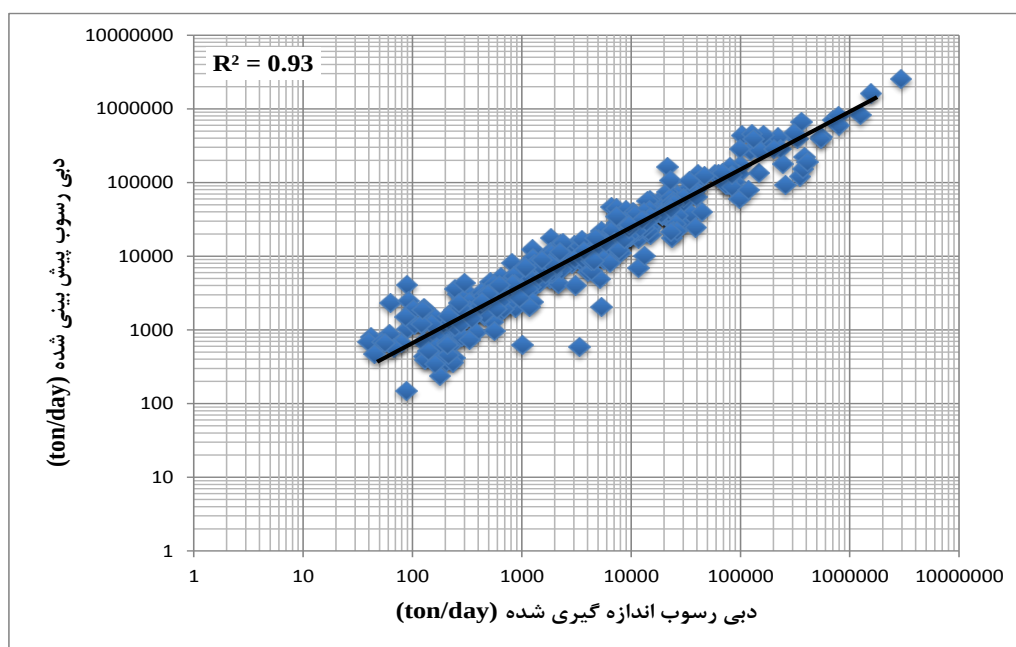
در جدول (۴-۱۷) پارامترهای آماری و نتایج اجرای پنج الگوی معرفی شده در جدول (۴-۱۶)، به منظور مقایسه و انتخاب مدل مطلوب ارائه شده است.

جدول (۴-۱۷) - پارامترهای آماری دقت مدل‌های حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن در سناریوی دوم

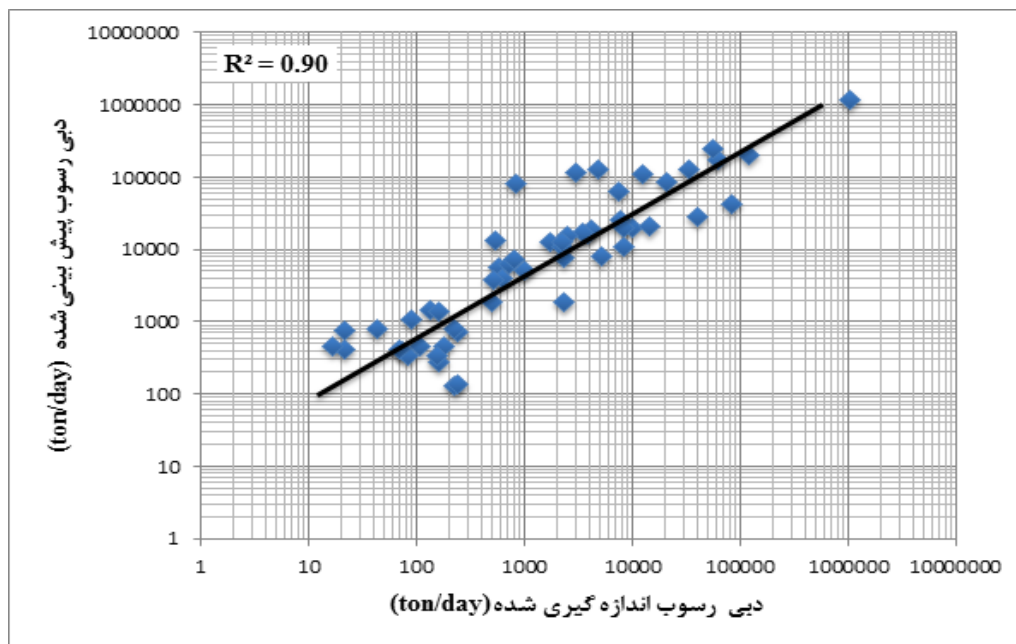
الگو	مرحله اجرا	مقدار تابع برازش	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
۱	آموزش	۷۶۸/۲۱	۰/۹۳	۶۲۴۰۰	۲۴۲۰۰
	آزمون	۷۴۰/۰۶	۰/۹۰	۴۲۵۰۰	۱۷۹۰۰
۲	آموزش	۷۰۳/۸	۰/۸۳	۸۹۵۰۰	۲۹۹۰۰
	آزمون	۶۰۸/۶۵۱	۰/۷۹	۸۱۱۰۰	۲۶۰۰۰
۳	آموزش	۷۰۹/۹۷۲	۰/۸۷	۷۶۵۰۰	۲۷۲۰۰
	آزمون	۶۳۸/۶۹۲	۰/۸۱	۷۲۴۰۰	۲۵۰۰۰
۴	آموزش	۷۳۳/۳۵۶	۰/۸۶	۷۱۱۰۰	۲۶۷۰۰
	آزمون	۶۰۱/۶۱۷	۰/۷۵	۶۳۹۰۰	۲۴۴۰۰
۵	آموزش	۷۵۷/۰۱۸	۰/۹	۶۹۵۰۰	۲۶۳۰۰
	آزمون	۷۱۳/۳۹	۰/۸۵	۵۴۴۰۰	۲۳۰۰۰

نتایج جدول فوق نشان داد که ترکیب اول، با دارا بودن بیشترین ضرایب همبستگی برابر با ۰/۹۳ و ۰/۹۰، بیشترین توابع برازش برابر با ۷۶۸/۲۱ و ۷۴۰/۰۶ در مراحل آموزش و آزمون، دقت بالاتری را در برآورد بار رسوب معلق به خود اختصاص داده است. همچنین دارا بودن کمترین خطا معادل با (ton/day) $RMSE = ۶۲۴۰۰$ و $RMSE = ۴۲۵۰۰$ (ton/day) به ترتیب در دو بخش آموزش و آزمون، توانایی این مدل در پیش‌بینی بار رسوب معلق و تعمیم رابطه مورد نظر را نشان می‌دهد.

در شکل‌های (۱۷-۴) و (۱۸-۴) نمودارهای اجرای این الگو با ورودی‌های دبی جریان روزانه و ارتفاع باران متناظر نشان داده شده است.



شکل (۱۷-۴)- نمودار اجرای ترکیب اول سناریوی دوم GEP برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر در مرحله آموزش



شکل (۴-۱۸) - نمودار اجرای ترکیب اول سناریوی دوم GEP برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر در مرحله آزمون

در جدول (۴-۱۸) مقادیر پارامترهای ثابت در پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر، با استفاده از اطلاعات متناظر ارتفاع باران و دبی جریان، گردآوری گردیده است، G_1 ، G_2 و G_3 به ترتیب ژن‌های ۱، ۲ و ۳ هستند.

جدول (۴-۱۸) - مقادیر ثابت در بیان درختی سناریوی دوم مدل پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

G3C1	G3C0	G2C1	G2C0	G1C1	G1C0
-۱/۲۳۰۵۶	-۸/۵۷۶۷۸۲	-۹/۱۵۰۳۹	۷/۰۶۹۶۷۱	۸/۸۱۷۴۴۴	-۳/۸۳۲۰۳۲

ساختار ORF سه ژن مورد نظر نیز به زبان کاروا در عبارت زیر نشان داده شده است:

$$*.-.\text{Sqrt.}+.*.d1.-.-.d1.d1.d0.d1.d0.d1.c0.d1.c0$$

+

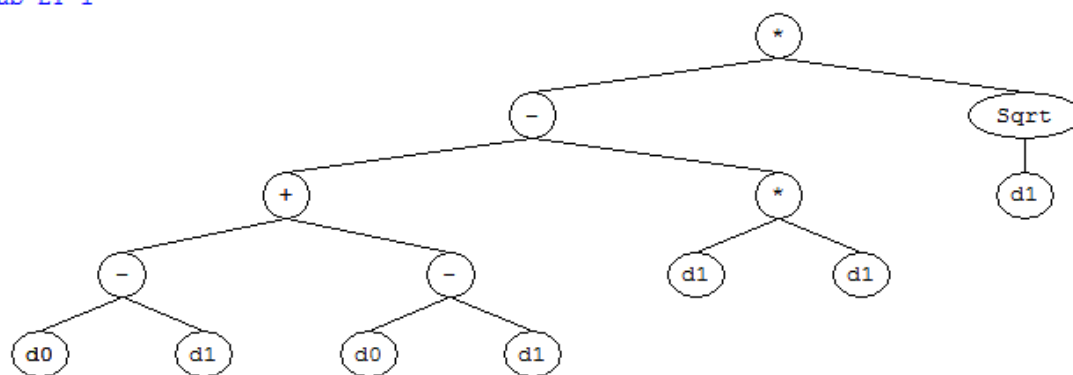
$$*.*.+.\text{Ln.Ln.}+.-.+c0.d0.c1.d0.d1.d0.c1.c0.d1$$

+

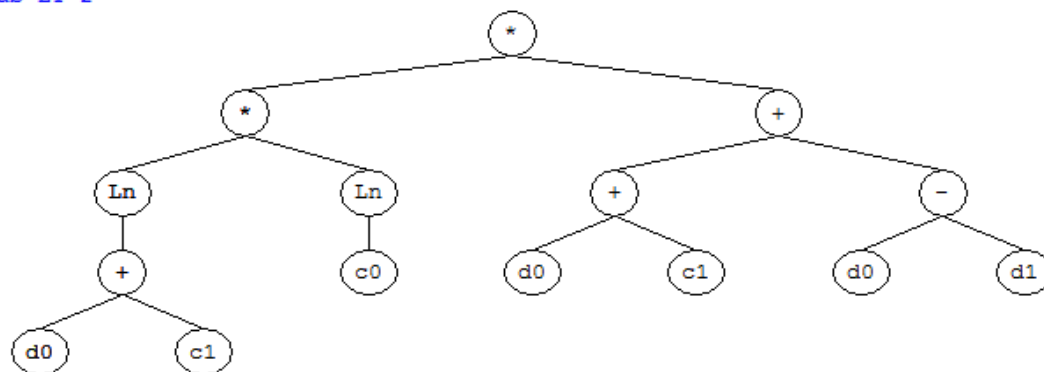
$$*.\text{Sin.}.*.-.d0.3Rt.+.*.d0.c0.d0.d0.c1.d0.d1.d1.d1$$

همچنین در شکل (۴-۱۹) ساختار درختی برنامه‌ریزی بیان ژن نشان داده شده است، مقادیر پارامترهای d_0 و d_1 به ترتیب برابر با Q_d و R می‌باشد.

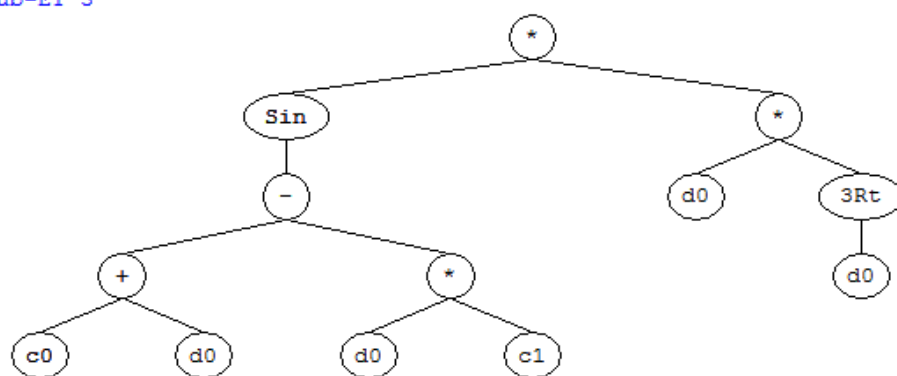
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



شکل (۴-۱۹)- بیان درختی ژن‌های ۱، ۲ و ۳ در سناریوی دوم پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

۴-۵-۲-۲- ایستگاه هیدرومتری پای پل

جدول (۴-۱۹) ترکیب پارامترهای ورودی و اندازه دنباله برای هر ترکیب را در این ایستگاه نشان می‌دهد.

جدول (۴-۱۹)- ترکیب پارامترهای ورودی در سناریوی دوم

ترکیب	پارامتر ورودی	اندازه دنباله
۱	Q_d, R	۱۱
۲	Q_d, Q_{d-1}, R	۲۱
۳	$Q_d, R, R-1$	۲۱
۴	$Q_d, Q_{d-1}, R, R-1$	۳۱
۵	$Q_d, Q_{d-1}, R, R-1, Q_s-1$	۴۱

نتایج اجرای ترکیب‌های فوق در جدول (۴-۲۰) نشان داده شده است. با مقایسه توابع برازش، ضرایب همبستگی و خطاهای محاسبه شده برای هر ترکیب، مدل مطلوب برگزیده شد. پس از انتخاب بهترین ترکیب، نمودارهای مربوط به مراحل آموزش و آزمون، جدول مقادیر ثابت، ساختار ORF ژن‌ها و نیز بیان درختی الگوی مذکور نیز ارائه گردیده است.

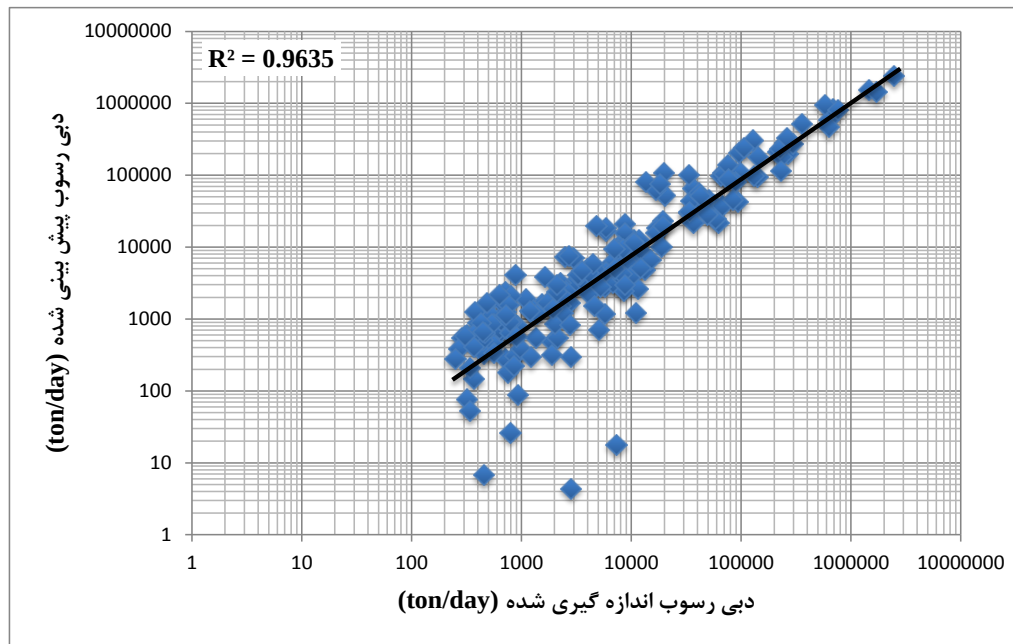
جدول (۴-۲۰) - پارامترهای آماری دقت مدل‌های حاصل از برنامه‌ریزی بیان ژن در سناریوی دوم

الگو	مرحله اجرا	مقدار تابع برازش	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
۱	آموزش	۷۴۴/۶۹۷	۰/۷۹	۸۲۹۰۰	۳۶۳۵۴
	آزمون	۶۰۸/۵۹۶	۰/۷۱	۱۷۶۰۰۰	۴۹۱۰۰
۲	آموزش	۷۵۱/۵۵۳	۰/۸۱	۸۰۱۰۰	۴۳۴۵۱
	آزمون	۵۴۶/۴۰۰	۰/۷۱	۲۲۹۰۰۰	۶۴۰۰۰
۳	آموزش	۶۹۱/۵۹۱	۰/۷۹	۱۰۸۰۰۰	۴۶۱۴۶
	آزمون	۴۲۹/۳۲۶	۰/۶۶	۳۶۷۰۰۰	۱۰۳۰۰۰
۴	آموزش	۸۳۹/۴۷۴	۰/۹۶۳۵	۴۶۳۰۰	۱۶۵۰۰
	آزمون	۷۳۶/۵۴۵	۰/۸۹۳۷	۱۱۲۰۰۰	۳۵۴۰۰
۵	آموزش	۶۷۳/۶۲۳	۰/۸۰	۱۰۷۰۰۰	۳۴۸۰۰
	آزمون	۶۵۴/۷۵۴	۰/۷۲	۱۴۶۰۰۰	۴۶۵۰۰

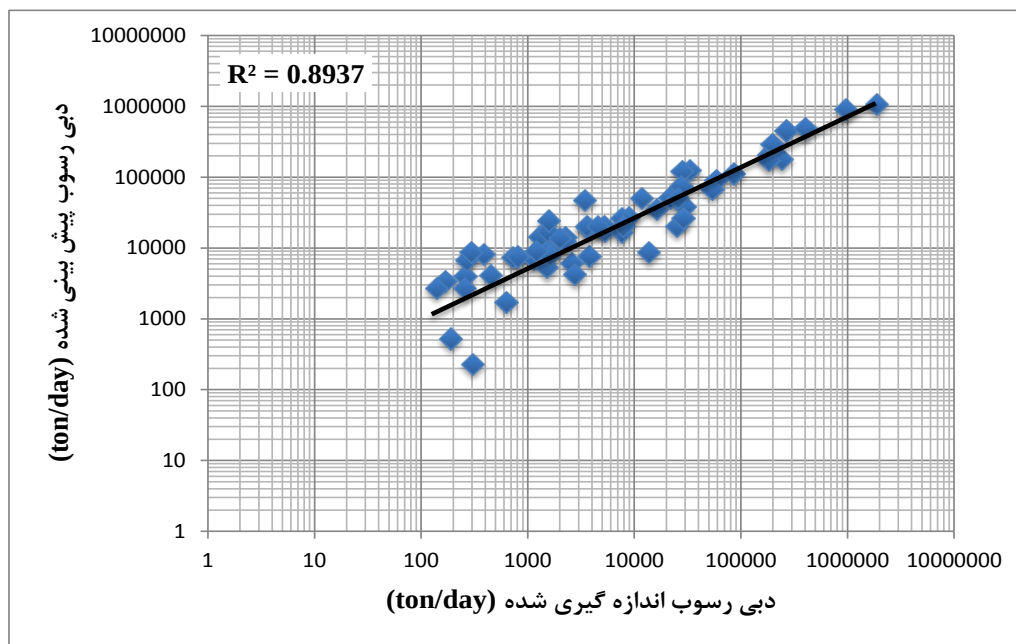
نتایج موید برتری الگوی چهارم با ورودی دبی جریان روزانه، دبی جریان روزانه با یک گام تاخیر زمانی، ارتفاع باران متناظر و ارتفاع باران با یک مرحله تاخیر زمانی، با داشتن بیشترین ضرایب همبستگی برابر با ۰/۹۶ و ۰/۸۹۳۷، بیشترین توابع برازش برابر با ۸۳۹/۴۷۴ و ۷۳۶/۵۴۵ و کمترین خطا برابر با (ton/day) ۱۱۲۰۰۰ و RMSE= ۴۶۳۰۰ به ترتیب در مراحل آموزش و آزمون می‌باشد.

نتایج موفق این ترکیب به‌ویژه در بخش آزمون نشان داد که الگوی مذکور با دقت بیشتر و خطای کم‌تری بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای پل را پیش‌بینی کرده است.

نمودارهای ترکیب فوق، در شکل‌های (۲۰-۴) و (۲۱-۴) نشان داده شده است.



شکل (۲۰-۴) - نمودار اجرای ترکیب چهارم سناریوی دوم GEP برای ایستگاه هیدرومتری پای پل در مرحله آموزش



شکل (۴-۲۱)- نمودار اجرای ترکیب چهارم سناریوی دوم GEP برای ایستگاه هیدرومتری پای پل در مرحله آزمون

جدول (۴-۲۱)- مقادیر ثابت در بیان درختی سناریوی دوم مدل پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای پل

G3C1	G3C0	G2C1	G2C0	G1C1	G1C0
۲/۳۲۳۱۵	۲/۳۵۲۰۲	-۲/۰۷۶۷۵۱	-۴/۸۳۴۷۱۹۸	۱/۱۹۳۱۱۵	۲/۷۹۲۳۲۸

ساختار ORF ژن‌های مدل برتر به زبان کاروا، در زیر نشان داده شده است:

$$+.*.-.Atan.+3Rt.-.*.-.d2.d0.d2.d0.d0.d2.d0.d2.d0.c1.d3$$

+

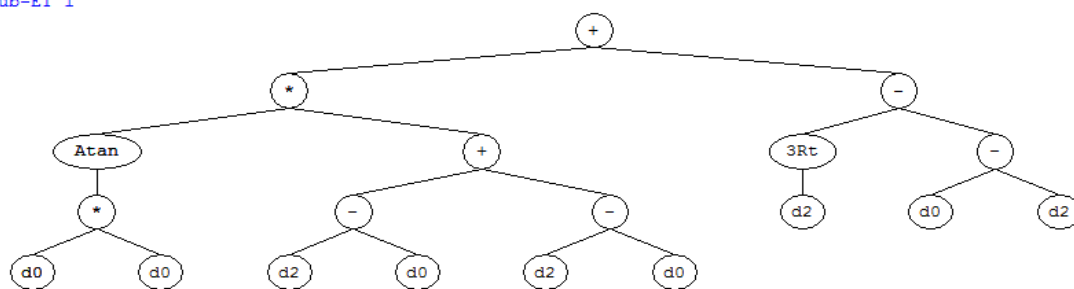
$$Sqrt.X2.X3.*.Sin.*.d1.Sqrt.Sin.+c1.d3.d0.d3.d0.c0.d2.d3.d2.c0.d3$$

+

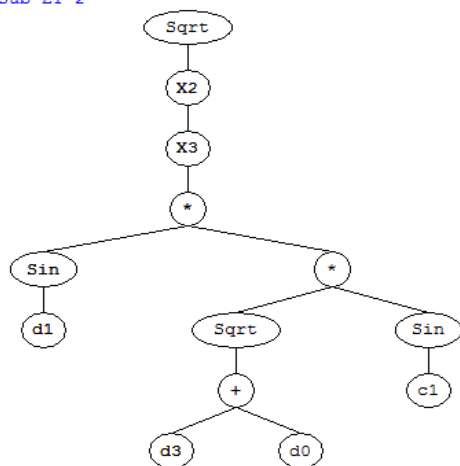
$$Sqrt.X2.X3.*.Sqrt.Sin.d0.+.+Cos.c1.d2.c0.c1.d2.d3.d0.d3.c0.c1.d0$$

در ادامه، بیان درختی ترکیب فوق نشان داده شده است. در این ساختار، d_0 ، d_1 ، d_2 و d_3 به ترتیب عبارت از دبی جریان روزانه، دبی جریان روزانه با یک گام تاخیر، ارتفاع باران متناظر و ارتفاع باران یک-مرحله قبل می باشد.

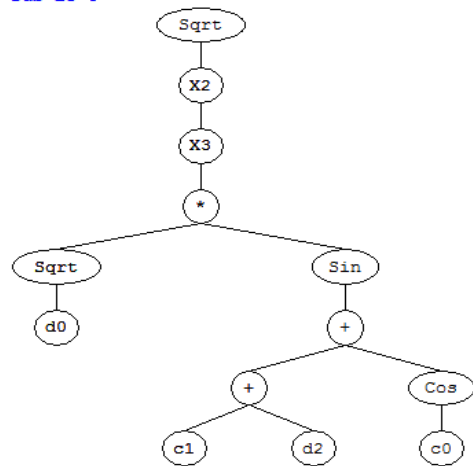
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



شکل (۴-۲۲)- بیان درختی ژن‌های ۱، ۲ و ۳ در سناریوی دوم پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای‌پل

در جدول (۲۲-۴) نتایج برتر سناریوی دوم هر دو ایستگاه نشان داده شده است.

جدول (۲۲-۴) - نتایج برازش سناریوی دوم GEP بر روی داده‌های رسوب هر دو ایستگاه در مرحله آزمون

ایستگاه	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
جلوگیر	۰/۹۰	۴۲۵۰۰	۱۷۹۰۰
پای‌پل	۰/۸۹۳۷	۱۱۲۰۰۰	۳۵۴۰۰

نتایج جدول نشان می‌دهد سناریوی دوم با بهره‌گیری از ارتفاع باران متناظر در پیش‌بینی بار رسوب معلق، با ضرایب همبستگی بالا برابر با ۰/۹۰ و ۰/۸۹۳۷، و خطاهای نسبتاً کم معادل با (ton/day) $RMSE = 42500$ و $RMSE = 112000$ (ton/day) به‌ترتیب برای ایستگاه‌های هیدرومتری جلوگیر و پای‌پل، از توانایی و کارآمدی خوبی در پیش‌بینی بار رسوب معلق برخوردار است.

۴-۵-۳- انتخاب سناریوی برتر و آنالیز حساسیت^۱

در ادامه، الگوهای برگزیده هر دو سناریو، برای ایستگاه‌های هیدرومتری جلوگیر و پای‌پل مقایسه و آنالیز حساسیت مدل برتر نیز انجام شده است. آنالیز حساسیت، تاثیرات معنی‌دار هر یک از پارامترهای مستقل ورودی را بر روی پارامتر وابسته دبی رسوب، تعیین می‌کند.

۴-۵-۳-۱- ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

به منظور تعیین بهترین رابطه GEP در پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر، نتایج مطلوب دو سناریو مقایسه شد. در جدول (۴-۲۳) نتایج اجرای ترکیب سوم سناریوی اول با ورودی دبی جریان روزانه و دبی جریان با یک گام تاخیر زمانی، با ترکیب اول سناریوی دوم با ورودی دبی جریان روزانه و ارتفاع باران متناظر نشان داده شده است.

جدول (۴-۲۳)- نتایج بهینه سناریوی اول و دوم GEP برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

سناریو	مرحله اجرا	مقدار تابع برازش	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
۱	آموزش	۷۶۳/۴۸۴	۰/۹۱	۶۷۸۰۰	۲۴۴۰۰
	آزمون	۶۸۶/۸۵۵	۰/۸۷	۵۱۲۰۰	۱۹۵۰۰
۲	آموزش	۷۶۸/۲۱	۰/۹۳	۶۲۴۰۰	۲۴۲۰۰
	آزمون	۷۴۰/۰۶	۰/۹۰	۴۲۵۰۰	۱۷۹۰۰

نتایج بیان‌گر برتری سناریوی دوم در برآورد بار رسوب معلق این ایستگاه می‌باشد. این سناریو، با دارا بودن بیشترین ضرایب همبستگی برابر با ۰/۹۳ و ۰/۹۰، بیشترین توابع برازش برابر با ۷۶۸/۲۱ و ۷۴۰/۰۶، و کمترین خطا برابر با $RMSE = 62400$ (ton/day) و $RMSE = 42500$ (ton/day) در مراحل آموزش و آزمون، دقت بالاتر و خطای کمتری را در پیش‌بینی بار رسوب معلق دارد. در جدول (۴-۲۴) نتایج ترکیب مذکور با ترکیب سوم از سناریوی اول مقایسه شده است.

جدول (۴-۲۴) - درصد افزایش یا کاهش شاخص‌های آماری در بهترین حالت سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول

مرحله اجرا	R^2	RMSE	MAE
آموزش	۲/۲ درصد افزایش	۸ درصد کاهش	۰/۸ درصد کاهش
آزمون	۳/۵ درصد افزایش	۱۷ درصد کاهش	۸ درصد کاهش

نتایج جدول فوق نیز نشان داد سناریوی دوم با افزایش ۲/۲ درصدی و ۳/۵ درصدی ضرایب همبستگی و کاهش ۸ درصدی و ۱۷ درصدی جذر میانگین مربعات خطا، به ترتیب در مراحل آموزش و آزمون، بر سناریوی اول برتری دارد. لذا این مدل، به عنوان مدل بهینه انتخاب شد و دو پارامتر دبی جریان روزانه (Q_d) و ارتفاع باران متناظر (R) به عنوان پارامترهای مستقل تعریف شدند. لذا به منظور آنالیز حساسیت مدل، الگوی مورد نظر یکبار بدون ارتفاع باران و بار دیگر بدون دبی جریان روزانه اجرا گردید که نتایج آن در جدول (۴-۲۵) نشان داده شده است.

جدول (۴-۲۵) - آنالیز حساسیت پارامترهای مستقل ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

روش	مرحله اجرا	R^2	RMSE	MAE
GEP بدون R	آموزش	۱۲ درصد کاهش	۳۹ درصد افزایش	۳/۳ درصد افزایش
	آزمون	۴۲ درصد کاهش	۱۷۳ درصد افزایش	۷۶ درصد افزایش
GEP بدون Q_d	آموزش	۸۹ درصد کاهش	۲۴۱ درصد افزایش	۲۲۴ درصد افزایش
	آزمون	۹۱ درصد کاهش	۱۹۴ درصد افزایش	۲۰۲ درصد افزایش

اعداد جدول نشان می‌دهد که عدم استفاده از آمار دبی جریان روزانه، کاهش ۸۹ درصدی و ۹۱ درصدی ضرایب همبستگی و افزایش بیش از ۱۰۰ درصدی خطا را در بخش‌های آموزش و آزمون به مدل انتخابی پیش‌بینی بار رسوب معلق تحمیل می‌نماید. لذا این پارامتر مهم‌ترین و موثرترین پارامتر مستقل می‌باشد و بیشترین تاثیرات را در برآورد دبی رسوب معلق دارد.

۴-۵-۳-۲- ایستگاه هیدرومتری پای‌پل

نتایج هر دو ترکیب در جدول (۴-۲۶) گردآوری گردیده است.

جدول (۴-۲۶) - نتایج بهینه سناریوی اول و دوم GEP برای ایستگاه هیدرومتری پای پل

سناریو	مرحله اجرا	مقدار تابع برازش	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
۱	آموزش	۷۹۲/۶۲۳	۰/۹۳۳۴	۶۳۵۰۰	۲۲۹۰۰
	آزمون	۶۶۶/۹۶۷	۰/۸۴۷۳	۱۳۸۹۸۷	۳۷۰۰۰
۲	آموزش	۸۳۹/۴۷۴	۰/۹۶۳۵	۴۶۳۰۰	۱۶۵۰۰
	آزمون	۷۳۶/۵۴۵	۰/۸۹۳۷	۱۱۲۰۰۰	۳۵۴۰۰

نتایج جدول نشان می‌دهد ترکیب برتر سناریوی دوم با ورودی دبی جریان روزانه، ارتفاع باران متناظر، دبی جریان با یک گام تاخیر زمانی و ارتفاع باران یک مرحله قبل، با ضرایب همبستگی برابر با ۰/۹۶۳۵ و ۰/۸۹۳۷، توابع برازش برابر با ۸۳۹/۴۷۴ و ۷۳۶/۵۴۵ و خطای معادل با $RMSE = 46300$ (ton/day) و $RMSE = 112000$ (ton/day) به ترتیب در مراحل آموزش و آزمون، بر مدل برگزیده سناریوی اول با ورودی دبی جریان روزانه و دبی جریان با یک گام تاخیر زمانی، برتری دارد. مقایسه کمی بین نتایج هر دو ترکیب در جدول (۴-۲۷) ارائه گردیده است.

جدول (۴-۲۷) - درصد افزایش یا کاهش شاخص‌های آماری در بهترین حالت سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول

مرحله اجرا	R^2	RMSE	MAE
آموزش	۲/۸ درصد افزایش	۲۷ درصد کاهش	۲۸ درصد کاهش
آزمون	۵/۵ درصد افزایش	۱۹/۵ درصد کاهش	۴/۳ درصد کاهش

همان‌طوری که از نتایج جدول مشخص است، سناریوی دوم با افزایش ۲/۸ درصدی و ۵/۵ درصدی ضرایب همبستگی، و کاهش ۲۷ درصدی و ۱۹/۵ درصدی جذر میانگین مربعات خطا به ترتیب در مراحل آموزش و آزمون، بر سناریوی اول ارجحیت دارد و سبب افزایش دقت و کاهش خطا در پیش‌بینی بار رسوب معلق می‌گردد، لذا نتایج آنالیز حساسیت مدل مذکور در جدول (۴-۲۸) نشان داده شده است.

جدول (۴-۲۸) - آنالیز حساسیت پارامترهای مستقل ایستگاه هیدرومتری پای پل

روش	مرحله اجرا	R^2	RMSE	MAE
GEP بدون Q_d	آموزش	۹۲ درصد کاهش	۴۱۷ درصد افزایش	۴۳۲ درصد افزایش
	آزمون	۹۷ درصد کاهش	۲۲۷ درصد افزایش	۲۴۱ درصد افزایش
GEP بدون Q_{d-1}	آموزش	۱۸ درصد کاهش	۱۳۳ درصد افزایش	۱۸۰ درصد افزایش
	آزمون	۲۷ درصد کاهش	۲۲۷ درصد افزایش	۱۹۰ درصد افزایش
GEP بدون R	آموزش	۲۳ درصد کاهش	۱۶۵ درصد افزایش	۱۶۳ درصد افزایش
	آزمون	۳۶ درصد کاهش	۱۰۴ درصد افزایش	۸۱ درصد افزایش
GEP بدون R-1	آموزش	۱۶ درصد کاهش	۱۳۳ درصد افزایش	۱۶۰ درصد افزایش
	آزمون	۲۱ درصد کاهش	۶۳ درصد افزایش	۶۴ درصد افزایش

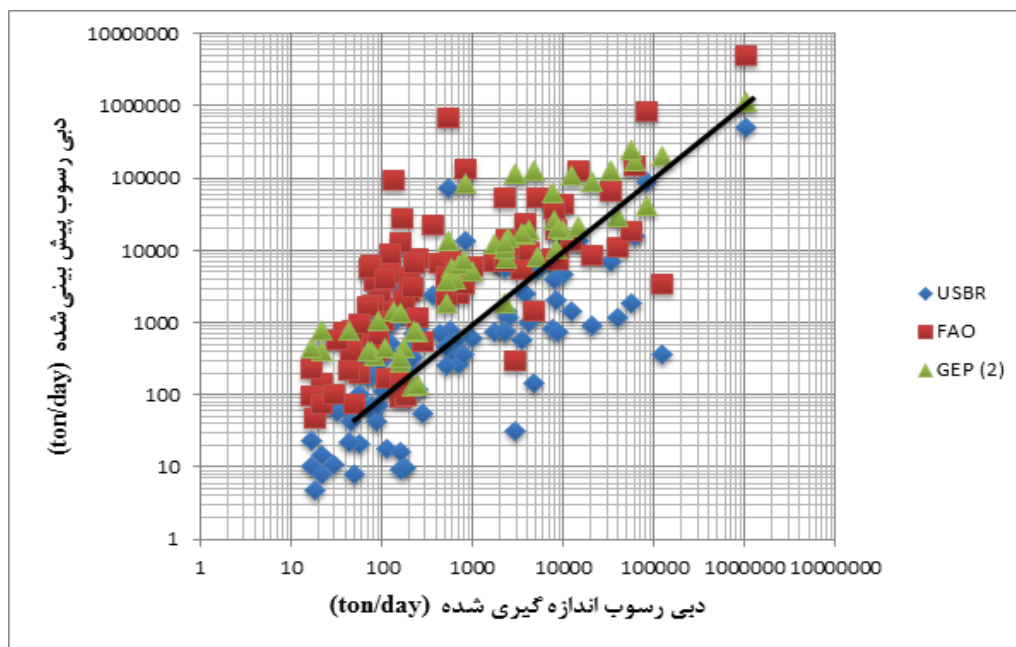
با توجه به نتایج جدول، پارامتر دبی جریان روزانه، موثرترین پارامتر در برآورد دبی رسوب معلق می‌باشد و حذف این پارامتر از مدل برآورد بار رسوب معلق، سبب کاهش ۹۲ درصدی و ۹۷ درصدی ضرایب همبستگی و افزایش بیش از ۲۰۰ درصدی خطا در هر دو مرحله آموزش و آزمون می‌شود. پس از آن پارامتر دبی جریان یک گام قبل، با تاثیر بالاتر بر افزایش خطا در رتبه دوم و پارامترهای ارتفاع باران

متناظر و ارتفاع باران با یک مرحله تاخیر زمانی، در رتبه‌های بعدی اهمیت قرار دارند. واضح است که پارامتر ارتفاع باران با یک گام تاخیر زمانی، کم تاثیرترین پارامتر بر دبی رسوب می‌باشد.

۴-۶- انتخاب رابطه نهایی

۴-۶-۱- ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

با هدف تعیین رابطه نهایی پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر، نتایج اجرای روش-های منحنی سنج رسوب، فائو و سناریوی دوم برنامه‌ریزی بیان زن در جدول (۴-۲۹) ارائه گردیده است. هم‌چنین، به‌منظور مقایسه سه روش مذکور، نتایج اجرای سه مدل در بخش آزمون در شکل (۴-۲۳) نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۳)- نتایج بخش آزمون مدل‌های USBR، FAO و سناریوی دوم GEP

جدول (۴-۲۹) - نتایج مدل‌های USBR، FAO و سناریوی دوم GEP

مدل	مرحله اجرا	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
USBR	آموزش	۰/۵۴۳۳	۲۴۱۱۱۲	۷۵۴۱۰
	آزمون	۰/۵۱۲۲	۴۸۱۳۵۴	۲۹۷۰۰۲
FAO	آموزش	۰/۵۴۳۳	۲۵۶۸۸۵	۱۰۶۰۹۰
	آزمون	۰/۵۱۲۲	۵۸۲۷۶۳	۴۵۲۶۱۲
GEP	آموزش	۰/۹۳	۶۲۴۰۰	۲۴۲۰۰
	آزمون	۰/۹۰	۴۲۵۰۰	۱۷۹۰۰

نتایج به‌خوبی نشان می‌دهند روش برنامه‌ریزی بیان ژن، علاوه بر دارا بودن ضرایب همبستگی بالا برابر با ۰/۹۳ و ۰/۹۰، از خطای بسیار کمی در مقایسه با دو روش منحنی سنج رسوب و فائو برخوردار می‌باشد. به‌منظور مقایسه کمی میزان افزایش دقت و کاهش خطای این روش، نتایج در جدول (۴-۳۰) نشان داده شده است.

جدول (۴-۳۰) - میزان افزایش دقت و کاهش خطای روش GEP نسبت به روش‌های USBR و FAO

روش	مرحله اجرا	R ²	RMSE	MAE
USBR	آموزش	۷۱ درصد افزایش	۷۴ درصد کاهش	۶۸ درصد کاهش
	آزمون	۷۵ درصد افزایش	۹۱ درصد کاهش	۹۴ درصد کاهش
FAO	آموزش	۷۱ درصد افزایش	۷۶ درصد کاهش	۷۷ درصد کاهش
	آزمون	۷۵ درصد افزایش	۹۲ درصد کاهش	۹۶ درصد کاهش

نتایج جدول فوق افزایش ۷۱ درصدی و ۷۵ درصدی ضرایب همبستگی و کاهش بیشتر از ۵۰ درصدی خطا را در هر دو بخش آموزش و آزمون در مقایسه با روش‌های منحنی سنج رسوب و فائو نشان می‌دهد. بنابراین، این روش به‌عنوان روش مطلوب انتخاب گردید. با توجه به نمودار درختی شکل (۴-۱۷)، رابطه ریاضی GEP برای پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر به‌صورت زیر می‌باشد:

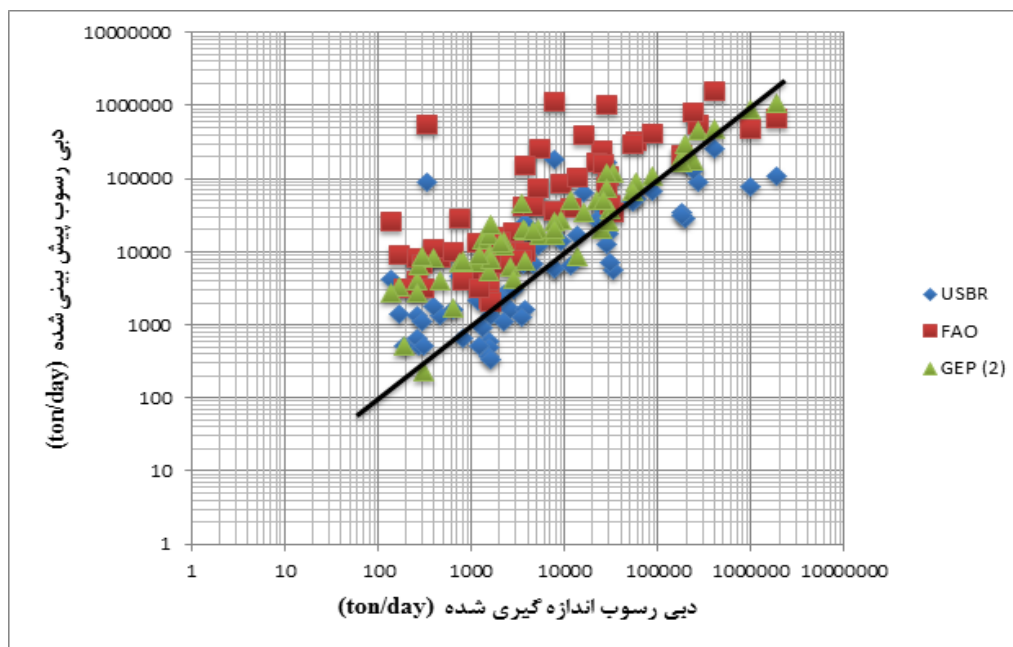
$$Q_s = (((Q_d - R) + (Q_d - R)) - ((R^2) \times \sqrt{R})) + ((\log((Q_d - 9.15039)) \times \log \sqrt{7.069671}) \times ((Q_d - 9.15039) + (Q_d - R))) + ((\sin((-8.576782) + Q_d) - (Q_d \times (-1.23056))) \times (Q_d \times Q_d^{\frac{1}{3}})) \quad (۷-۴)$$

در رابطه فوق، Q_d دبی جریان روزانه و R ارتفاع باران متناظر است.

۴-۶-۲- ایستگاه هیدرومتری پای‌پل

در شکل (۴-۲۴)، نمودار اجرای هر سه روش USBR، FAO و ترکیب مطلوب سناریوی دوم GEP، در بخش آزمون نمایش داده شده است و در ادامه، در جداول (۴-۳۱) و (۴-۳۲)، به مقایسه کمی نتایج و

افزایش یا کاهش میزان دقت و خطای مدل GEP در مقایسه با روش‌های USBR و FAO پرداخته شده است.



شکل (۴-۲۴) - نتایج بخش آزمون مدل‌های USBR، FAO و سناریوی دوم GEP

جدول (۴-۳۱) - نتایج مدل‌های USBR، FAO و سناریوی دوم GEP

مدل	مرحله اجرا	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
USBR	آموزش	۰/۵۹۸۲	۲۷۹۳۰۶	۱۲۰۵۳۷
	آزمون	۰/۴۱۱	۵۹۳۲۵۰	۴۹۰۳۳۶
FAO	آموزش	۰/۵۹۸۲	۳۵۹۵۴۲	۱۷۵۴۳۶
	آزمون	۰/۴۱۱	۷۴۳۵۱۷	۷۲۹۶۲۱
GEP	آموزش	۰/۹۶	۴۶۳۰۰	۱۶۵۰۰
	آزمون	۰/۸۹۳۷	۱۱۲۰۰۰	۳۵۴۰۰

نتایج جدول فوق، به‌خوبی موید برتری روش GEP بر دو روش متداول و مرسوم منحنی سنج رسوب و فائو، در برآورد بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای‌پل می‌باشد. ضرایب همبستگی برابر با ۰/۹۶ و ۰/۸۹۳۷ در بخش‌های آموزش و آزمون در مقایسه با ضرایب همبستگی برابر با ۰/۵۹۸۲ و ۰/۴۱۱ مربوط به مراحل آموزش و آزمون روش‌های منحنی سنج رسوب و فائو، حاکی از توانمندی روش برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی بار رسوب معلق می‌باشد. در جدول زیر، سه روش مذکور مقایسه شده‌اند.

جدول (۴-۳۲) - میزان افزایش دقت و کاهش خطای روش GEP نسبت به روش‌های USBR و FAO

روش	مرحله اجرا	R ²	RMSE	MAE
USBR	آموزش	۶۰ درصد افزایش	۸۳/۵ درصد کاهش	۸۶/۳ درصد کاهش
	آزمون	۱۱۷ درصد افزایش	۶۰ درصد کاهش	۷۱ درصد کاهش
FAO	آموزش	۶۰ درصد افزایش	۸۷ درصد کاهش	۹۰/۵ درصد کاهش
	آزمون	۱۱۷ درصد افزایش	۸۵ درصد کاهش	۹۵ درصد کاهش

اعداد جدول فوق، به روشنی بیان گر برتری روش برنامه‌ریزی بیان ژن بر روش‌های منحنی سنجه رسوب و فائو می‌باشند. روش برنامه‌ریزی بیان ژن، با ۶۰ درصد و ۱۱۷ درصد افزایش در ضرایب همبستگی و کاهش چشم‌گیر میزان خطا بیش از ۵۰ درصد در هر دو مرحله آموزش و آزمون، دقت برآورد بار رسوب معلق را افزایش داد. بنابراین، رابطه نهایی در پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای‌پل، به صورت رابطه (۴-۸) تعریف گردید:

$$Q_s = ((\text{Arc tan}(Q_d \times Q_d) \times (R - Q_d) + (R - Q_d))) + ((R^{\frac{1}{3}}) - (Q_d - R)) + \sqrt{((\sin(Q_d - 1) \times \sqrt{(R - 1) + Q_d}) \times ((\sin(-2.076751))^3)^2 + \sqrt{((\sqrt{Q_d}) \times ((\sin(2.32315 + (R - 1) + \cos(2.35202)))^2)^3} \quad (4-8)$$

در رابطه فوق Q_d دبی جریان روزانه، Q_{d-1} دبی جریان با یک گام تاخیر زمانی، R ارتفاع باران متناظر و $R-1$ ارتفاع باران یک مرحله قبل می‌باشد.

نتایج نهایی هر دو ایستگاه نشان داد که برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد بار رسوب معلق از برتری چشم‌گیری در مقایسه با روش‌های متداول منحنی سنج رسوب و فائو برخوردار است. همچنین نتایج موفق این روش در بخش آزمون موید توانایی GEP در تعمیم و مدل‌سازی مسایل غیر خطی مهندسی رودخانه از جمله تعیین بار رسوبی می‌باشد. این نتیجه با نتایج پژوهش محققانی از جمله آیتک و کیسی (۲۰۰۸)، زکریا و همکاران (۲۰۱۰)، گوون و ارسین تالو (۲۰۱۰)، عظمت الله و همکاران (۲۰۱۱) و کیسی و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و

ارائه پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر از روش‌های منحنی سنج رسوب و فائو در برآورد بار رسوب معلق دو ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و پای‌پل واقع در بالادست سد مخزنی کرخه استفاده شد و نتایج با نتایج روش برنامه‌ریزی بیان ژن، به‌عنوان روشی تکاملی و نوین در مسایل مهندسی آب، مقایسه گردید. به این منظور، اطلاعات مربوط به دبی جریان روزانه و دبی رسوب مربوط به هر دو ایستگاه مربوط به سال‌های آماری ۱۳۹۰-۱۳۴۷ و آمار ارتفاع باران متناظر نیز، متعلق به سال‌های آماری ۱۳۹۰-۱۳۶۵ از سازمان آب و برق خوزستان جمع‌آوری شد. لذا به‌دلیل در دسترس نبودن اطلاعات باران سال‌های ۱۳۶۵-۱۳۴۷، از آمار دبی جریان و دبی رسوب این سال‌ها نیز صرف‌نظر گردید و اطلاعات ۲۶ ساله موجود، مورد بررسی قرار گرفت. ۸۰ درصد اطلاعات برای بخش آموزش مدل‌ها و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای بخش آزمون و صحت سنجی در نظر گرفته شد. در روش برنامه‌ریزی بیان ژن، دو سناریو برای برآورد بار رسوب معلق تعریف گردید. نخست، تنها از اطلاعات دبی جریان روزانه و دبی رسوب و ترکیب این دو پارامتر با تاخیرهای زمانی به-عنوان ورودی مدل استفاده شد. در سناریوی دوم به‌منظور بررسی تاثیر ارتفاع باران در پیش‌بینی و برآورد بار رسوب معلق، ارتفاع باران متناظر نیز به‌همراه دبی جریان روزانه و دبی رسوب معلق و ترکیب این پارامترها با تاخیرهای زمانی مورد استفاده قرار گرفت. برای هر یک از ایستگاه‌ها، مقادیر پارامترهای برنامه‌ریزی بیان ژن تعیین گردیدند. لذا در ایستگاه هیدرومتری جلوگیر، مدل GEP با استفاده از ۳ ژن، ۳۰ کروموزوم و اندازه سر برابر با ۸ اجرا شد، همین مقادیر با اندازه سر برابر با ۱۰ در ایستگاه هیدرومتری پای‌پل مورد مطالعه قرار گرفتند. در نهایت، پس از برآورد بار رسوب معلق به‌کمک هر سه روش، نتایج نشان داد:

- ۱- ضرایب همبستگی روش منحنی سنج رسوب به‌ترتیب در مراحل آموزش و آزمون برابر با ۰/۵۴۳۳، ۰/۵۱۲۲ برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و ۰/۵۹۸۲ و ۰/۴۱۱ برای ایستگاه

هیدرومتری پای پل می‌باشد. این نتایج بیان‌گر ناتوانی این روش در برآورد بار رسوب معلق می‌باشد. همچنین خطای بالای این روش‌ها برابر با $RMSE = 241112 \text{ (ton/day)}$ و $RMSE = 481354 \text{ (ton/day)}$ برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و $RMSE = 279306 \text{ (ton/day)}$ و $RMSE = 593250 \text{ (ton/day)}$ متعلق به ایستگاه هیدرومتری پای پل، دلیل دیگری بر ناتوانی این روش در پیش‌بینی بار رسوب معلق با دقت بالا و خطای کم می‌باشد.

۲- نتایج برآورد بار رسوب معلق با استفاده از روش فائو نیز نشان داد ضرایب همبستگی پایین در مراحل آموزش و آزمون، به‌ترتیب برای ایستگاه‌های هیدرومتری جلوگیر و پای پل برابر با $0/5433$ ، $0/5122$ و $0/411$ به‌دلیل ضعف این روش در برآورد بار رسوب معلق می‌باشد. همچنین خطای بالای $RMSE = 256885 \text{ (ton/day)}$ و $RMSE = 582763 \text{ (ton/day)}$ برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و $RMSE = 359542 \text{ (ton/day)}$ و $RMSE = 743517 \text{ (ton/day)}$ برای ایستگاه هیدرومتری پای پل نیز موید دیگری بر عدم اطمینان این رابطه در پیش‌بینی بار رسوب معلق هر دو ایستگاه می‌باشد.

۳- روش برنامه‌ریزی بیان‌زن برای هر دو ایستگاه و در هر دو سناریو، نتایج قابل قبول و موفقی را از خود نشان داد. نتایج سناریوی اول ایستگاه هیدرومتری جلوگیر با ضرایب همبستگی برابر با $0/91$ و $0/87$ و برای ایستگاه هیدرومتری پای پل برابر با $0/9334$ و $0/8473$ ، به‌ترتیب در مراحل آموزش و آزمون نشان داد روش مذکور توانایی برآورد بار رسوب معلق را به‌خوبی داراست. خطاهای مربوط به بخش‌های آموزش و آزمون نیز معادل با $RMSE = 67800 \text{ (ton/day)}$ و $RMSE = 51200 \text{ (ton/day)}$ برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و $RMSE = 51200 \text{ (ton/day)}$

RMSE= ۶۳۵۰۰ و RMSE= ۱۳۸۹۸۷ (ton/day) متعلق به ایستگاه هیدرومتری پای پل،

قابلیت و کارایی این روش را در تعمیم رابطه به فضای مشاهده نشده نشان می‌دهد.

۴- در سناریوی دوم، علاوه بر ترکیب دبی جریان روزانه و دبی رسوب، از آمار مربوط به ارتفاع باران نیز در ورودی مدل استفاده شد. نتایج این سناریو برای هر دو ایستگاه موید تاثیر ارتفاع باران در برآورد بار رسوب معلق، افزایش دقت و کاهش خطای برآورد می‌باشد. ضرایب همبستگی بالا برابر با ۰/۹۳ و ۰/۹۰ برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر، و ۰/۹۶ و ۰/۸۹۳۷ برای ایستگاه هیدرومتری پای پل، به ترتیب مربوط به بخش‌های آموزش و آزمون، بیان‌گر دقت بالای این سناریو در پیش-بینی بار رسوب معلق هر دو ایستگاه می‌باشد. میزان خطا برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر برابر با RMSE= ۶۲۴۰۰ (ton/day) و RMSE= ۴۲۵۰۰ (ton/day) و برای ایستگاه هیدرومتری پای پل نیز برابر با RMSE= ۴۶۳۰۰ (ton/day) و RMSE= ۱۱۲۰۰۰ (ton/day) محاسبه شد و نشان داد این سناریو با ضرایب همبستگی بالا و خطای نسبتاً کم در مقایسه با دو روش منحنی سنج رسوب و فائو، روشی مطمئن در برآورد بار رسوب معلق به شمار می‌آید.

۵- مقایسه نتایج دو سناریو برای هر دو ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه نشان داد سناریوی دوم با افزایش ۳/۵ درصدی ضریب همبستگی و کاهش ۱۷ درصدی خطای RMSE مربوط به ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و همچنین افزایش ۵/۵ درصدی ضریب همبستگی و کاهش ۱۹/۵ درصدی خطای RMSE متعلق به ایستگاه هیدرومتری پای پل مربوط به بخش آزمون، سبب افزایش دقت و کاهش خطای پیش‌بینی بار رسوب معلق شده و بر سناریوی اول برتری دارد. از دیگر برتری‌های

این سناریو استفاده هم‌زمان از دو پارامتر هیدرولیکی دبی جریان روزانه و پارامتر هیدرولوژیکی ارتفاع باران متناظر است.

۶- پارامترهای دبی جریان روزانه و ارتفاع باران متناظر به‌عنوان پارامترهای مستقل در رابطه برآورد بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیری و پارامترهای دبی جریان روزانه، دبی جریان با یک گام تاخیر زمانی، ارتفاع باران متناظر و ارتفاع باران یک گام قبل، پارامترهای مستقل در رابطه برآورد بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای‌پل تعیین شدند. نتایج آنالیز حساسیت هر دو ایستگاه نشان داد پارامتر دبی جریان روزانه موثرترین پارامتر در برآورد بار رسوب معلق می‌باشد.

۵-۲- پیشنهادات

به‌منظور افزایش دقت در تعیین بار رسوب معلق پیشنهاد می‌گردد:

۱- روش‌های هوشمند مانند برنامه‌ریزی بیان ژن، سیستم استنتاجی تطبیقی - عصبی فازی، شبکه عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان و دیگر الگوریتم‌های تکاملی در برآورد بار رسوب معلق به‌کار گرفته شوند.

۲- در برآورد بار رسوب معلق، علاوه بر دبی جریان روزانه از ارتفاع باران متناظر نیز بهره گرفته شود. این امر به‌سبب استفاده از دو پارامتر هیدرولیکی و هیدرولوژیکی، خود موجب افزایش دقت برآورد و کارآمدی رابطه خواهد گردید. همچنین پیشنهاد می‌شود به‌منظور افزایش دقت، تاثیر دیگر پارامترهای هواشناسی از جمله دما، ساعات آفتابی و سرعت باد نیز در پیش‌بینی بار رسوب معلق به‌کار گرفته شود.

۳- به دلیل تاثیر دبی‌های سیلابی در برآورد بار رسوب معلق، تعداد نمونه برداری‌ها در مواقع سیلاب و به هنگام جریان سیلابی رودخانه افزایش یابد. همچنین پیشنهاد می‌شود سازمان‌های متولی نمونه برداری از دبی جریان روزانه، دبی رسوب و ثبت ارتفاع باران، عملیات نمونه برداری و ثبت داده‌ها را به طور همزمان انجام دهند.

پیوست

جدول علايم و اختصارات

پارامتر	تعريف	واحد
Q_d	دبي جريان روزانه	مترمكعب بر ثانيه
Q_s	دبي رسوبات	تن بر روز
C	غلظت رسوبات	ميلي گرم بر ليتر
R	ارتفاع باران	ميلي متر
ET	بيان درختي	-

منابع

فهرست منابع

- ۱- اقبالی پ.، دانش فراز ر. و ثاقبیان س. م.، (۱۳۹۲) "شبیه‌سازی روند توسعه زمانی ابعاد حفره آب‌شستگی اطراف آب‌شکن بال‌دار با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژنی" **نشریه دانش آب و خاک**، شماره ۱، جلد ۲۳، ۱۷۷-۱۸۸.
- ۲- البرزی م.، (۱۳۸۸) **"الگوریتم ژنتیک"** چاپ اول، انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ص ۱۳، ۱۴، ۲۷.
- ۳- اوژن م.، مهدوی م.، خلیقی سیگارودی ش. و حمزه حق‌آبی ا.، (۱۳۸۹) "مقایسه روش‌های امتداد منحنی سنج دبی به‌منظور برآورد دبی‌های متناظر با اشل حداکثر" **مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی علوم آب و خاک**، شماره ۵۴، دوره ۱۴، ۲۵-۱۷.
- ۴- ایزدبخش م.ع.، اسلامیان س.س. و موسوی س.ف.، (۱۳۸۰) "مدل‌های برآورد حداکثر دبی میانگین روزانه با برخورداری از ویژگی‌های فیزیوگرافیک برای حوزه‌های آبریز غرب ایران" **علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی**، شماره دوم، جلد پنجم، ۱۲-۱.
- ۵- باغبان‌پور ش. و کاشفی‌پور س.م.، (۱۳۹۱) "مدل‌سازی عددی انتقال رسوب غیرچسبنده در رودخانه‌ها (مطالعه موردی : رودخانه کرخه)" **مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی علوم آب و خاک**، شماره ۶۱، دوره ۱۶، ۵۷-۴۵.
- ۶- بایزیدی م.، ثقفیان ب. و سی و سه مرده م.، (۱۳۹۱) "شبیه‌سازی و تحلیل زمانی - مکانی خشکسالی هواشناسی در حوزه‌های آبریز کارون، کرخه و دز" **پژوهش‌های آبخیزداری**، شماره ۹۵، ۶۴-۵۵.
- ۷- بختیاری ع.ل.، رحمانشاهی زهابی م.، یوسفی ب. و شیرواند عمرویی ر.، (۱۳۹۰) "ارزیابی روش‌های برآورد بار رسوب کل در رودخانه کرخه" **دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران**، دانشگاه گیلان.

- ۸- بهرامی ح. و صمدی بروجنی ح.، (۱۳۸۴) "بررسی توزیع زمانی رسوب ورودی به سدهای استان خوزستان" اولین همایش مدیریت رسوب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۹- بینا م.، رنجبران ل. و موسوی جهرمی س.ح.، (۱۳۸۸) "برآورد رسوبات معلق با استفاده از پارامترهای فیزیوگرافیک در بالادست سد کرخه" هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۱۰- پرهت ج. و دومیری گنجی م.، (۱۳۸۴) تحلیل روابط آورد رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه هنديجان - جراحی، سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، تهران.
- ۱۱- پور اغنیايي م.ج.، گنجی م.، یوسف‌پور ا. و قرمز چشمه ب.، (۱۳۸۶) "مروری بر روش‌های برآورد بار معلق (مطالعه موردی : حوضه آبریز صیدون)" **مجله تحقیقات منابع آب ایران**، سال ۳، شماره ۳، ۷۵-۷۳.
- ۱۲- تلوری ع.، (۱۳۸۲) "ارتباط بین بار رسوبی معلق و برخی خصوصیات حوضه در زیرحوضه‌های رودخانه‌های دز و کرخه در استان لرستان" **پژوهش و سازندگی**، شماره ۵۵، ۶۱-۵۶.
- ۱۳- حاجی علی گل ز.، کاشفی‌پور س.م. و بیت الله‌پور چهارمحالی ا.، (۱۳۸۷) "استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد دبی رسوب ورودی به سد مخزنی کرخه" **هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران**، دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور.
- ۱۴- حمادی ک. و نوذریان ل.، (۱۳۸۵) "پیشنهاد یک روش آماری به‌منظور اصلاح رابطه دبی آب - دبی رسوب و محاسبه بار رسوبی معلق" **هفتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه**، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۱۵- حیدری خ.، منصوری ع. و رزم‌خواه ا.، (۱۳۹۱) "ارزیابی آورد رسوب بار معلق حوضه آبریز کرخه با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی دومین همایش ملی عمران و توسعه پایدار"، **موسسه آموزش عالی آزاد خاوران**، مشهد.

- ۱۶- خسروپور ح. و بنی‌هاشمی م.ع.، (۱۳۸۷) "بررسی رسوب‌گذاری در مخزن سد کرخه با استفاده از مدل عددی و ارائه راهکارهایی برای مدیریت رسوب‌گذاری در مخزن"، دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برقابی، تهران.
- ۱۷- خلج م.، (۱۳۹۰)، پایان‌نامه ارشد "روندیابی سیلاب رودخانه با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک و موج دینامیکی" دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی کرمانشاه.
- ۱۸- داداش‌زاده اصل ف.، محسنی ساروی م.، احمدی ح. و وروانی ج.، (۱۳۸۸) "ارزیابی و توسعه منحنی‌های سنجه رسوب در برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی (منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز قره‌چای)" پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، شماره ۸۴، ۳۵-۲۸.
- ۱۹- ذرتی‌پور م.، دهان‌زاده ب.، ظهیری ع. و هوشمندزاده م.، (۱۳۸۹) "شبیه‌سازی رسوب‌گذاری در مخزن سد کرخه با استفاده از مدل کامپیوتری GSTARS-3" پیام مهندس، شماره ۵۳، سال ۱۱، ۱۷-۹.
- ۲۰- زنگانه م.ا.، مساعدی ا.، مفتاح هلقی م. و دهقانی ا.ا.، (۱۳۸۸) "مناسب‌ترین روش برآورد دبی انتقال رسوبات معلق (مطالعه موردی ایستگاه ارازکوسه واقع در حوضه گرگان‌رود"، ICWR.
- ۲۱- سلاجقه ع.، رضوی‌زاده س.، خراسانی ن.، حمیدی‌فر م. و سلاجقه س.، (۱۳۹۰) "تغییرات کاربری اراضی و آثار آن بر کیفیت آب رودخانه (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کرخه)" محیط‌شناسی، شماره ۵۸، سال ۳۷، ۸۶-۸۱.
- ۲۲- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، (۱۳۸۰) "خلاصه مطالعات مرحله اول طرح کرخه" وزارت نیرو، چاپ اول، انتشارات اکسیر، ص ۳، ۶، ۲۸-۲۷، ۳۲-۳۱.
- ۲۳- شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۰.
- ۲۴- شفای بجستان م.، (۱۳۸۷) "مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب" انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ص ۲۳۷.

- ۲۵- صادقی س.ح.ر.، (۱۳۸۴) "تهیه معادلات سنجه رسوب در شاخه‌های بالارونده و پایین‌رونده آبنگار با استفاده از مفهوم رگرسیون" **تحقیقات منابع آب ایران**، شماره ۱، دوره ۱، ۱۰۳-۱۰۱.
- ۲۶- صمدی بروجنی ح.، زمانیان م. و حسین‌پور ف.، (۱۳۹۲) "برآورد رسوب‌دهی سالانه رودخانه‌ها با استفاده از روش نسبت‌ها" **فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آب و آبیاری**، شماره ۱۱، سال ۳، ۴۶-۳۵.
- ۲۷- طرازکار م.ح. و صدق‌آمیز ع.، (۱۳۸۰) "مقایسه پیش‌بینی دبی جریان ماهانه رودخانه کرخه با استفاده از روش‌های سری زمانی و هوش مصنوعی" **پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی**، شماره ۸۰، ۵۸-۵۱.
- ۲۸- ظهیری ع.، ماکنالی‌زاده ه.، دهان‌زاده ب. و طرفی ص.، (۱۳۸۸) "برآورد حجم رسوب معلق ورودی به مخزن سد کرخه"، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز.
- ۲۹- عرب‌خدری م.، حکیم‌خانی ش. و وروانی ج.، (۱۳۸۳) "اعتبار روش‌های برون‌یابی در برآورد میانگین رسوبدهی معلق سالانه (۱۷ ایستگاه هیدرومتری کشور)" **مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی**، شماره ۳، سال ۱۱، ۱۳۲-۱۲۳.
- ۳۰- عرب‌خدری م.، (۱۳۸۴) "بررسی رسوبدهی معلق حوضه‌های آبخیز ایران" **مجله تحقیقات منابع آب ایران**، شماره ۲، سال ۱، ۶۰-۵۱.
- ۳۱- غفاری گ.، کریمی‌زاده ک. و طباطبایی‌زاده م.، (۱۳۸۸) "تعیین مناسب‌ترین روش جهت برآورد رسوب معلق در ایستگاه‌های بالادست حوضه سد لتیان و طالقان"، هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۳۲- قمشی م. و ترابی‌پوده ح.، (۱۳۸۱) "ارزیابی کاربرد معادله‌های برآورد بار رسوبی در رودخانه‌های خوزستان" **علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی**، شماره ۱، جلد ۶، ۲۹-۱۳.

۳۳- کالوندی س.م.، خداشناس س.ر.، قهرمان ب.، طهماسبی ر. و بوستانی ا.، (۱۳۸۹) "آنالیز روش‌های مختلف منحنی سنج در برآورد رسوب ورودی به سدها (مطالعه موردی سد دوستی)" **فصلنامه علمی**

پژوهشی آبیاری و آب، شماره ۱، سال ۱، ۲۰-۱۰.

۳۴- کریمی دمنه ر. و امامقلی‌زاده ص.، (۱۳۹۲) "برآورد ضریب هوادهی دریچه تخلیه‌کننده تحتانی سدها با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی" دوازدهمین همایش سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۳۵- کیا ع. و عمادی ع.، (۱۳۹۱) "مقایسه روش‌های مختلف رگرسیون آماری در برآورد بار رسوب معلق دراز مدت سالانه (مطالعه موردی: بابل‌رود)" پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، شماره ۷، سال ۴، ۲۷-۱۵.

۳۶- لطیفی ا. و حسن‌زاده ی.، (۱۳۸۵) "مقایسه روش‌های مختلف برآورد بار رسوب معلق رودخانه‌ها و انتخاب بهترین روش (مطالعه موردی: رودخانه گاماسیاب)" هفتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳۷- مساعدی ا.، محمدی ا. و حسین‌علیزاد م.ه.، (۱۳۸۵) "انتخاب مناسب‌ترین روش برآورد رسوب معلق در ایستگاه هیدرومتری قزاقلی" هفتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳۸- مساعدی ا.، هاشمی نجفی س.ف.، حیدرئزاد م.، نبی‌زاده م. و مشکاتی م.ا.، (۱۳۸۸) "برآورد حجم رسوب‌گذاری در مخازن سدهای کرج و دز و مقایسه آن با نتایج هیدروگرافی" **مجله پژوهش‌های**

حفاظت آب و خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، شماره ۲، دوره ۱۶، ۲۷۲-۲۶۱.

۳۹- مطیع قادر ح.، لطفی ش. و سید اسفهلان م.م.، (۱۳۸۹) "مروری بر برخی از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند" چاپ اول، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر، تبریز، ص ۱۷ و ۱۹.

۴۰- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور.، (۱۳۸۱) "راهنمای تعیین عمق فرسایش و روش‌های مقابله با آن در محدوده پایه‌های پل" **نشریه شماره ۲۶۰**.

۴۱- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، (۱۳۸۶) "راهنمای مطالعات فرسایش و رسوب در

ساماندهی رودخانه‌ها" نشریه شماره ۳۸۳.

۴۲- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، (۱۳۹۱) "راهنمای محاسبه بار رسوب معلق و

بستر رودخانه" نشریه شماره ۵۹۰.

۴۳- مهدوی م، (۱۳۸۸) "هیدرولوژی کاربردی" جلد دوم، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۴۴۲.

۴۴- میرزایی م، (۱۳۸۰) "مقایسه روش‌های آماری برآورد بار رسوب در رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه

گرگان‌رود)" پایان‌نامه ارشد، دانشگاه تهران.

۴۵- ناصری ملکی م. و کاشفی‌پور س.م، (۱۳۹۲) "شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان و پارامترهای کیفی در

سیستم رودخانه کرخه با استفاده از مدل FASTER" مجله پژوهش آب ایران، شماره ۱۳، سال ۷،

۱۲۱-۱۲۹.

۴۶- وروانی ج. و خلیقی ش، (۱۳۸۶) "بررسی میزان خطای منحنی‌های سنج رسوب برای برآورد بار

رسوبی وقایع سیلابی در رودخانه قره‌چای" یافته‌های نوین کشاورزی، شماره ۳، دوره ۱، ۲۰۱-۲۱۴.

47- Aytek A. and Kisi O., (2008) "A genetic programming approach to suspended sediment modeling" **Journal of Hydrology**, 351 (3-4), 288-298.

48- Azamathulla H.Md., Deo M.C. and Deolalikar P.B., (2008) "Alternative neural networks to estimate the scour below spillways" **Advances in Engineering Software**, 39 (8), 689-698.

49- Azamathulla H.Md., Ab.Ghani A., Leow Ch.S., Chang Ch.K. and Zakaria N.A., (2011) "Gene-Expression programming for the development of a stage-discharge curve of the Pahang river" **Water Resour Manage**, 25, 2901-2916.

- 50- Azamathulla H.Md., (2012) “Gene expression programming for prediction of scour depth downstream of sills” **Journal of Hydrology**, Vol. 460-461,156-159.
- 51- Azamathulla H.Md. and Ahmad Z., (2012) “Gene-Expression programming for transverse mixing coefficient” **Journal of Hydrology**, Vol. 434-435, 142-148.
- 52- Azamathulla H.Md. and Haque A.A.M., (2012) “Prediction of scour depth at culvert outlet using Gene-Expression programming” **International Journal of Innovative Computing, Information Control**, 7(8), 5045-5054.
- 53- Azamathulla H.Md. and Jarrett R.D., (2013) “Use of Gene-Expression Programming to Estimate Manning’s Roughness Coefficient for High Gradient Streams” **Water Resour Manage**, 27, 715-7129.
- 54- Bateni S.M., Borghei S.M. and Jeng D.-S., (2007) “Neural network and neuro fuzzy assessments for scour depth around bridge piers” **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 20 (3), 401-414.
- 55- Billi p. and Badri Ali o., (2010) “Sediment transport of the Blue Nile at Khartoum” **Quaternary International**, 226 (1-2), 12-22.
- 56- Crawford C.G., (1991) “Estimation of suspended sediment rating curves and mean suspended sediment load” **Journal of Hydrology**, 129 (1-4), 331-348.
- 57- Diodato N., Gericke A. and Bellocchi G., (2012) “Modeling the inter-annual variability of sediment yields: A case study for the upper Leach river” **Catena**, 97, 12-19.
- 58- Emamgholizadeh S., (2012) “Neural network modeling of scour cone geometry around outlet in the pressure flushing” **Global NEST Journal**, 4, Vol. 14, 540-549.

- 59- Emamgholizadeh S., Kashi H., Marofpoor I. and Zalaghi E., (2014) "Prediction of water quality parameters of Karoon River (Iran) by artificial intelligence-based models" **International Journal of Environmental Science and Technology**, 3 (11), 645-656.
- 60- Ferreira C., (2001) "Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems" **Complex Systems**, 13 (2), 87-129.
- 61- Ferreira C., (2001) "Gene Expression Programming in Problem Solving" WSC6 tutorial, Chile.
- 62- Ferreira C., (2004) "Gene expression programming and the evolution of computer programs" **Recent Developments in Biologically Inspired Computing**, 82-103.
- 63- Ferreira C., (2006) "Automatically defined functions in gene expression programming" **Genetic Systems Programming: Theory and Experiences**, Vol. 13, 21-56.
- 64- Guven A. and Aytek A., (2009) "A new approach for stage-discharge relationship: Gene expression programming" **Journal of Hydrologic Engineering**, 14 (8), 812-820.
- 65- Guven A. and Ersin Talu N., (2010) "Gene expression programming for estimating suspended sediment yield in middle Uuphrates basin" **Clean-Soil, Air, Water**, 38 (12), 1159-1168.
- 66- Guven A. and Kisi O., (2011) "Estimation of suspended sediment yield in natural rivers using Machine-Coded linear genetic programming" **Water Resour Manage**, 25, 691-704.
- 67- Hashmi M.Z., Shamseldin A.Y. and Melville B.W., (2011) "Statistical downscaling of watershed precipitation using Gene expression programming (GEP)" **Environmental Modeling & Software**, 26, 1639-1646.

- 68- Haddadchi A., Movahedi N., Vahidi E. and Dehghani A.A., (2013) "Evaluation of suspended load transport rate using formulas and artificial neural network models (Case study: Chelchay Catchment)" **Journal of Hydrodynamics**, 25 (3), 459-470.
- 69- Harrington S.T. and Harrington J.R., (2013) "An assessment of suspended sediment rating curve approach for load estimation on the Rivers Bandon and Owenabue, Ireland" **Geomorphology**, 185, 27-38.
- 70- Kakaei Lafdani E., Moghaddam Nia A. and Ahmadi A., (2013) "Daily suspended sediment load prediction using artificial neural networks and support vector machines" **Journal of Hydrology**, 478, 50-62.
- 71- Kisi O., Hosseinzadeh Dalir A., Cimen M. and Shiri J., (2012) "Suspended sediment modeling using genetic programming and soft computing techniques" **Journal of Hydrology**, 450-451, 48-58.
- 72- Kisi O. and Shiri J., (2012) "River suspended sediment estimation by climatic variables implication: Comparative study among soft computing techniques" **Computers & Geosciences**, 43, 73-82.
- 73- Kisi O., Shiri J. and Tombul M., (2013) "Modeling rainfall-runoff process using soft computing techniques" **Computers & Geosciences**, 51, 108-117.
- 74- Lopes H.S. and Weinert W.R., (2004) "EGYPSIS: An enhanced gene expression programming approach for symbolic regression problems" **Journal of Applied Mathematics and Computer Science**, 14 (3), 375-384.
- 75- Moharana S. Khatua K.K., (2014) "Prediction of roughness coefficient of a meandering open channel flow using Neuro-Fuzzy Inference System" **Measurement**, 51, 112-123.
- 76- Moussa Y.A.M., (2013) "Modeling of local scour depth downstream hydraulic structures in trapezoidal channel using GEP and ANNs" **Ain Shams Engineering Journal**, 4, 717-722.

- 77- Nagy H.M., Watanabe K. and Hirano M., (2002) “Estimation of sediment load concentration in rivers using artificial neural network model” **J Hydraulic Eng ASCE**, 128 (6), 588-595.
- 78- Palmieri A., Shah F., W.Annandale G. and Danier A., (2003) “Reservoir Conservation” Vol. 1, The Rescon Approach, P.9.
- 79- Riad S. and Mania J., (2004) “Rainfall-Runoff model using an artificial neural network approach” **Mathematical and Computer Modeling**, 40, 839-846.
- 80- Roushangar K., Vojoudi Mehrabani F. and Shiri J., (2014) “Modeling river total bed material load discharge using artificial intelligence approaches (based on conceptual inputs)” **Journal of Hydrology**, 514, 114-122.
- 81- Sinnakaudan S.K., Sulaiman M.S. and Teoh S.H., (2010) “Total bed material load equation for high gradient rivers” **Journal of Hydro-environment Research**, 4 (3), 243-251.
- 82- Water Research Institute, (2000) “Sedimentation in the Reservoir of Large Dams in Iran” Ministry of Energy, P.6.
- 83- Wilson W.S., (2008) “Classifier conditions using gene expression programming” **IlliGAL report**, 4998, 206-217.
- 84- Yang C.T., Reza M. and Aalami M.T., (2009) “Evaluation of total load sediment transport using ANN” **Int J Sediment Res**, 24 (3), 274-286.
- 85- Zakaria N.A., Azamathulla H.Md., Chang Ch.K. and Ab.Ghani A., (2010) “Gene Expression Programming for Total Bed Material Load estimation- a case study” **Science of the Total Environment**, 408, 5078-5085.
- 86- Zhang W., Wei X., Zheng J., Zhu Y. and Zhang Y., (2012) “Estimating suspended sediment load in the Peral River Delta region using sediment rating curves” **Continental Shelf Research**, 38, 35-46.

Abstract

Estimation of suspended sediment load is an important factor in water engineering, hydraulic and environment. Several attempts have been made to determine the suspended sediment load accurately. Most of these attempts have been tried to relate the amount of sediment discharge to flow discharge for estimating the suspended sediment load. But these conventional regression methods have uncertainty. So, a number of researchers have been attempted to estimate the suspended sediment load by using intelligence methods such as artificial neural networks, adaptive neural fuzzy inference system and evolutionary algorithms. In this research, Gene Expression Programming (GEP) has been developed to predict the suspended sediment load of Jelogir and Payepol stations located in the upstream of Karkheh reservoir dam. The results have been compared to sediment rating curve and FAO methods results. To achieve this aim, daily stream flow, suspended sediment discharge and rain height corresponding from 1365-1390 were collected and used. So, 2 scenarios were defined for GEP performing. The first one has been performed by using daily stream flow and suspended sediment discharge data. The second one used the rain height information of catchment, too. The results showed that the second scenario was more accurate rather than the first one. The comparison results of test period indicated that the GEP has decreased the root mean square error (RMSE) and mean absolute error (MAE) around 91% and 94% for Jelogir station and 60% and 71% for Payepol station in relation to USBR results. Also, the results of test period denoted that GEP has decreased the RMSE and MAE around 92% and 96% for Jelogir station and 85% and 95% for Payepol station compared by FAO results.

Keywords: Payepol station, Jelogir station, Suspended sediment load, Gene expression programming, Karkheh River.



Shahrood University of Technology

Faculty of Agriculture

Department of Water & Soil

**Use of Gene-Expression Programming to predict the suspended
sediment load of Karkheh dam**

Razieh Karimi Demneh

**Supervisor:
Dr. Samad Emamgholizadeh**

**Co-Supervisor:
Dr. Khalil Azhdary**

Sepetember 2014