

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده کشاورزی
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های آبی

مدل‌سازی دبی - اشل و دبی - دبی رسوب رودخانه هراز با استفاده از مدل‌های
GEP و MARS

نگارنده

علیرضا رنجبر

استاد راهنما

دکتر صمد امامقلی زاده

استاد مشاور

راضیه کریمی دمنه

بهمن ۱۳۹۵

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی کشاورزی

گروه: آب و خاک

به شماره دانشجویی: ۹۳۰۸۶۱۴

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای علیرضا رنجبر

تحت عنوان: مدل سازی دبی- اشل و دبی- دبی رسوب رودخانه هراز با استفاده از مدل های

GEP و MARS

در تاریخ ۱۳۹۵/۱۱/۱۲ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	راضیه کریمی دمنه		دکتر صمد امامقلی زاده

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر مهدی دلقندی		دکتر خلیل اژدری
			دکتر زهرا گنجی نوری

تقدیم به

مقدس ترین واژه مادر لغت نامه دلم

به پدرم به استواری کوه

به او که نمی دانم از بزرگی اش بگویم یا مردانگی و سخاوتش

مادر مهربانم به زلالی چشمه

به او که هستی من زبستی اوست. تا هستم، دارمش دوست. غم کسار جاودان، چشمه سار مهربانی

که زندگیم میون مهر و عطفوت آن هست.

دیگانه خواهر و برادرم، که شیرینی های زندگیم وابسته به آن هست.



شکر و قدردانی

پاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش را بنمونان شد و به بهشتینی رحروان علم و دانش مفتخران نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزی ان ساخت. بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه می او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بکاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، پاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تا این می کند و سلامت امانت بانی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عز و جل"

استاد کرامیم جناب آقای دکتر محمد امانعلی زاده بسیار سپاسگزارم چرا که بدون راهنمایی های ایشان تا این پایان نامه بسیار مشکل می نمود.

تعهد نامه

اینجانب **علیرضا رنجبر** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **سازه های آبی** دانشکده مهندسی کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مدلسازی دبی- اشل و دبی- دبی** رسوب رودخانه هراز با استفاده از مدل‌های **MARS** و **GEP** تحت راهنمایی دکتر **صمد امامقلی** زاده متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد

چکیده

تعیین بار رسوبات معلق رودخانه‌ها از جمله مهم‌ترین موارد در مهندسی آب، هیدرولیک و محیط‌زیست به شمار می‌رود. لذا تأثیر زیادی بر طراحی و مدیریت سازه‌های آبی دارد. از جمله مشکلات ناشی از فرسایش و رسوب‌گذاری، از بین رفتن اراضی حاصل از کشاورزی، پر شدن مخازن سدها و کانال‌های آبیاری است. اندازه‌گیری دائمی دبی جریان کاری مشکل و وقت‌گیر است. این کار در مواقع سیلابی سخت‌تر می‌شود. لذا با برقراری رابطه دبی - اشل می‌توان دبی جریان رودخانه را تخمین زد. تاکنون تلاش‌های مختلف و فراوانی برای پیش‌بینی دقیق بار رسوبات معلق صورت گرفته است. اکثر این تلاش‌ها با برقراری رابطه بین دبی رسوب و دبی جریان، برای برآورد دبی رسوب صورت گرفته است. اما این روش‌های متداول رگرسیونی مانند منحنی سنجه رسوب و فائو دارای عدم قطعیت می‌باشند. از این رو، بسیاری از محققان به روش‌های هوشمند مانند شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج تطبیقی - عصبی فازی و الگوریتم‌های تکاملی روی آورده‌اند. در تحقیق حاضر به منظور پیش‌بینی دبی رسوب معلق و دبی جریان ایستگاه هیدرومتری کره‌سنگ آمل واقع بر رودخانه هراز، روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و MARS توسعه داده شد و نتایج با نتایج روش‌های منحنی سنجه رسوب، فائو و رگرسیون خطی مقایسه گردید. برای ورودی مدل‌ها از اطلاعات دبی جریان، ارتفاع سطح آب و دبی رسوب این ایستگاه، متعلق به سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۴۳ جمع‌آوری شد و مورد بررسی قرار گرفت. پژوهش حاضر در دو بخش انجام شد. در بخش اول اطلاعات دبی جریان، ارتفاع سطح آب و دبی رسوب به‌عنوان ورودی برای پیش‌بینی دبی رسوب به مدل‌ها معرفی شدند. در بخش دوم اطلاعات دبی جریان و ارتفاع سطح آب به‌عنوان ورودی مدل‌ها معرفی شدند و رابطه بین دبی جریان و ارتفاع سطح آب برقرار شد. با مقایسه‌ای که بین نتایج به‌دست‌آمده صورت گرفت، بررسی پارامترهای آماری شامل ضریب همبستگی (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و متوسط میانگین خطا (MAE) مشخص شد که روش برنامه‌ریزی بیان ژن و MARS نسبت به روش‌های دیگر برای پیش‌بینی برتری قابل توجهی داشته‌اند. هم‌چنین از بررسی نتایج مشخص شد که روش MARS در بخش اول و دوم در مرحله آموزش بهترین عملکرد و روش برنامه‌ریزی بیان ژن در مرحله آزمون بهترین عملکرد را ارائه کردند.

کلمات کلیدی: دبی - اشل، بار رسوب معلق، رودخانه هراز، برنامه‌ریزی بیان ژن، مارس

مقالات مستخرج از پایان نامه:

"برآورد میزان رسوبات معلق رودخانه هراز آمل با استفاده از روش USBR، FAO و رگرسیون خطی" پانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، آذر ۹۵، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ه) قزوین

"مدل‌سازی دبی - دبی رسوب رودخانه هراز آمل با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)"، پنجمین همایش علمی پژوهشی مدیریت جامع آب، مهر ۹۵، کرمان

فهرست مطالب

۱	فصل اول : کلیات
۲	۱-۱- تعریف مسئله
۵	۲-۱- روش انجام تحقیق
۶	۱-۲-۱- روش اداره عمران اراضی ایالات متحده (USBR)
۶	۲-۲-۱- روش فائو (FAO)
۶	۳-۲-۱- برنامه‌ریزی بیان ژن
۸	۴-۲-۱- مدل مارس
۹	۳- اهداف و نوآوری تحقیق
۱۰	۴-۱- سازماندهی پایان‌نامه
۱۱	فصل دوم : پیشینه تحقیق
۱۲	۱-۲- مقدمه
۱۲	۱-۱-۲- اشکال و روش‌های برآورد رسوب
۱۴	۲-۱-۲- عوامل موثر بر الگوی رسوب‌گذاری
۱۴	۳-۱-۲- تقسیم‌بندی براساس تعداد کلاس‌های اندازه رسوب
۱۴	۴-۱-۲- پیامدهای فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه‌ها
۱۵	۵-۱-۲- مدل‌های عمومی بررسی ریخت‌شناسی رودخانه
۱۵	۶-۱-۲- منحنی سنج‌دبی رسوب
۱۵	۷-۱-۲- کاربرد مدل‌های فیزیکی و ریاضی در مطالعات مهار رسوب
۱۶	۸-۱-۲- مدل ریاضی و اهداف مدل‌سازی آن در مهندسی رودخانه
۱۶	۲-۲- پیشینه تحقیق
۱۷	۱-۲-۲- پیشینه مطالعات بار رسوب
۲۲	۲-۲-۲- پیشینه مطالعات دبی-اشل
۲۳	۳-۲-۲- مطالعات پیشین بر روی رودخانه هراز آمل
۲۵	۴-۲-۲- پیشینه کاربرد روش‌های هوشمند در مهندسی آب
۲۸	۵-۲-۲- پیشینه کاربرد برنامه‌ریزی ژن
۳۳	۶-۲-۲- پیشینه کاربرد روش مارس
۳۵	فصل سوم : مواد و روش انجام تحقیق
۳۶	۱-۳- مقدمه

۳۷	..... ۲-۳- منطقه مورد مطالعه
۳۷	..... ۱-۲-۳- موقعیت جغرافیایی
۳۷	..... ۲-۲-۳- توپوگرافی
۳۸	..... ۳-۲-۳- مسیر و سرچشمه رودخانه هراز
۴۰	..... ۴-۲-۳- وضعیت هواشناسی و بارندگی حوضه
۴۱	..... ۳-۳- الگوریتم‌های تکاملی
۴۱	..... ۱-۳-۳- الگوریتم ژنتیک
۴۲	..... ۱-۱-۳-۳- عملگرهای الگوریتم ژنتیک (GA)
۴۲	..... ۲-۳-۳- برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)
۴۲	..... ۳-۳-۳- برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)
۴۳	..... ۱-۳-۳-۳- الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن
۴۴	..... ۲-۳-۳-۳- ساختار برنامه‌ریزی بیان ژن
۴۵	..... ۳-۳-۳-۳- ساختار افراد در GEP
۴۵	..... ۱-۳-۳-۳-۳- ORF و بیان درختی ژن‌ها
۴۷	..... ۲-۳-۳-۳-۳- ساختار ژنها در برنامه‌ریزی بیان ژن
۵۰	..... ۴-۳-۳-۳- تابع برازش
۵۰	..... ۴-۳- داده‌های مورد استفاده
۵۱	..... ۵-۳- مراحل اجرای مدل
۵۱	..... ۱-۵-۳- روش منحنی سنج رسوب (USBR)
۵۲	..... ۲-۵-۳- روش فائو (FAO)
۵۲	..... ۴-۵-۳- روش رگرسیون خطی چند متغیره
۵۳	..... ۵-۵-۳- برنامه‌ریزی بیان ژن
۵۳	..... ۱-۵-۵-۳- تعیین تابع برازش
۵۴	..... ۲-۵-۵-۳- انتخاب مجموعه پایانه‌ها و مجموعه توابع
۵۵	..... ۳-۵-۵-۳- انتخاب ساختار کروموزوم‌ها
۵۵	..... ۴-۵-۵-۳- انتخاب تابع پیوند
۵۷	..... ۵-۵-۵-۳- انتخاب عملگرهای ژنتیکی
۵۸	..... ۶-۵-۵-۳- الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن
۶۰	..... ۶-۵-۳- مدل مارس (MARS)
۶۰	..... ۱-۶-۵-۳- مقدمه مارس

۶۲	..... مدل سازی مجموعه داده ها
۶۳	..... هدف از متغیرهای دودویی
۶۴	..... شاخص های آماری سنجش مدل ها
۶۵	..... فصل چهارم : بحث و نتایج
۶۶	..... ۱-۴ مقدمه
۶۶	..... ۲-۴ پیش بینی دبی رسوب رودخانه هراز آمل
۶۷	..... ۱-۲-۴ روش منحنی سنج (USBR)
۷۰	..... ۲-۲-۴ روش فائو (FAO)
۷۲	..... ۳-۲-۴ روش رگرسیون خطی چند متغیره
۷۴	..... ۱-۳-۲-۴ حالت اول ترکیب ها
۷۶	..... ۲-۳-۲-۴ حالت دوم ترکیب ها
۷۹	..... ۳-۳-۲-۴ حالت سوم ترکیب ها
۸۱	..... ۴-۳-۲-۴ مقایسه ترکیب های برتر سه حالت ذکر شده برای رگرسیون خطی چند متغیره
۸۲	..... ۴-۲-۴ برنامه ریزی بیان ژن (GEP)
۸۵	..... ۱-۴-۲-۴ حالت اول ترکیب ها
۸۸	..... ۲-۴-۲-۴ حالت دوم ترکیب ها
۹۲	..... ۳-۴-۲-۴ حالت سوم ترکیب ها (حالتی که پارامترها نرمال شدند)
۹۷	..... ۴-۴-۲-۴ مقایسه ترکیب های برتر حالت های مورد بررسی در برنامه ریزی ژن (GEP)
۹۷	..... ۵-۲-۴ مدل مارس (MARS)
۹۹	..... ۱-۵-۲-۴ حالت اول ترکیب ها
۱۰۲	..... ۲-۵-۲-۴ حالت دوم ترکیب ها
۱۰۴	..... ۳-۵-۲-۴ حالت سوم (حالتی که پارامترها نرمال شدند)
۱۰۶	..... ۴-۵-۲-۴ جدول مقایسه ای ترکیب های برتر سه حالت استفاده شده در مدل مارس
۱۰۷	..... ۶-۲-۴ مقایسه ترکیب های برتر روش های مورد بررسی در بخش اول
۱۰۹	..... ۳-۴ بخش دوم برآورد دبی جریان رودخانه با برقرار کردن رابطه بین دبی جریان و اشل رودخانه
۱۰۹	..... ۱-۳-۴ روش رگرسیون خطی چند متغیره
۱۱۱	..... ۱-۱-۳-۴ حالت اول ترکیب ها
۱۱۳	..... ۲-۱-۳-۴ حالت دوم ترکیب ها
۱۱۵	..... ۳-۱-۳-۴ جدول مقایسه ای ترکیب های برتر دو حالت مورد بررسی در روش رگرسیون خطی
۱۱۵	..... ۲-۳-۴ برنامه ریزی بیان ژن

۱۱۷.....	۴-۳-۲-۱- حالت اول
۱۲۱.....	۴-۳-۲-۲- حالت دوم ترکیبها
۱۲۵.....	۴-۳-۲-۳- جدول مقایسه‌ای ترکیب‌های برتر دو حالت استفاده‌شده در روش GEP برای پیش‌بینی دبی جریان
۱۲۶.....	۴-۳-۳- روش مارس (MARS)
۱۲۶.....	۴-۳-۱- حالت اول ترکیبها
۱۲۸.....	۴-۳-۲- حالت دوم ترکیبها
۱۳۰.....	۴-۳-۳- مقایسه ترکیب‌های برتر دو حالت استفاده‌شده در روش MARS برای پیش‌بینی دبی جریان
۱۳۰.....	۴-۳-۳- مقایسه ترکیبات برتر روش‌های انجام‌شده پژوهش در بخش دوم
۱۳۳.....	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها
۱۳۴.....	۵-۱- نتیجه‌گیری
۱۳۷.....	۵-۲- پیشنهادات
۱۳۹.....	منابع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) اشکال مختلف انتقال مواد رسوبی در رودخانه..... ۱۳
- شکل (۱-۳) حوضه آبریز رودخانه هراز..... ۳۹
- شکل (۲-۳) ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری حوضه..... ۴۰
- شکل (۳-۳) نمودار درختی رابطه (۱-۳)..... ۴۶
- شکل (۴-۳) بیان درختی رابطه (۳-۳)..... ۴۸
- شکل (۵-۳) بیان درختی رابطه (۴-۳)..... ۴۹
- شکل (۶-۳) بیان درختی رابطه (۵-۳)..... ۴۹
- شکل (۷-۳) شماره ۱ کدگذاری سه ژن، شماره ۲ پیوند سه ژن که در آن تابع پیوند با رنگ تیره نشان داده شده است..... ۵۶
- شکل (۸-۳) الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن..... ۵۹
- شکل (۹-۳) مثالی از رگرسیون تکه‌ای خطی..... ۶۰
- شکل (۱-۴) نمودار دبی- دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری کره‌سنگ در مرحله آموزش..... ۶۸
- شکل (۲-۴) نمودار دبی- دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری کره‌سنگ در مرحله آزمون..... ۶۸
- شکل (۳-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از منحنی سنج رسوب در مرحله آموزش..... ۶۹
- شکل (۴-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از منحنی سنج رسوب در مرحله آزمون..... ۶۹
- شکل (۵-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از روش فائو در مرحله آموزش..... ۷۱
- شکل (۶-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از روش فائو در مرحله آموزش..... ۷۱
- شکل (۷-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۸ حالت اول در مرحله آموزش..... ۷۵
- شکل (۸-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۸ حالت اول در مرحله آزمون..... ۷۶
- شکل (۹-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۱۳ حالت دوم در مرحله آموزش..... ۷۸
- شکل (۱۰-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۱۳ حالت دوم در مرحله آزمون..... ۷۸
- شکل (۱۱-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۱۶ حالت سوم در مرحله آموزش..... ۸۰
- شکل (۱۲-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۱۶ حالت سوم در مرحله آزمون..... ۸۱
- شکل (۱۳-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۸ حالت اول در مرحله آموزش..... ۸۶
- شکل (۱۴-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۸ حالت اول در مرحله آزمون..... ۸۶
- شکل (۱۵-۴) بیان درختی ژن‌های ۱، ۲ و ۳ برای ترکیب ۸ حالت اول..... ۸۸
- شکل (۱۶-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۱۶ حالت دوم در مرحله آموزش..... ۹۰
- شکل (۱۷-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۱۶ حالت دوم در مرحله آزمون..... ۹۰
- شکل (۱۸-۴) بیان درختی ژن‌های ۱، ۲ و ۳ برای ترکیب ۱۶ حالت دوم..... ۹۲
- شکل (۱۹-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۱۶ حالت سوم در مرحله آموزش..... ۹۴
- شکل (۲۰-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۱۶ حالت سوم در مرحله آزمون..... ۹۴
- شکل (۲۱-۴) بیان درختی ژن‌های ۱، ۲ و ۳ برای ترکیب ۱۶ حالت سوم..... ۹۶

- شکل (۲۲-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۷ حالت اول در مرحله آموزش..... ۱۰۱
- شکل (۲۳-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۷ حالت اول در مرحله آزمون..... ۱۰۱
- شکل (۲۴-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۱۵ حالت دوم در مرحله آموزش..... ۱۰۳
- شکل (۲۵-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۷ حالت دوم در مرحله آزمون..... ۱۰۳
- شکل (۲۶-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۷ حالت سوم در مرحله آموزش..... ۱۰۵
- شکل (۲۷-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۷ حالت سوم در مرحله آموزش..... ۱۰۵
- شکل (۲۸-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۳ حالت اول در مرحله آموزش..... ۱۱۲
- شکل (۲۹-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۳ حالت اول در مرحله آزمون..... ۱۱۲
- شکل (۳۰-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۶ حالت دوم در مرحله آموزش..... ۱۱۴
- شکل (۳۱-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۶ حالت دوم در مرحله آزمون..... ۱۱۴
- شکل (۳۲-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۶ حالت اول در مرحله آموزش..... ۱۱۸
- شکل (۳۳-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۶ حالت اول در مرحله آزمون..... ۱۱۸
- شکل (۳۴-۴) بیان درختی ژنهای ۱، ۲ و ۳ برای ترکیب ۶ حالت اول..... ۱۲۰
- شکل (۳۵-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۶ حالت دوم در مرحله آموزش..... ۱۲۲
- شکل (۳۶-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۶ حالت دوم در مرحله آزمون..... ۱۲۲
- شکل (۳۷-۴) بیان درختی ژنهای ۱، ۲ و ۳ برای ترکیب ۶ حالت دوم..... ۱۲۴
- شکل (۳۸-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۵ حالت اول در مرحله آموزش..... ۱۲۷
- شکل (۳۹-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۵ حالت اول در مرحله آزمون..... ۱۲۸
- شکل (۴۰-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۵ حالت دوم در مرحله آموزش..... ۱۲۹
- شکل (۴۱-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده ترکیب ۵ حالت دوم در مرحله آزمون..... ۱۲۹

فهرست جداول

جدول (۱-۳)	بیشینه و کمینه و میانگین داده‌های جمع‌آوری شده.....	۵۰
جدول (۱-۴)	نتایج حاصل از برازش منحنی سنجه رسوب در مرحله آموزش و آزمون.....	۷۰
جدول (۲-۴)	نتایج حاصل از برازش رابطه فائو در مرحله آموزش و آزمون.....	۷۲
جدول (۳-۴)	ترکیبات ورودی به مدل.....	۷۳
جدول (۴-۴)	نتایج ترکیبات رگرسیون در حالت اول.....	۷۴
جدول (۵-۴)	نتایج ترکیبات رگرسیون در حالت دوم.....	۷۷
جدول (۶-۴)	نتایج ترکیبات رگرسیون در حالت سوم.....	۷۹
جدول (۷-۴)	مقایسه نتایج ترکیب برتر رگرسیون در سه حالت ذکر شده.....	۸۱
جدول (۸-۴)	مقادیر پارامترهای برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی بار رسوب معلق.....	۸۳
جدول (۹-۴)	ترکیبات ورودی به مدل.....	۸۳
جدول (۱۰-۴)	نتایج ترکیبات GEP در حالت اول.....	۸۵
جدول (۱۱-۴)	مقادیر ثابت در بیان درختی ترکیب ۸ حالت اول.....	۸۷
جدول (۱۲-۴)	نتایج ترکیبات GEP در حالت دوم.....	۸۹
جدول (۱۳-۴)	مقادیر ثابت در بیان درختی ترکیب ۱۶ حالت دوم.....	۹۱
جدول (۱۴-۴)	نتایج ترکیبات GEP حالت سوم.....	۹۳
جدول (۱۵-۴)	مقادیر ثابت در بیان درختی ترکیب ۱۶ حالت سوم.....	۹۵
جدول (۱۶-۴)	مقایسه نتایج ترکیب‌های برتر GEP در سه حالت ذکر شده.....	۹۷
جدول (۱۷-۴)	ترکیبات ورودی به مدل.....	۹۸
جدول (۱۸-۴)	نتایج ترکیبات مارس حالت اول.....	۱۰۰
جدول (۱۹-۴)	نتایج ترکیبات مارس حالت دوم.....	۱۰۲
جدول (۲۰-۴)	نتایج ترکیبات مارس حالت سوم.....	۱۰۴
جدول (۲۱-۴)	مقایسه نتایج ترکیب‌های برتر MARS در سه حالت ذکر شده.....	۱۰۶
جدول (۲۲-۴)	مقایسه ترکیبات برتر روش‌های مورد بررسی در بخش اول.....	۱۰۷
جدول (۲۳-۴)	میزان افزایش دقت و کاهش خطای روش مارس نسبت به دیگر روش‌ها در مرحله آموزش.....	۱۰۷
جدول (۲۴-۴)	میزان افزایش دقت و کاهش خطای روش برنامه‌ریزی ژن نسبت به دیگر روش‌ها در مرحله آزمون.....	۱۰۸
جدول (۲۵-۴)	ترکیبات ورودی به مدل.....	۱۰۹
جدول (۲۶-۴)	نتایج ترکیبات رگرسیونی در حالت اول.....	۱۱۰
جدول (۲۷-۴)	نتایج ترکیبات رگرسیونی در حالت دوم.....	۱۱۳
جدول (۲۸-۴)	مقایسه نتایج ترکیب‌های برتر رگرسیون خطی در دو حالت مورد بررسی.....	۱۱۴
جدول (۲۹-۴)	مقادیر پارامترهای برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی بار رسوب معلق.....	۱۱۵
جدول (۳۰-۴)	ترکیبات ورودی به مدل.....	۱۱۶
جدول (۳۱-۴)	نتایج ترکیبات GEP حالت اول.....	۱۱۷
جدول (۳۲-۴)	مقادیر ثابت در بیان درختی ترکیب.....	۱۱۹
جدول (۳۳-۴)	نتایج ترکیبات GEP حالت دوم.....	۱۲۱

- جدول (۴-۳۴) مقادیر ثابت در بیان درختی ترکیب ۶ حالت دوم..... ۱۲۳
- جدول (۴-۳۵) مقایسه نتایج ترکیب‌های برتر GEP در دو حالت ذکرشده..... ۱۲۵
- جدول (۴-۳۶) ترکیبات ورودی به مدل..... ۱۲۶
- جدول (۴-۳۷) نتایج ترکیبات MARS حالت اول..... ۱۲۷
- جدول (۴-۳۸) نتایج ترکیبات MARS حالت دوم..... ۱۲۸
- جدول (۴-۳۹) مقایسه نتایج ترکیب‌های برتر MARS در دو حالت ذکرشده..... ۱۳۰
- جدول (۴-۴۰) مقایسه ترکیبات برتر روش‌های انجام‌شده در بخش دوم..... ۱۳۱
- جدول (۴-۴۱) مقایسه روش مارس نسبت به روش رگرسیون خطی و برنامه‌ریزی بیان ژن در مرحله آموزش..... ۱۳۱
- جدول (۴-۴۲) مقایسه روش برنامه‌ریزی بیان ژن نسبت به روش رگرسیون خطی و مارس در مرحله آزمون..... ۱۳۲

فصل اول

کلیات

۱-۱- تعریف مسأله

امروزه علاوه بر رودخانه‌ها سایر منابع آبی نظیر آب‌های زیرزمینی، برای تأمین آب موردنیاز شرب، کشاورزی و صنعت مورد استفاده و بهره‌برداری واقع می‌شوند، اما همچنان رودخانه‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین و بزرگ‌ترین منبع در دسترس حائز اهمیت‌اند. به همین دلیل مطالعات و سرمایه‌گذاری‌های جهت بهره‌برداری بهینه، کنترل و حفظ این منابع انجام گرفته است. از جمله مواردی که در این راستا مورد توجه قرار گرفته‌اند، ذراتی هستند که از بستر و دیواره رودخانه‌ها جدا شده و به‌شکل بار معلق و بار بستر به حرکت درمی‌آیند که در اصطلاح ذرات رسوب نامیده می‌شوند، در سامانه‌های رودخانه‌ای باعث بروز مشکلاتی خواهد شد. از جمله ورود ذرات رسوبی به پمپ‌ها و آبگیرها، کاهش حجم مفید سدها و کانال‌ها اختلال در شبکه‌های انتقال و توزیع آب؛ علاوه بر موارد ذکرشده از آن‌جا که در بعضی از رودخانه‌ها، مخصوصاً در سال‌های اخیر، مجاری تخلیه فاضلاب به رودخانه‌ها وارد شده و مواد و آلاینده‌های شیمیایی به ذرات آب چسبیده و به شبکه‌های تأمین آب شرب و یا آب کشاورزی وارد می‌شوند، اهمیت مطالعه و تخمین بار رسوب در رودخانه‌ها دوچندان می‌شود (باغبان‌پور و همکاران، ۱۳۹۰).

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 به‌عنوان عنصر اصلی پیشرفت و رشد اقتصادی نمایان‌تر نموده است. بدیهی است با افزایش تقاضا در بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعت و شرب، مدیریت منابع تجدیدشونده با بحران روبه‌رو می‌گردد. از عوامل تأثیرگذار، 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، فرآیند رسوب‌گذاری را به‌عنوان یکی از چالش‌های جدی سازه‌های آب ایجاد می‌نماید (ماکنالی‌زاده، ۱۳۸۸). از جمله مهم‌ترین مشکلات ناشی از فرسایش و رسوب-

گذاری، از بین رفتن اراضی حاصل از کشاورزی، پر شدن مخازن سدها و کانال‌های آبیاری است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۱).

به‌منظور پیشرفت و توسعه فرهنگ و محیط‌زیست در مجاورت یک رودخانه آبرفتی، درک مسائل پایه انتقال رسوب برای حل مسائل مهندسی رودخانه، بلایای طبیعی یا سازه‌های دست‌ساز بشر ضرورت دارد. همان‌طور که گفته شد، پیش‌بینی میزان بار رسوبی رودخانه‌ها مورد توجه متخصصین هیدرولوژی، زمین‌شناسان و رسوب‌شناسی بوده است. میزان رسوبات ورودی به دهانه آبرگیرها یا کانال‌های آبیاری یا مخازن سدها سبب کاهش کارایی مفید، آبشستگی پایین‌دست، افزایش رقوم آب در بالادست و آسیب‌دیدگی تجهیزات می‌شود. تعیین دقیق حجم رسوب حمل شده توسط رودخانه در پروژه‌های مهندسی آب اهمیت ویژه‌ای دارد (کریمی دمنه و همکاران، ۱۳۹۲).

طبق گزارش بین‌المللی سدهای بزرگ^۱ (ICOLD)، بیش از ۴۰۰۰۰ سد بزرگ در دنیا با مجموع ظرفیت ذخیره‌سازی $700 (KM^3)$ به‌منظور ذخیره آب، کنترل سیلاب، آبیاری اراضی کشاورزی و تولید انرژی برقی وجود دارد. سالانه بر اثر رسوب‌گذاری در حدود ۱-۰/۵٪ از ظرفیت این سدها کاسته خواهد شد. لذا به‌منظور جبران ظرفیت ازدست‌رفته، بایستی همه‌ساله ۳۰۰-۴۰۰ سد بزرگ با ظرفیت مخزن ۱۵۰ میلیون مترمکعب ساخته شود 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 قرار گرفته است (پالمیری و همکاران، ۲۰۰۳). در ایران نیز، سالانه ۱-۰/۷۵٪ 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 یک‌سوم بارش‌های جهانی، توجه به مسئله حمل رسوب و پیش‌بینی آن توسط رودخانه‌ها به‌منظور حفظ و صیانت از منابع آبی و سرمایه‌های کشور ضروری به نظر می‌رسد.

¹ International Committee of Large Dams

مدل‌سازی و تخمین خصوصیات هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و فرآیندهای اکولوژیکی اهمیت انکارناپذیری در نگرش مدیریتی منابع آب، کنترل سیلاب و به‌طور عام در مدیریت سامانه‌های آبی دارد. از این رو، شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار رودخانه‌ها در برنامه‌ریزی‌ها و عملیات پروژه‌های کنترل منابع آب امری اساسی و ضروری می‌باشد. بدیهی است از دغدغه‌های پیش رو در این زمینه، ارائه تخمینی قابل اعتماد و دقیق از میزان جریان رودخانه‌هاست. اندازه‌گیری دائمی دبی رودخانه‌ها در ایستگاه‌های هیدرومتری به‌ویژه در مواقع سیلابی غالباً پرهزینه و مشکل می‌باشد، بدین منظور جهت مدل‌سازی رابطه دبی - اشل، مدل‌های ریاضی و هوشمند متعددی توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته‌اند (سلطانی و همکاران، ۱۳۸۸). همچنین با تعیین میزان رسوبات جمع‌شده می‌توان میزان بالا آمدن سطح آب را در مواقع سیلابی مشخص کرد. تعیین میزان بار رسوبات موضوعی غیر قطعی است. روش‌های متعددی برای این منظور گسترش یافته‌اند که همچنان دارای عدم قطعیت هستند (گوون و کیسی^۱، ۲۰۱۱). روش‌های متداول بر پایه روش‌های رگرسیونی به‌منظور تخمین ضرایب منحنی سنج رسوب توسعه داده شده‌اند که غالباً میزان رسوبات را بیشتر یا کم‌تر از میزان واقعی گزارش می‌کنند (آیتک و کیسی^۲، ۲۰۰۸). به همین منظور، تلاش‌های متعددی برای تعیین هرچه دقیق‌تر میزان بار رسوبات به‌کمک روش‌های نوین غیررگرسیونی صورت پذیرفته است که از آن میان می‌توان به استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی^۳ (ANN)، منطق فازی^۴ (FL) و الگوریتم ژنتیک^۵ (GA) اشاره کرد که طی دهه‌های اخیر به شکلی موفق پاسخ‌گوی مسائل مهندسی آب بوده‌اند (زکریا و همکاران، ۲۰۱۰). ازجمله مطالعاتی که پیش‌تر با GEP صورت گرفته است می‌توان به تعیین بار رسوبات معلق بخش میانی رودخانه فرات در ترکیه (گوون و ارسین تالو^۶، ۲۰۱۰) اشاره کرد.

¹ Guven & Kisi

² Aytak & Kisi

³ Artificial Neural Network

⁴ Fuzzy Logic

⁵ Genetic Algorithms

⁶ Ersin Talu

آمل در بخش‌های پرورش دام و طیور، ماهی پرورشی سردآبی و گرم‌آبی رتبه اول را در استان مازندران دارد و در بخش کشاورزی قطب کشاورزی استان و کشور است. سرپرست فرمانداری ویژه آمل با تأکید بر اینکه این شهرستان در زمینه صنعت با ۴۷ درصد سهم استان، دارای شهرک‌های صنعتی نام‌آشنا در کشور است. این شهرستان با وجود رودخانه هراز در کنار جاده هراز از مزایای زیادی برخوردار است که باید این جاده نه به‌عنوان تهدید بلکه به‌عنوان یک فرصت نگریسته شود (فرمانداری استان مازندران، ۱۳۹۴). از آنجاکه رودخانه هراز، آب موردنیاز کشاورزی و شهرک‌های صنعتی شهرستان آمل و شهرستان‌های اطراف را تأمین می‌کند، مسئله رسوب‌گذاری این رودخانه مهم بوده و باید موردتوجه کارشناسان قرار گرفته شود.

۱-۲- روش انجام تحقیق

با توسعه مدل‌های عددی و به‌کار بردن روابط موجود برای تخمین مقدار رسوب در این مدل‌ها، و انجام سریع محاسبات و مشاهده نتایج، استفاده از این مدل‌ها توانسته در حل مسائل هیدرولیک جریان و انتقال رسوب مفید واقع شود. در دهه‌های اخیر مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی سامانه‌های رودخانه-ای (اعم از جریان، رسوب و مسائل کیفی آب) در رودخانه‌ها توسعه یافته‌اند (باغبان‌پور و همکاران، ۱۳۹۰).

تاکنون از مدل‌های مختلفی برای تخمین این فاکتورها بهره گرفته شده است که می‌توان به روش‌های مختلفی مانند USBR، FAO و ... اشاره کرد. اما در دهه‌های اخیر با توسعه کاربرد شبکه عصبی مصنوعی و محاسبات نرم، تکنیک‌ها و ابزارهای بهتری که قادر به جایگزینی روش‌های مرسوم در حل مسائل مربوط به منابع آب می‌باشند، ظهور یافت (سلطانی و همکاران، ۱۳۸۸). از آن جمله می‌توان به توسعه منحنی دبی-اشل رودخانه پاهنگ^۱ مالزی با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن

^۱ Pahang

(عظمت الله و همکاران، ۲۰۱۱) و مدل سازی رابطه دبی- اشل رودخانه قیزیلیرماک^۱ ترکیه با استفاده از روش های برنامه ریزی ژنتیک^۲ (GP)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاجی تطبیقی فازی (FL) اشاره کرد (سلطانی و همکاران، ۱۳۸۸).

در سال های اخیر استفاده از استفاده از روش های هوشمند مانند شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج تطبیقی-عصبی فازی^۳، الگوریتم ژنتیک، برنامه ریزی ژنتیک، برنامه ریزی بیان ژن^۴ و روش مارس^۵ مورد توجه محققان قرار گرفته است. در تحقیق حاضر از روش USBR، FAO، برنامه ریزی بیان ژن و روش مارس استفاده شده است.

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

روش منحنی سنج رسوب^۷ (SRC)، یک روش رگرسیون آماری است که مقادیر اندازه گیری شده هم زمان دبی و دبی رسوب را به شکل منحنی توانی بیان می کند (ماکنالی زاده و همکاران، ۱۳۸۹).

۱-۲-۲- روش فائو^۸ (FAO)

روش فائو، روش اصلاحی رابطه USBR هست که به منظور لحاظ نمودن اثر دبی های سیلابی، توسط جونز^۹ (۱۹۸۱) ارائه گردید (ظهیری و همکاران، ۱۳۸۸).

۱-۲-۳- برنامه ریزی بیان ژن

GEP یک روش نوین در هوش مصنوعی است که در سال ۱۹۹۹ توسط فریرا ابداع گردید. GEP توسعه و گسترش یافته برنامه ژنتیک (GP) است که در سال ۱۹۹۲ توسط کوزا ابداع شد (عظمت الله

¹ Kizilirmak

² Genetic Programming

³ Adaptive Neuro- Fuzzy Inference system

⁴ Gene Expression Programming

⁵ Multivariate Adaptive Regression Splines

⁶ United States Bureau of Reclamation

⁷ Sediment Rating Curve

⁸ Food and Agriculture Organization

⁹ Jones

و همکاران، ۲۰۱۱). از جمله مزایای GEP قابلیت تعمیم‌دهی روابط است. این روش نتایج خوبی در قیاس با روش‌های متداول رگرسیونی ارائه می‌کند و قابلیت پاسخ‌دهی به مسائل غیرخطی مهندسی آب را داراست (زکریا و همکاران، ۲۰۱۰). در GEP برنامه‌ها به شکل کروموزوم‌های خطی کدگذاری شده و سپس به شکل غیرخطی و به صورت درختی بیان می‌شوند (آیتک و کیسی، ۲۰۰۸). GEP در برآورد حوادث سیل با دبی‌های بالا عملکرد بهتری را از GP ارائه می‌دهد. نتایج کلی نشان می‌دهد که استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن به‌عنوان ابزاری مؤثر در پیش‌بینی و برآورد دبی‌های روزانه می‌باشد (عظمت الله و همکاران، ۲۰۱۱).

روش GEP توسعه‌یافته الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) است (فریرا^۱، ۲۰۰۱). تفاوت اصلی GA، GP و GEP به ساختار افراد بازمی‌گردد: در الگوریتم ژنتیک اعضا رشته‌های خطی با طول ثابت‌اند، 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 غیرخطی 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 منحصراً کروموزوم‌های مربوطه که براساس سازگاری انتخاب شده‌اند را بیان می‌نماید، ایجاد این اعضای

¹ Ferreira

² Pars Tree

³ Chromosome

⁴ Genome

⁵ Expression Tree (ET)

منحصربه‌فرد این قابلیت را برای الگوریتم فراهم می‌کند که با کارایی بالا، از تکنیک‌های تطبیقی موجود پیشی بگیرد (فریرا، ۲۰۰۱).

۱-۲-۴- مدل مارس

مارس اولین ابزار مدل‌سازی موفق رگرسیونی خودکار در جهان می‌باشد. رگرسیون چند متغیره تطبیقی خط نقطه‌گذارهای درجه دوم (MARS) در سال ۱۹۹۱ توسط فریدمن^۱ توسعه داده شد، اما به‌طور گسترده در داده‌های کاوی شناخته شده است و جهان کسب‌وکار تنها به‌تازگی از طریق سمینارها و حمایت پرشور در حال شناخته شدن است.

مارس ابزار مدل‌سازی نوآورانه و قابل انعطاف است که مدل ساختمان پیش‌بینی دقیق برای متغیرهای وابسته می‌باشد. مارس در پیدا کردن تغییرات بهینه برتری و تعامل بالقوه‌ای در هر راه‌حل مدل‌سازی دارد که مبتنی بر رگرسیون است. برای انجام دادن این کار، این روش جدید به مدل رگرسیونی به‌طور مؤثر و آشکار، الگوهای داده‌های مهم و روابط دشوار که غیرممکن است، با روش‌های دیگری نشان می‌دهد. این مدل رگرسیونی به‌خوبی می‌تواند برای مدل‌سازی پیش‌بینی‌ها و اطلاعات، ایده‌آل باشد. به دلیل ویژگی‌های مهم زیر ایده‌آل می‌باشد:

- ۱- یک مدل رگرسیونی متغیر پیش‌بینی به‌وسیله تشکیل یک جمع متغیرهای وزنی نتیجه را پیش‌بینی می‌کند، به‌طوری‌که متغیر ورودی را منظم تغییر می‌دهد.
- ۲- در قبال یک تغییر کوچک در درخت تصمیم‌گیری که می‌تواند حرکت یک پیش‌بینی به یک گره دیگر در درخت باشد، می‌تواند هیچ تغییری رخ ندهد.
- ۳- هنگامی که یک مجموعه داده برای این مدل رگرسیونی تعریف می‌شود معمولاً شماره منحصربه‌فردی برای هر کدام ثبت می‌کند.

¹ Friedman

۴- در رگرسیون، اغلب ممکن است خواندن اثر یک متغیر پیش‌بینی توسط بررسی ضریب شیب

آن انجام شود. طراحان می‌توانند اثرات متقابل را به‌طور مستقیم از خود مدل بخوانند.

توسعه مدل رگرسیون می‌تواند خوب باشد ولی معمولاً نیاز قابل‌توجهی به زمان فعالیت متخصص مدل‌سازی، حتی برای مجموعه داده کوچک دارد. با ظهور MARS، مدل‌های رگرسیونی می‌توانند به‌طور خودکار توسعه‌یافته برای پیچیده‌ترین ساختمان داده‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

۱-۳- اهداف و نوآوری تحقیق

آگاهی از میزان انتقال رسوبات معلق از دیرباز برای مهندسان و طراحان تأسیسات آبی همیشه از مشکلاتی بوده که در انجام هر پروژه آبی با آن روبرو بوده‌اند. تخمین نادرست حجم رسوبات به‌خصوص تخمین کمتر از میزان واقعی منجر به طراحی نادرست می‌شود که خود مشکلاتی را به دنبال خواهد داشت (آیتک و کیسی، ۲۰۰۸؛ حسن‌زاده زردخونی و همکاران، ۱۳۹۴). حال با توجه به اهمیت رودخانه هراز در مازندران و جایگاه آن در تأمین منابع آبی، در پژوهش حاضر از روش برنامه‌ریزی ژن (GEP) و روش مارس (MARS) به‌عنوان روش‌های هوشمند و جدید، برای پیش‌بینی بار رسوب رودخانه هراز آمل و برقراری رابطه بین دبی جریان و ارتفاع استفاده‌شده و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج روش‌های منحنی سنج رسوب و فائو و روش رگرسیون خطی مقایسه گردیده است. معیار انتخاب مدل برتر بر مبنای تجزیه و تحلیل آماری می‌باشد و مدلی که دارای کمترین خطا باشد به‌عنوان مدل بهینه معرفی می‌شود. با توجه به آن‌چه اشاره شد، انتقال رسوب رودخانه‌ها به سدها، کانال‌های آبیاری و زمین‌های زراعی باعث مشکلات زیادی می‌شود که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به از دست رفتن سرمایه‌های کشور و زوال منابع طبیعی اشاره کرد. اندازه‌گیری مستمر دبی جریان امری هزینه‌بر می‌باشد و حتی در زمان‌های سیلابی بسیار مشکل است. از این رو با برقراری روابطی بین دبی جریان و ارتفاع سطح آب می‌توان با تخمین مناسب حجم دبی جریان رودخانه تمهیدات لازم برای سازه‌های آبی اندیشید. لذا ضروری است که پیش‌بینی هرچه دقیق‌تر دبی جریان و بار رسوبات می‌تواند در بهبود

مشکلات و نگهداری سازه‌های آبی مؤثر واقع شود. از این رو، در صورتی که نتایج حاصل از پیش‌بینی به کمک روش برنامه‌ریزی ژن و تکنیک مارس موفقیت‌آمیز باشد، می‌توان از این روش‌ها به‌عنوان روش‌های پیشنهادی در مسائل ذکر شده استفاده کرد.

۱-۴- سازمان‌دهی پایان‌نامه

روش انجام این پژوهش و نتایج آن در ۵ فصل جمع‌آوری شده است که به‌ترتیب زیر می‌باشد:

فصل اول: کلیات

فصل دوم: پیشینه تحقیق

فصل سوم: مواد و روش انجام پژوهش

فصل چهارم: بحث و نتایج

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

و در قسمت پایانی منابع مورد استفاده شده آمده است.

فصل دوم

پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه

بار رسوبی از جمله عوامل مهم تأثیرگذار در عملکرد هیدرولیکی سازه‌های آبی و ساختار ریخت‌شناسی رودخانه‌ها به‌شمار می‌رود. فرسایش و رسوب‌گذاری در سواحل و بستر و اطراف سازه‌های موجود در رودخانه‌ها یکی از معضلات عمده در رودخانه‌ها می‌باشد. ساخت سازه‌های هیدرولیکی، برداشت شن و ماسه از بستر و یا ایجاد تغییرات به‌منظور دستیابی به اهداف موردنظر در رودخانه باعث تغییر در الگو جریان رودخانه می‌شود که درنهایت موجب فرسایش و رسوب‌گذاری در بخش‌های مختلف رودخانه می‌شود. بنابراین یکی از پارامترهای مهم در طراحی سازه‌ها و یا ایجاد تغییرات بر روی رودخانه، تخمین مقدار فرسایش و رسوب‌گذاری در قسمت‌های مختلف رودخانه و سیلاب‌دشت و کنترل آن می‌باشد.

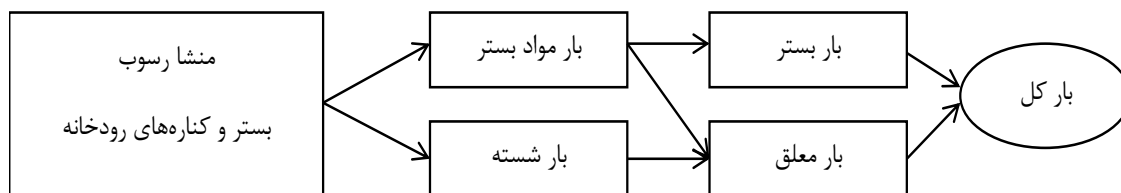
یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های فرآیندهای هیدرولیکی و هیدرولوژیکی در مدیریت منابع آب، پیش‌بینی جریان در رودخانه‌ها می‌باشد. از این‌رو هیدرولوژیست‌ها از داده‌های تاریخی جهت ایجاد یک رابطه میان دبی جریان و تراز سطح آب استفاده می‌کنند که از این رابطه تحت عنوان رابطه دبی-اشل یاد می‌شود. اندازه‌گیری دائمی دبی رودخانه‌ها حتی در شرایط طبیعی امری بسیار دشوار و پرهزینه است. این مشکلات حتی در هنگام وقوع سیلاب‌های بزرگ، به‌طور جدی و قابل توجهی افزایش می‌یابد. از آن‌جا که می‌توان تراز سطح آب را در رودخانه‌ها به‌طور مستقیم اندازه‌گیری کرد، متخصصین با استفاده از رابطه دبی-اشل قادر خواهند بود که دبی رودخانه را اندازه‌گیری کنند (سلطانی و همکاران، ۱۳۸۹؛ حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵؛ ملکی و همکاران، ۱۳۹۴).

۲-۱-۱- اشکال و روش‌های برآورد رسوب

به هر ذره‌ای که توسط جریان سیال حمل شده و سرانجام ته‌نشین شود، رسوب گفته می‌شود. اندازه رسوبات با توجه به مشخصات هیدرولیک جریان متفاوت بوده و از موادی مانند رس، سیلت، ماسه و حتی شن نیز تشکیل می‌گردد. به مجموع کل بار رسوب معلق و بار بستر، دبی کل رسوب گفته می‌-

شود. در مدل‌سازی حرکت رسوب توجه به نوع رسوب و نیروهای مؤثر بر حرکت آن امری ضروری است. در حالت طبیعی رسوبات کف می‌توانند چسبنده یا غیر چسبنده باشند. نیروی غالب برای حرکت رسوبات چسبنده نظیر رس و سیلت، نیروهای الکتریکی و برای رسوبات غیر چسبنده نظیر شن و ماسه، نیروی گرانشی است. رسوبات بستر به دو شکل بار بستر و بار معلق منتقل می‌شوند. زمانی که شدت جریان روی کف اندکی از مقدار بحرانی افزایش یابد، ذرات به شکل لغزش، غلتش و پرش شروع به حرکت خواهند کرد که بار بستر گفته می‌شوند. با افزایش شدت جریان طول جهش ذرات افزایش یافته و ذرات به شکل بار معلق منتقل می‌شوند. هرچند تمایز این دو حالت کاملاً روشن نیست، اما مکانیسم حرکت بار معلق با بار بستر متفاوت است. پارامتر مؤثر در حرکت بار بستر، شدت جریان و برای بار معلق، سرعت سقوط ذرات می‌باشد.

با توجه به شکل (۱-۲)، بار بستر و بار معلق با یکدیگر در تعامل هستند و چنانچه بر اثر کاهش سطح مقطع جریان با افزایش شیب بستر، تنش‌های هیدرولیکی افزایش یابند، قسمتی از بار بستر به حالت بار معلق درمی‌آید. همچنین با کاهش تنش هیدرولیکی بر اثر کاهش دبی جریان، افزایش سطح مقطع یا کاهش شیب بستر نیز شاهد افزایش بار بستر خواهید بود (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).



شکل (۱-۲) اشکال مختلف انتقال مواد رسوبی در رودخانه

۲-۱-۲- عوامل موثر بر الکوی رسوب گذاری

سیلاب‌های بزرگ، اصلی‌ترین عامل ورود حجم زیادی از رسوب به مخازن سدها هستند. وقوع این طوفان‌ها در زمان‌ها و شرایط مختلف در حوضه‌های فرعی متفاوتی رخ می‌دهد که رسوب متفاوت (از نظر حجم و جنس) منتقل می‌کند (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).

۲-۱-۳- تقسیم‌بندی براساس تعداد کلاس‌های اندازه رسوب

براساس تعداد کلاس اندازه‌های رسوب، مدل‌های انتقال رسوب به مدل‌های یکنواخت (تک اندازه) و یا غیریکنواخت (چند اندازه‌ای) تقسیم‌بندی می‌شوند. شبیه‌سازی حاصل از مدل‌های غیریکنواخت رسوب واقعی‌تر از مدل‌های یکنواخت رسوب می‌باشد (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).

۲-۱-۴- پیامدهای فرسایش و رسوب گذاری رودخانه‌ها

به‌طور کلی فرسایش و رسوب‌گذاری باعث تغییرات عمده‌ای در ظاهر و نحوه شکل‌گیری سرشاخه‌ها و مشخصات دیگر حوزه آبریز می‌شود. معمولاً در بستر و کناره رودخانه‌ها فرسایش رخ می‌دهد. افزایش فرسایش بستر باعث ناپایداری سواحل می‌شود و ریزش توده‌ای خاک ساحل را در پی دارد. این فرآیند مقطع هندسی رودخانه را تغییر داده و در ادامه تغییر در ریخت‌شناسی می‌شود. تغییرات مذکور عامل تغییر در ساختار جریان شده و باعث افزایش فرسایش و تولید رسوب می‌شود. وجود پایه‌های پل و انواع سازه رودخانه‌ای عامل تغییر ساختار جریان و در پی آن تغییر در بستر رودخانه است. از دیدگاه محققین علم هیدرولیک رسوب، مصالح بستر منشأ عمده رسوباتی هستند که در رودخانه‌ها در حال حرکت می‌باشند. با قبول این، مقدار رسوب عبوری از هر مقطع رودخانه به شرایط جریان رودخانه در آن مقطع بستگی دارد (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).

۲-۱-۵- مدل‌های عمومی بررسی ریخت‌شناسی رودخانه

اولین گام در طراحی مدل‌های رودخانه‌ای، در دسترس بودن اطلاعات نمونه اصلی است که شامل مقاطع عرضی بستر رودخانه، منحنی دبی-اشل و نیمرخ طولی بستر رودخانه می‌باشد (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).

۲-۱-۶- منحنی سنجه دبی رسوب

اگر همه متغیرها در ایستگاه آب‌سنجی ثابت و تنها دبی جریان در حال تغییر فرض شود، در آن صورت دبی رسوب یا غلظت رسوب را می‌توان تنها تابعی از دبی جریان بیان کرد. حال اگر داده‌های اندازه‌گیری شده دبی رسوب در مقابل دبی جریان بر روی کاغذ لگاریتمی منحنی رسم شود، آن را منحنی سنجه دبی رسوب گویند. از آن‌جا که فرض ثابت بودن همه متغیرها، کاملاً صحیح نمی‌باشد داده‌های واقع بر منحنی ممکن است خیلی پراکنده باشند و تشکیل منحنی واحدی را ندهند. مطالعات هیدرولیک رسوب نیز به‌منظور بررسی نحوه رسوب‌گذاری در مخزن و رودخانه بالادست، همچنین نحوه فرسایش بستر رودخانه پایین‌دست، به‌خصوص در جریان سیلابی که ممکن است در طول عمر پروژه با آن روبه‌رو شود، است. مطالعات جریان و رسوب نیازمند استفاده از روش‌های تجربی و مدل‌های ریاضی می‌باشد (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).

۲-۱-۷- کاربرد مدل‌های فیزیکی و ریاضی در مطالعات مهار رسوب

انجام مطالعات در زمینه فرسایش و رسوب به‌طور معمول دارای پیچیدگی‌های فراوانی است و استفاده عملی از نتایج مطالعات مستلزم دقت و توجه زیادی می‌باشد. از این‌رو لازم است قبل از اقدام به طراحی و اجرای پروژه‌های مهندسی رودخانه از نحوه عملکرد آن‌ها اطمینان حاصل شود. برای این منظور از مدل‌های فیزیکی و ریاضی به‌عنوان ابزارهای مفید برای حل مسائل مرتبط با فرسایش و رسوب در رودخانه‌ها بهره گرفته می‌شود. مدل‌های فیزیکی معمولاً به دلیل محدود بودن فضا و امکانات آزمایشگاهی، با محدودیت مقیاس روبه‌رو هستند، ولی به دلیل این‌که پدیده‌ها به‌صورت

سه‌بعدی قابل مدل‌سازی می‌باشند، فهم نتایج را آسان‌تر می‌کنند. اما مدل‌های ریاضی به دلیل آن‌که ابعاد واقعی پدیده‌ها را مدل می‌کنند با محدودیت مقیاس مواجه نیستند، ولی به اطلاعات اندازه‌گیری شده برای واسنجی و صحت‌سنجی نیاز دارند که در بسیاری از موارد در دسترس نیستند و یا تهیه آن‌ها به زمان و هزینه زیادی نیاز دارد (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).

۲-۱-۸- مدل ریاضی و اهداف مدل‌سازی آن در مهندسی رودخانه

با توجه به پیچیدگی پدیده‌های هیدرولیکی و رسوبی در رودخانه‌ها، امکان حل معادلات حاکم به روش‌های تحلیلی ممکن نیست و معمولاً از روش‌های عددی استفاده می‌شود. امروزه با پیشرفت کامپیوتر و توسعه روش‌های عددی، مدل‌های ریاضی در مطالعات مهندسی رودخانه کاربرد زیادی یافته‌اند. در مدل‌های ریاضی با توجه به این‌که اندازه واقعی رودخانه مدل می‌شود، محدودیت مقیاس وجود ندارد (وزارت نیرو، ۱۳۹۱).

به‌طور کلی اهدافی که برای مدل‌سازی ریاضی در رودخانه‌ها می‌توان بیان کرد، عبارت‌اند از:

۱- درک بیشتر مسئله

۲- توسعه گزینه‌های مختلف

۳- ارزیابی گزینه‌های مطرح‌شده

۲-۲- پیشینه تحقیق

از مهم‌ترین مسائلی که می‌توان در پروژه‌های مهندسی رودخانه، منابع آب و محیط‌زیست اشاره کرد، برآورد حجم صحیح رسوبات معلق رودخانه‌ها می‌باشد. با توجه به مشکلات زیاد ناشی از رسوبات در رودخانه‌ها، پژوهشگران علم رسوب تلاش‌های زیادی به‌منظور دستیابی به روابط انتقال رسوب براساس مطالعات آزمایشگاهی و میدانی انجام داده‌اند (شیخعلی‌پور و همکاران، ۱۳۹۴). از اوایل قرن نوزدهم میلادی استفاده از روش‌های تجربی متداول گردید و در سال ۱۸۰۸ برای نخستین بار، بار

معلق توسط گراس و سایورس^۱ اندازه‌گیری شد (وزارت نیرو، ۱۳۹۱). از اوایل قرن نوزدهم با توسعه دانش هیدرولوژی داده‌های آماری دبی جریان ثبت شد و برای اولین بار اندازه‌گیری منظم آبدهی و تراز سطح آب از سال ۱۸۸۸ میلادی بر روی رودخانه می‌سی‌سی‌پی^۲ توسط سازمان زمین‌شناسی امریکا^۳ گزارش شد (وزارت نیرو، ۱۳۸۶). در سال‌های اخیر استفاده از سامانه‌های هوشمند در راستای افزایش دقت برآورد میزان رسوبات رودخانه، رابطه دبی-اشل مرسوم گردیده است. پژوهشگران برای دستیابی به دقت هر چه بالاتر در امر پیش‌بینی روابط مهندسی رودخانه، روش‌های گوناگونی را مورد آزمایش و آزمون قرار داده‌اند. در این پژوهش، روش‌های مرسوم رگرسیونی، روش برنامه‌ریزی ژن و روش مارس مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۲-۱-۲- پیشینه مطالعات بار رسوب

از دیرباز مسئله فرسایش و حمل رسوب به‌وسیله رودخانه‌ها مورد توجه محققین بوده است که برخی از تحقیقات در این زمینه اشاره شده است.

تلوری (۱۳۸۱) در تحقیقی رابطه رسوب‌دهی معلق را با ویژگی‌های آبخیز در سرشاخه‌های کرخه و دز مورد بحث و ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق از ۱۵ زیر حوزه در محدوده استان لرستان استفاده شده است. نتایج نشان داد که در اغلب ماه‌ها بین بار رسوبی و دبی متوسط جریان رابطه خوبی برقرار است. به‌طور کلی نتایج بیانگر این است که یا آمار اندازه‌گیری رسوب از دقت خوبی برخوردار نیست و یا به دلیل کم بودن طول دوره آماری تلاش در برقرار ساختن این‌گونه روابط جایز نیست.

عرب خدري و همکاران (۱۳۸۳) اعتبار روش‌های برون‌یابی را در برآورد میانگین رسوب‌دهی معلق سالانه مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش از ۱۷ ایستگاه هیدرومتری و ۱۸ روش برآورد بار معلق استفاده شده است. نتایج بیانگر انتخاب روش تلفیق جریان روزانه و منحنی سنج حد وسط دسته‌ها

^۱ Grosse & Subours

^۲ Mississippi

^۳ U.S Geological Survey

به‌عنوان روش مبنای برآورد رسوب‌دهی بوده است. همچنین منحنی تداوم جریان میزان رسوب معلق را ۱۴ درصد کمتر برآورد کرده است. به‌طور کلی ۴ منحنی سنجه ضرایب اصلاحی فائو، غیر پارامتری، پارامتری و یک‌خطی ضعیف‌ترین نتایج را نشان داده‌اند.

عرب خدری (۱۳۸۴) در تحقیقی رسوب‌دهی معلق را در حوزه‌های آبخیز ایران مورد بحث و بررسی قرار داد. در این تحقیق از داده‌های ۲۰۹ ایستگاه رسوب سنجی استفاده گردید. نتایج نشان داد که بیشترین رسوب‌دهی ویژه مربوط به حوزه‌های هامون، میناب، بلوچستان جنوبی، مارون و زهره در جنوب کشور با بیش از ۷۰۰ تن در کیلومتر مربع در سال است. همچنین نتایج بیان کرد که افزایش مساحت حوزه، منجر به افزایش رسوب‌دهی ویژه می‌شود. به‌طور کلی نتایج نشان داد که حوزه‌هایی با رسوب‌دهی ویژه با بیش از ۱۰۰۰ تن در کیلومتر مربع در سال نشان‌دهنده آن است که سازندهای حساس به فرسایش، لغزش و پوشش گیاهی نقش مهمی در تولید رسوب دارند.

صادقی (۱۳۸۴) در شاخه‌های بالارونده و پایین‌رونده آب نگار با استفاده از مفهوم رگرسیون به تهیه معادلات سنجه رسوب پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد که مفهوم رگرسیون در تهیه دو معادله جداگانه برای شاخه‌های بالارونده و پایین‌رونده آب نگار از توانایی خوبی برخوردار است.

وروانی و خلیفی سیگارودی (۱۳۸۶) در پژوهشی خطای منحنی‌های سنجه رسوب را به‌منظور برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی در رودخانه قره چای تحلیل و بررسی کردند. در این پژوهش از ۱۰ نوع منحنی سنجه رسوب استفاده شد. نتایج نشان داد که تمامی منحنی سنجه‌ها برآورد کمتر از میزان واقعی ۸۰-۴۰ درصد داشته و روش سازمان خواروبار و کشاورزی جهانی عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. به‌طور کلی نتایج نشان داد که روش‌های حد وسط دسته‌ها و MVUE روش‌هایی کارآمد در برآورد بار رسوبی سالانه و ناکارآمد در برآورد بار رسوبی هیدروگراف سیل هستند.

داداش‌زاده اصل و همکاران (۱۳۸۸) در حوزه آبخیز قره‌چای به ارزیابی منحنی‌های سنجه رسوب در برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی پرداختند. در این پژوهش از ۱۰ نوع منحنی رسوب یک متغیره و چند

متغیره با رسوب مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری پل دو آب استفاده گردیده است. نتایج نشان داد که روش فائو نسبت به بقیه روش‌ها عملکرد بهتری داشته و برآورد نسبتاً نزدیک‌تری به مقدار واقعی دارد. همچنین نتایج حاکی از آن است که علیرغم کارایی مؤثر روش چند متغیره در برآورد بار رسوبی سالانه به علت پراکنش نامناسب داده‌های سیلابی این روش در برآورد بار رسوبی هیدروگراف سیل ناکارآمدی خود را نشان داد.

غفاری و همکاران (۱۳۸۸) مناسب‌ترین روش برآورد رسوب معلق را در بالادست سد لتیان و طالقان تعیین کردند. در این تحقیق از دبی روزانه و ۶ مدل یک خطی، دو خطی، حد وسط دسته‌ها، ضریب اصلاحی فائو، ضریب اصلاحی پارامتری و ضریب اصلاحی غیر پارامتری استفاده شده است. نتایج نشان داد که منحنی سنج حد وسط دسته‌ها، مناسب‌ترین مدل جهت برآورد رسوب معلق در ایستگاه‌های مورد مطالعه است. در نهایت نتایج بیان کرد که بیشتر از ۷۰ درصد از رسوب معلق سالانه طی ماه‌های سیلابی (فروردین، اردیبهشت و اسفند) و در کمتر از ۲۵ درصد زمانی از حوضه منتقل می‌شوند.

هاشمی و عرب‌خداری (۱۳۸۹) رسوب‌سنجی مخازن سدهای کوچک را با استفاده از مدل MPSIAC ارزیابی کردند. در این تحقیق از ۹ حوزه آبخیز کوچک استان سمنان با احداث سدهای خاکی کوتاه با قدمت ۱۰ سال در خروجی این حوزه‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که اختلاف بین میانگین‌ها برای مقادیر حجمی رسوب‌دهی، با مقادیر اندازه‌گیری شده در سطح ۵ درصد معنی‌دار نبوده اما اختلاف بین میانگین مقادیر وزنی رسوبات در سطح ۵ درصد معنی‌دار بوده است. به‌طور کلی نتایج حاکی از ناکارایی مدل MPSIAC برای منطقه مورد مطالعه است.

سبهبانی و ملکیان (۱۳۹۰) در تحقیق به برآورد رسوب معلق در حوزه آبخیز حبله‌رود پرداختند. در این تحقیق از داده‌های متناظر دبی-دبی رسوب در دوره آماری ۱۳۴۸-۱۳۸۵ استفاده گردیده است. نتایج نشان داد که از بین روش‌های آماری (هیدرولوژیکی) برآورد رسوب معلق، روش حد وسط به‌عنوان

روش مناسب با صحت و دقت بالا و بیشترین فراوانی انتخاب شده و به ترتیب روش‌های دو خطی، یک خطی، فائو، ضریب پارامتری و ضریب غیر پارامتری در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

صمدی‌بروجنی و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیقی رسوب‌دهی سالانه رودخانه دز را با استفاده از روش نسبت‌ها تحلیل و بررسی کردند. در این تحقیق از روش نسبت دبی به رسوب و روش سنج رسوب (USBR) استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که روش نسبت‌ها از درصد خطای کمتری (۸/۵ درصد) نسبت به روش سنج رسوب USBR (۲۷ درصد)، در تخمین بار سالانه رسوب برخوردار است. به‌طور کلی نتایج نشان داد که روش نسبت‌ها در حوضه‌های دارای آمار می‌تواند به‌عنوان یک روش خوب جهت برآورد رسوب‌دهی رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

کیا و عمادی (۱۳۹۲) روش‌های مختلف را به‌منظور برآورد بار رسوب معلق در بابل‌رود مورد ارزیابی و مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از متوسط دسته‌های دبی، کلاسه‌بندی دقیق و تفکیک زمانی داده‌ها به کاهش خطای برآورد دبی رسوب کمک می‌کند. به‌طور کلی نتایج بیانگر آن است که بهره‌گیری از دبی متوسط روزانه بجای دبی متوسط ماهانه و منحنی تداوم جریان و تلفیق آن با مدل بهینه، بار معلق درازمدت سالانه را بهتر برآورد خواهد نمود.

هرینگتون و هرینگتون^۱ (۲۰۱۳) بار معلق را با استفاده از منحنی سنج رسوب در رودخانه بندن و اونابو برآورد و ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که خطای ماهانه در رودخانه بندن و اونابو به‌طور متوسط به ترتیب ۱۲٪- و ۸۷٪+ برآورد شده است. همچنین نتایج بیان کرد که بار معلق مشاهداتی (با فاصله اطمینان ۹۵٪) برآورد شده و بارهای معلق مدل پیش‌بینی، با متوسط سالانه 7253 ± 673 تن در رودخانه بندن و 1935 ± 325 تن در رودخانه اونابو برآورد شده است.

¹ Harrington & Harrington

روسی^۱ و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی آلودگی را در کل رسوبات مناطق شهری ارزیابی کردند. نتایج کل رسوبات (مواد جامد معلق) به سه گروه دسته‌بندی می‌شوند: (۱) گل‌ولای بستر رودخانه، (۲) نیاز به اکسیژن به دلیل تجمع مواد آلی مخرب و (۳) آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین در بستر رودخانه‌ها. به‌طور کلی نتایج نشان داد که برای هریک از دسته‌بندی‌ها، توافق خوبی بین پیش‌بینی خطر و اندازه-گیری‌های میدانی برقرار و قابل‌اطمینان خواهد بود.

عرب‌خداری و همکاران (۱۳۹۲) اثر تفکیک دوره‌های برفی و بارانی را در میزان صحت برآورد رسوب-دهی معلق در حوزه گرگان‌رود مورد بحث و بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که منحنی سنج‌حد وسط دسته‌ها و ضریب عاملی بهترین برآوردها با کمترین خطا و دقت و صحت قابل‌قبول تولید کردند. به‌طور کلی نتایج نشان داد که تفکیک دو دوره تأثیری در بهبود برآورد رسوب‌دهی کل ندارد.

بهادر سینگ^۲ و همکاران (۲۰۱۴) تغییرات فصلی املاح و بار رسوب معلق ناشی از ذوب یخچال‌ها بررسی کردند. نتایج عوامل باران‌های موسمی پیش و پس از آن و باران‌های فصلی نشان داد که مواد شیمیایی ناشی از ذوب یخ، کربنات ناشی از هوازدگی سیلیکات، اکسیداسیون سولفید، انحلال مواد معدنی سولفات و درنهایت فعالیت‌های انسانی باید کنترل شود.

نصرآبادی و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی به ارزیابی معادلات توزیع غلظت رسوبات معلق در کانال-های باز پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که معادله اینشتین و شن (۱۹۵۲) بهترین تطابق را با داده‌های آزمایشگاهی و مناسب جهت محاسبه توزیع غلظت رسوبات معلق، و معادلات مک‌تیگو و ویلیس کم‌دقت‌ترین معادلات هستند. همچنین توزیع لگاریتمی سرعت در جریان‌های حاوی رسوبات معلق نیز دارای اعتبار است.

بهرامی یاراحمدی و شفافی بجستان (۱۳۹۴) در تحقیقی تغییرات طول مؤثر صفحات مثلثی را بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری مورد بحث و بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که با

¹ Rossi

² Bahadur Singh

کاهش طول مؤثر، حداکثر عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش طول مؤثر سازه حداقل فاصله پشته رسوب‌گذاری از ساحل بیرونی کاهش می‌یابد. به‌طور کلی نشان داد که فاصله پشته رسوبی از ساحل بیرونی در طول‌های مؤثر یک‌پنجم و یک‌هفتم مجرا اختلاف اندکی با هم دارند و حدود ۲-۱/۵ درصد عرض فلوم می‌باشد.

حسن زاده زردخونی و همکاران (۱۳۹۴) برآورد بار معلق رودخانه چم‌سیاه را با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق از شش روش هیدرولوژیکی برآورد بار معلق شامل روش تک‌خطی، حد وسط دسته‌ها، تداوم جریان، تجمعی حد وسط دسته‌ها، فصلی و دوره مشابه هیدرولوژیکی استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق اختلاف زیادی را بین روش‌های مختلف نشان داد، اما روش تک‌خطی به‌عنوان روش بهینه و روش تداوم جریان به‌عنوان روش مناسب تشخیص داده شد.

۲-۲-۲- پیشینه مطالعات دبی - اشل

ادیب و همکاران (۱۳۹۳) اثرات جزر و مد خلیج فارس را بر منحنی دبی - اشل در رودخانه کارون مورد ارزیابی قرار دادند. در همین راستا در این پژوهش از دبی رودخانه کارون در اهواز و تراز سطح آب در خرمشهر استفاده گردید. نتایج نشان داد که محدوده تأثیر جزر و مد در رودخانه کارون تا ایستگاه هیدرومتری دارخون ادامه دارد. همچنین نتایج نشان داد ترازهای سطح آب این منحنی‌ها در اکثر موارد قابل کاربرد هستند (تا دوره بازگشت ۱۰۰ سال).

محمدی و قبادیان (۱۳۹۳) در پژوهشی به مدل‌سازی عددی منحنی سنج حلقه‌ای در کانال‌های منظم و نامنظم در رودخانه قره‌سو پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش طولی، مساحت حلقه به سمت صفر و به سمت موج کینماتیک نزدیک می‌شود و با افزایش زبری بستر، مساحت حلقه افزایش می‌یابد و فاصله بین اشل بالارونده و پایین‌رونده نیز زیاد می‌شود. به‌طور کلی نتایج نشان داد که

مساحت حلقه متناسب با مستهلک شدن انرژی موج سیل به طرف پایین دست است و از روی آن می-توان دینامیک، کینماتیک یا دیفیوژن بودن موج سیل را تشخیص داد.

ملکی و همکاران (۱۳۹۴) اثر دو نوع ریبیل را روی منحنی دبی-اشل در فلوم آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از چهار روش ارزیابی و دو نوع فرم بستر ریبیل موازی و پولکی استفاده گردید. نتایج حاصل از محاسبه پارامترهای آماری نشان داد که روش شن با کمترین میزان RMSE و درصد خطا، منحنی دبی-اشل را با دقت بیشتری برآورد می کند. همچنین نتایج حاکی از آن است که روش شن در حالت شکل بستر موازی، دارای دقت بیشتری نسبت به حالت پولکی است.

حسین زاده و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیقی رابطه دبی-اشل در رودخانه اسکویلکیل را مدل سازی کردند. در این تحقیق از روش کنترل گروهی داده‌ها (GMDH) و داده‌های اندازه‌گیری شده دبی و اشل با طول دوره آماری ۲۵۵۰ روزه استفاده گردید. نتایج نشان داد که روش GMDH دارای دقت مطلوبی است. همچنین شاخص‌های آماری محاسبه شده برای داده‌های آموزش و آزمون قابل قبول بوده است.

شیخ رضازاده نیکو و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی یک معادله دبی-اشل را برای سرریزهای لولایی ارائه کردند. در این پژوهش برای تعیین ضرایب معادله دبی از داده‌های آزمایشگاهی با سه سرریز لولایی در هندسه‌های مختلف و داده‌های USBR برای سرریز لولایی با فشردگی ۰/۹۲۵ استفاده گردید. نتایج نشان داد که با توجه به رابطه ارائه شده، رابطه دبی اشل پیشنهادی از قانون فررو دارای دقت مناسبی در تعیین دبی بوده و کاربرد آن در شرایط عملی آسان است.

۲-۲-۳- مطالعات پیشین بر روی رودخانه هراز آمل

رودخانه هراز آمل یکی از پرآب‌ترین رودهای جلگه مازندران است. این رودخانه تأمین کننده آب زراعی مردمان آمل، فریدونکنار، بابل و نور و دارای تنوع جانوری بسیاری می باشد. لذا با توجه به مسائل

هیدرولوژیکی، اقلیمی، کشاورزی و منابع آب و خاک همواره مورد توجه محققان قرار داشته است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

غلامی و همکاران (۱۳۸۴) اثرات استقرار پوشش گیاهی در کناره‌های بستر در فرسایش کناری رودخانه هراز را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استقرار پوشش گیاهی در کناره‌های بستر رودخانه موجب تغییراتی در سرعت و عمق آب، نیروی تنش برشی شده و نهایتاً بر روی وضعیت فرسایش کناری رودخانه‌ای تأثیرگذار است.

نعیمی و همکاران (۱۳۸۹) رفتار ژئوشیمیایی عناصر V، Ni و Ba را در رسوبات سطحی رودخانه هراز تحلیل و بررسی کردند. نتایج نشان داد که V با Ba و V با Ni همبستگی بالا را نشان دادند که بیان‌کننده منشا مشترک آن‌ها می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که غلظت عناصر V، Ni و Ba در نمونه‌های رسوب به ترتیب برابر ۱۰۹/۸ ppm، ۳۹/۵۶ و ۶۸۱ بوده که Ba غلظت بیشتری از میانگین پوسته‌ای دارد.

صلوی تبار و همکاران (۱۳۹۰) به تحلیل شبیه‌سازی تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی در رودخانه هراز پرداختند. نتایج نشان داد که با استفاده از مدل‌هایی و بررسی منابع آب سطحی و زیرزمینی به‌طور هم‌زمان، می‌توان به نگرش مناسبی از حوضه رودخانه هراز دست یافت.

وهاب‌زاده و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی بهینه‌ترین مدل برآورد بار رسوبی معلق در رودخانه هراز را مورد بحث و ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق از آمار دبی و دبی رسوب ایستگاه کره‌سنگ واقع بر رودخانه هراز در طول دوره ۳۵ ساله (۱۳۸۹-۱۳۵۳) استفاده گردیده است. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل حاصل از طبقه‌بندی داده‌های مقادیر جریان برای کل داده‌ها دارای ضریب همبستگی بالاتر و میانگین مربع خطای کمتری بوده و به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد.

کاوپان و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی با استفاده از الگوی SWAT، رواناب و بار رسوب حوضه آبخیز رودخانه هراز را شبیه‌سازی کردند. در این پژوهش از دوره آماری ۲۰۰۴-۱۹۹۵ و نمایه‌های

آماري R^2 ، NS و MSE استفاده شده است. نتايج اعتبارسنجي بار رسوب در سال هاي ۲۰۰۷ و ۲۰۰۷ نشان داد مقادير نمايه ها به ترتيب برابر ۰/۶۸، ۰/۵۳ و ۱۳۶ هزار تن است. به طور كلي نتايج حاكي از زياد بودن دقت شبیه سازی دبی جریان به ترتيب در ايستگاه های کره سنگ، رزن، پنجاب و چلاو است.

۲-۲-۴- پيشينه کاربرد روش های هوشمند در مهندسي آب

سلطاني و همکاران (۱۳۸۹) رابطه دبی- اشل را با استفاده از سامانه های هوشمند مدل سازی کردند. در اين تحقيق از سه روش شبکه های عصبی مصنوعی (ANN)، سيستم استنتاج عصبی- فازی (ANFIS) و برنامه ريزی ژنتیک (GP) استفاده شده است. نتايج نشان داد که روش سيستم استنتاج عصبی- فازی از دقت بيشتري برخوردار است اما به دليل استخراج رابطه دبی اشل و انتخاب متغيرهای معنی دار و دقت قابل قبول مدل حاصل از برنامه ريزی ژنتیک با چهار عمل اصلی، به عنوان بهترين مدل دبی- اشل انتخاب گرديد.

نظام خياوی و همکاران (۱۳۸۹) بار معلق رسوب رودخانه قره سو را با استفاده از سيستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی مورد ارزیابی قرار دادند. نتايج نشان داد که سيستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی از توانایی خوبی برای تخمین بار معلق رسوب به دليل امکان ارتباط با خصوصيات فیزیکی سيستم و پارامترهای مؤثر، برخوردار است.

نظام خياوی و نظام خياوی (۱۳۸۹) از شبکه های عصبی مصنوعی برای برآورد بار معلق رسوب رودخانه خياوچای استفاده کردند. نتايج پژوهش آنها نشان داد که روش شبکه عصبی مصنوعی در پيش بينی بار معلق رسوب بر ساير روش های آماری برتریت دارد.

ابراهیمی محمدی و وفاخواه (۱۳۸۹) در تحقيقی کارایی مدل های شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون چند متغیره و سنجه رسوب در برآورد بار معلق رودخانه هراز مقایسه و ارزیابی کردند. نتايج نشان داد که مدل های شبکه عصبی مصنوعی از عملکرد بهتری برخوردار هستند. همچنين نتايج نشان داد که مقادير رسوب معلق روزانه رودخانه هراز متأثر از مقادير بارش و دبی روزانه تا ۳۰ روز قبل بوده است.

نورانی و کوماسی^۱ (۲۰۱۳) با استفاده از سیستم استنتاجی تطبیقی عصبی- فازی مبتنی بر ژئومورفولوژی (IGANFIS) به پیش‌بینی و مدل‌سازی بارش- رواناب پرداختند. نتایج نشان داد که این مدل برای مکان‌هایی که با فقدان داده روبه‌رو هستیم کاربرد دارد. همچنین این مدل می‌تواند مدل کاربردی در مدل‌سازی فضایی و مکانی فرآیندهای هیدرولوژیکی باشد.

کاکایی لعدانی و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای بار معلق رسوب را با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و پشتیبانی ماشین‌آلات بردار (SVM) برآورد کرده و نتایج را ارزیابی نمودند. در این مطالعه از داده‌های بار رسوب معلق روزانه در دوره (۲۰۰۴-۱۹۹۴) استفاده شده است. نتایج نشان داد که مدل ANN و nu-SVR با استفاده از آزمون گاما بهترین عملکرد را از نظر ترکیب رگرسیونی دارند. همچنین نتایج نشان داد که آزمون M را می‌توان به‌عنوان یک روش جدید برای تعیین داده‌های موردنیاز برای آموزش دو مدل ANN و nu-SVR استفاده کرد.

داننده‌مهر و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای به پیش‌بینی رواناب با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک و تکنیک عصبی موجک پرداختند. در این مطالعه از دو روش هوش مصنوعی شامل شبکه موجک-عصبی مصنوعی (WANN) و تکنیک خطی برنامه‌ریزی ژنتیکی (LGP) استفاده شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که LGP عملکرد بهتری در تمام مدل‌های مرجع داشته و این مدل تنها براساس توابع ریاضی ساخته شده است. به‌طور کلی نتایج نشان داد که می‌توان از آن به‌عنوان بهترین مدل جهت پیش‌بینی رواناب در منطقه مورد مطالعه یاد کرد.

حدادچی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از روابط سنتی و مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی به برآورد و بررسی بار رسوب معلق پرداختند. به‌طور کلی نتایج نشان داد علاوه بر اینکه رابطه چانگ با ضریب بالاتر همبستگی در میان ۹ رابطه مورد مطالعه بهترین پیش‌بینی بار معلق داشته، مدل ANN به‌طور قابل توجهی بهترین عملکرد را برای تمام پارامترهای آماری از خود نشان داده است.

¹ Nourani & Komasi

گارگ و جودی پارکاش^۱ (۲۰۱۳) در پژوهشی رسوب مخزن را با استفاده از تکنیک‌های داده محور مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از چهار روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، مدل درختی (MT)، برنامه‌ریزی ژنتیکی (GP) و رگرسیون خطی چندگانه استفاده شده است. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که مدل‌های غیرخطی ANN و GP حتی برای مجموعه داده‌های کوچک، روند برآورد و پیش‌بینی بهتری نسبت مدل‌های MT و خطی داشته‌اند.

ناستوس^۲ و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، حداکثر مجموع بارش روزانه را در آتن پیش‌بینی کردند. در این تحقیق مجموعه داده‌ها در دوره ۱۹۸۰-۱۹۸۱ به‌عنوان مجموعه داده آموزش و مجموعه داده‌ها در دوره ۱۹۸۱-۲۰۰۰ به‌عنوان مجموعه داده‌های اعتبار سنجی استفاده شده است. نتایج نشان داد که پیش‌بینی نتایج کاملاً رضایت‌بخش بوده که بیشترین حداکثر و حداقل بارش روزانه به ترتیب در سال‌های ۱۹۸۸ و ۱۹۹۹ رخ داده است.

کومار^۳ و همکاران (۲۰۱۴) مشکلات رسوب‌گذاری را با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیکی و رگرسیون بررسی کردند. نتایج نشان داد که این مدل توانایی تعمیم به تغییرات غیرخطی داده‌ها را دارد. به‌طور کلی نتایج بیان کرد که مدل توسعه‌یافته قادر به تعمیم روابط اساسی داده‌ها داشته و می‌تواند مقادیر داده‌های ناشناخته را با دقت بالا پیش‌بینی کند.

موهارانا و خاتوا^۴ (۲۰۱۴) در تحقیقی ضریب زبری را در کانال‌های باز را با استفاده از سیستم استنتاجی تطبیقی عصبی- فازی پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که روش ANFIS، از دقت و توانایی خوبی برخوردار است. به‌طور کلی نتایج بیانگر آن است که روش ANFIS می‌تواند به‌عنوان یک روش مناسب و مؤثر برای پیش‌بینی رابطه غیرخطی بین ضریب زبری و عوامل مؤثر بر آن، معرفی شود.

¹ Garg & Jothiprakash

² Nastos

³ Kumar

⁴ Moharana & Khatua

حقیقی و زاهدی اصل (۲۰۱۴) در پژوهشی عدم قطعیت از شبکه‌های آبرسانی را با استفاده از نظریه مجموعه فازی NSGA-II را تجزیه و تحلیل کردند. در این پژوهش از روش الگوریتم غیر تحت سلطه مرتب‌سازی ژنتیک (NSGA-II) استفاده شده است. به طور کلی این نتیجه حاصل شد که NSGA-II نقش بزرگی را در حل مشکل سیستماتیک، و بهبود بهره‌وری محاسباتی کل فرآیند آنالیز شبکه فازی ایفا می‌کند.

شماعی و کائدی (۲۰۱۶) غلظت رسوب معلق را با استفاده از مدل‌های انباشته، برنامه‌ریزی ژنتیکی و پیش‌بینی عصبی- فازی برآورد و ارزیابی نمودند. این پژوهش در دو ایستگاه ریو والنسیانو و قوبردا بلانکا در ایالات متحده آمریکا به عنوان مطالعات موردی انتخاب شده است. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که تا حد زیادی آماره‌های RMSE و R^2 برای هر دو ایستگاه مورد مطالعه برای مدل انباشته در مقایسه با استفاده از برنامه نویسی ژنتیک خطی یا عصبی- فازی بهبود بیشتری یافته است.

۲-۲-۵- پیشینه کاربرد برنامه‌ریزی ژن

زکریا و همکاران (۲۰۱۰) بار کل بستر را با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) تخمین زده و تحلیل نمودند. نتایج حاصله نشانگر آن است که GEP با داشتن کمترین خطا از دقت و توانایی خوبی برای برآورد بار بستر برخوردار است.

گوون و تالو^۱ (۲۰۱۰) در بخش‌های مرکزی حوضه آبریز فرات با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و منحنی سنج رسوب، بار رسوب معلق را تخمین زدند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که GEP (روش‌های هوشمند) نسبت به روش منحنی سنج رسوب (روش‌های رگرسیونی) عملکرد بهتری دارد.

¹ Guven & Talu

عظمت‌الله و غنی (۲۰۱۱) به ارزیابی و توسعه منحنی دبی- اشل در رودخانه پاهانگ پرداختند. در این پژوهش از روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) که توسعه‌یافته روش برنامه‌ریزی ژنتیکی (GP) است، استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل GEP نسبت به GP و روش‌های رگرسیونی از عملکرد بهتری برخوردار است.

حشمی^۱ و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی ریزمقیاس‌نمایی آماری بارش با استفاده از سه روش برنامه‌ریزی ژنتیکی (GP)، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) پرداختند. آن‌ها براساس این تحقیق دریافتند که GEP (روش توسعه‌یافته) نسبت به روش دیگر از دقت بالاتر و مراحل آسان‌تری در ریزمقیاس‌نمایی آماری بارش برخوردار است.

گوون و کیسی^۲ (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای به تخمین بار رسوب معلق در رودخانه با استفاده از مقایسه سه روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و تکنیک خطی برنامه‌ریزی ژنتیکی (LGP) پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که GEP با ضریب همبستگی بالاتر و خطای کمتر، به دو روش دیگر ارجحیت دارد.

عظمت‌الله و هاگو^۳ (۲۰۱۲) عمق آبشستگی خروجی از کالورت مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از سه روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و روش رگرسیونی استفاده گردید. به‌طور کلی نتایج نشان داد که روش GEP به دلیل دارا بودن بالاترین ضریب همبستگی و دقت بالا نسبت به دو روش دیگر از برتری بیشتری در تخمین عمق آبشستگی برخوردار است.

کیسی و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقی بار رسوب معلق را در دو ایستگاه هیدرومتری در رودخانه کمبرلند با استفاده از روش‌های مختلف برآورد کردند. آن‌ها ابتدا بار رسوب را با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیکی (GP) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) محاسبه نموده و درنهایت نتایج را با نتایج شبکه عصبی

¹ Hashmi

² Guven & Kisi

³ Azamathulla & Haque

مصنوعی (ANN)، سیستم استنتاجی عصبی- فازی (ANFIS) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) مورد مقایسه قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که برنامه‌ریزی بیان ژن با داشتن بالاترین ضریب همبستگی نسبت به سایر روش‌ها از توانایی قابل قبولی در برآورد بار رسوب معلق برخوردار است.

عظمت‌الله (۲۰۱۳) در فصل دو کتاب الگوریتم‌های فرا ابتکاری در آب، مروری بر کاربرد روش‌های محاسبات نرم در مهندسی منابع آب داشته است. در این فصل چهار روش GEP، LGP، RBF و ANFIS به‌طور کامل معرفی، بررسی و تحلیل شده است. نتایج نهایی تصدیق کننده آن است که از این تکنیک‌های هوشمند می‌توان برای پیش‌بینی متغیرهای هیدرولیکی و هیدرولوژیکی از آنها استفاده نمود.

عظمت‌الله و جرت (۲۰۱۳) به برآورد ضریب زبری مانینگ برای جریان‌هایی با گرادپان بالا پرداختند. در همین راستا آنها از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و شبکه عصبی مصنوعی- تابع پایه شعاعی (RBF-ANN) استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که برنامه‌ریزی بیان ژن به دلیل داشتن دقت بالا از ارجحیت بیشتری نسبت به RBF-ANN در برآورد ضریب زبری برخوردار است.

محمد موسی^۱ (۲۰۱۳) عمق آبشستگی موضعی را در سازه‌های هیدرولیکی با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) مدل‌سازی و بررسی کردند. در این پژوهش سه روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و رگرسیون خطی چندگانه (MLR) به‌منظور مقایسه و ارزیابی استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که GEP نسبت به دو روش دیگر نتایج رضایت‌بخش‌تری در پیش‌بینی عمق آبشستگی پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی از خود نشان داده است.

روشنگر و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی روش‌های مختلف در مدل‌سازی اتلاف انرژی در بالای سرریزها پرداختند. در این تحقیق به‌منظور مدل‌سازی از دو روش هوش مصنوعی شامل روش شبکه عصبی

¹ Mohamed Moussa

مصنوعی (ANN) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) استفاده گردید. نتایج نشان داد که روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی عملکرد قابل قبولی و اعتمادی در پیش‌بینی ائتلاف انرژی بالای سرریزها از خود نشان داده‌اند.

کیسی و همکاران (۲۰۱۳) بارش-رواناب را با استفاده از تکنیک‌های محاسبات نرم مدل‌سازی کردند. در این تحقیق از سه روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم استنتاجی تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS)، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و مدل چند خطی رگرسیون (MLR) در دوره آماری ۱۹۹۱-۱۹۸۷ استفاده شده است. نتایج نشان داد که GEP نسبت به سایر روش‌ها توانایی بهتری در مدل‌سازی بارش-رواناب دارد و می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های هوش مصنوعی و سری زمانی باشد.

مارتی^۱ و همکاران (۲۰۱۳) با هوش مصنوعی به برآورد اکسیژن محلول خروجی در سامانه‌های آبیاری میکرو پرداختند. در همین راستا آن‌ها از سه روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و رگرسیون خطی چندگانه (MLR) استفاده کردند. نتایج نشان داد که GEP نسبت به روش دیگر از دقت بالاتری برخوردار است. همچنین آزمون K می‌تواند به عملکرد مدل کمک کند.

حشمی و شمس‌الدین^۲ (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای برای توسعه طرح پارامتریک جریان منحنی تداوم (FDC) در منطقه اوکلند نیوزیلند از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از GEP برای مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل مناسب‌تر از انتخاب یک مجموعه بزرگ است. همچنین نتایج به دست آمده از روابط توسعه یافته همبستگی بالا با مقادیر مشاهده نشان دادند.

روشنگر و همکاران (۲۰۱۴) به مدل‌سازی بار معلق بستر رودخانه‌ها با استفاده از هوش مصنوعی پرداختند. در این مطالعه از ۲ روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و سیستم تطبیقی استنتاج عصبی-فازی (ANFIS) استفاده شده است. نتایج نشان داد که مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی توسعه یافته

¹ Martí

² Hashmi & Shamseldin

از نتایج دقیق‌تری نسبت به دیگر مدل‌ها برخوردار است. همچنین نتایج بیانگر آن است که آزمون K یک روش عملی است.

شیری و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن، تبخیر و تعرق مرجع روزانه را در ایستگاه‌های ساحلی ایران برآورد کردند. نتایج نشان داد که آزمون K می‌تواند یک انتخاب مناسب جهت جلوگیری از نتایج حدودی و تقریبی باشد. همچنین اگر داده‌های اقلیمی به‌اندازه کافی موجود باشند، نیاز به کالیبراسیون مدل GEP خواهد بود. به‌طور کلی عملکرد مدل GEP به ترتیب زمانی و مکانی دارای نوسان خواهد بود.

اقبال و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی روند توسعه زمانی ابعاد حفره آبستگي اطراف آبشکن بالدار را با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) شبیه‌سازی کرده و نتایج را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه نمودند. به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان از دقت بالا و مناسب GEP در تعیین عمق و ابعاد حفره آبستگي داشت.

روشنگر و همکاران (۱۳۹۳) روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) را برای تخمین میزان آبستگي پایه-های پل در بسترهای با خاک چسبنده و غیر چسبنده مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان بین معادلات موجود، معادله CSU برای بسترهای با خاک چسبنده و معادله Hancu برای بستر با خاک غیر چسبنده نتایج بهتری از خود ارائه کردند. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد که GEP در تخمین عمق آبستگي پایه‌های پل در بسترهای با خاک چسبنده و غیر چسبنده، در مقایسه با معادلات غیر خطی عملکرد مؤثر و کارایی بهتری داشته است.

شیخعلی‌پور و همکاران (۱۳۹۴) روش‌های هوش مصنوعی در برآورد بار معلق رسوب را در رودخانه سیستان مقایسه و تحلیل کردند. در این پژوهش از سه روش هوش مصنوعی شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم تطبیقی عصبی- فازی (ANFIS) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) استفاده شده است. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری از نظر دقت برآورد در بین مدل‌ها وجود ندارد. همچنین نتایج

نشان داد که از نظر سرعت عمل مدل‌ها، مدل سیستم استنتاج تطبیقی عصبی - فازی در جایگاه اول و مدل شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌ریزی بیان ژن در جایگاه بعدی قرار دارند. به‌طور کلی نتایج بیانگر آن است که روش برنامه‌ریزی بیان ژن به دلیل ارائه رابطه ریاضی برای مدل و امکان استفاده آن برای داده‌های آینده و از نظر مدل‌سازی نسبت به دو روش دیگر ارجحیت دارد.

۲-۲-۶- پیشنهاد کاربرد روش مارس

بالی و مهدی‌نژاد (۲۰۱۳) با استفاده از دو حالت مارس به پیش‌بینی زلزله پرداختند. در این پژوهش از دو روش بالمری و غیر بالمری مدل مارس استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که هر دو روش قابل قبول بوده و مدل مارس می‌تواند به عنوان یک روش کارا و مؤثر شناخته شود.

امام‌قلی‌زاده و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و مارس (MARS) ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را بررسی و ارزیابی کردند. همچنین آن‌ها در این مطالعه نتایج مدل GEP و MARS را با دو روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و رگرسیون خطی چندگانه (MLP) مقایسه کردند. نتایج نشان داد که هر دو مدل GEP و MARS می‌توانند برآورد قابل اعتمادی از خود نشان دهد. به‌طور کلی نتایج حاکی از آن است که مدل MARS با ضریب همبستگی بالاتر و خطای کمتر از عملکرد بهتری نسبت به مدل GEP برخوردار است.

با توجه به مطالب فوق‌الذکر و مطالعات انجام شده، می‌توان بیان کرد که تا کنون مطالعه‌ای در زمینه مدل‌سازی رسوب با استفاده از مدل MARS انجام نگرفته است. بنابراین در پژوهش حاضر برای نخستین بار از روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و مدل MARS در رودخانه هراز مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفت.

فصل سوم

مواد و روش انجام

تحقیق

بررسی رسوب‌دهی زیرحوضه‌های یک رودخانه بزرگ و سرشاخه‌های آن، در مسائل 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 بسزایی دارد. انتقال جریان در مسیر رودخانه‌ها همراه با فرسایش و رسوب‌گذاری می‌باشد. بنابراین در مباحث مهندسی منابع آب بررسی مقدار حمل رسوبات رودخانه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مهم‌ترین عامل محدودکننده و تعیین‌کننده عمر مفید سدها و تأسیسات آن‌ها، مقدار رسوبات ته‌نشین و نحوه توزیع آن‌ها در مخزن سد می‌باشد. برای دستیابی به تخمینی نزدیک به واقعیت از میزان رسوبات حمل شده توسط رودخانه‌ها از داده‌های هم‌زمان اندازه‌گیری شده دبی-دبی رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده و نتایج اخذشده با روش‌های آماری مورد تجزیه تحلیل قرار می‌گیرند. طی سال‌های اخیر، محققان از روش‌های هوشمند در پیش‌بینی بار رسوبی معلق رودخانه‌ها استفاده کرده‌اند که در مقایسه با روش‌های مرسوم رگرسیونی از دقت بالاتری برخوردار است.

اندازه‌گیری دائمی دبی رودخانه‌ها در ایستگاه‌های هیدرومتری مخصوصاً در مواقع سیلابی غالباً پرهزینه و مشکل می‌باشد، بدین منظور جهت مدل‌سازی رابطه دبی-اشل مدل‌های ریاضی و هوشمند متعددی توسعه یافته و مورد استفاده قرار می‌گیرد. امروزه شبکه‌های غیرخطی به‌عنوان یکی از سامانه‌های هوشمند در پیش‌بینی یک چنین پدیده‌های پیچیده بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این فصل ابتدا حوضه آبریز و رودخانه هراز آمل معرفی خواهد شد، سپس شرح مختصری از الگوریتم‌ها و عملگرهای آن ارائه می‌گردد و در ادامه روش منحنی سنج، روش فائو، روش برنامه‌ریزی ژن پارامترهای مورد استفاده در استخراج مدل و روش مارس ارائه شده است.

۳-۲- منطقه مورد مطالعه

۳-۲-۱- موقعیت جغرافیایی

منطقه حفاظت شده هراز در موقعیت جغرافیایی $36^{\circ} 09' N$, $52^{\circ} 15' E$ در استان مازندران واقع است. این منطقه با مساحت ۱۵۴۸۱ هکتار از سال ۱۳۸۰ تحت حفاظت قرار گرفت. رودخانه هراز در یک دره نسبتاً عریض به طرف شمال جریان یافته است. رودخانه هراز از یک دره نسبتاً پهن به طرف شمال جریان یافته است و در مسیر آن چندین روستا و محله و حداقل ۸ کارخانه شن و ماسه وجود دارد.

۳-۲-۲- توپوگرافی

حوضه آبخیز هراز دارای وسعت زیادی است و با متوسط آبدهی $31/10$ مترمکعب بر ثانیه، پرآب‌ترین رودخانه مازندران محسوب می‌شود. این حوضه در منطقه شمالی کشور پس از سفیدرود در رتبه دوم قرار دارد که یکی از سه رودخانه پرآب شمال کشور به حساب می‌آید. کمینه ارتفاع حوضه ۳۰۰ متر و بیشینه ارتفاع آن ۵۶۰۰ متر است (کاوین، ۱۳۹۳).

رودخانه هراز به دلیل وسعت حوضه آبخیز و حجم زیاد آب، دومین مخروط افکنه در جلگه ساحلی مازندران است که به لحاظ منابع آب زیرزمینی، حجم، ضخامت آبرفت‌ها و کیفیت آب آن حائز اهمیت فوق‌العاده است. به جز قله دماوند که مرتفع‌ترین قله کشور است، بسیاری از قله مرتفع البرز مرکزی عامل تأمین آب این رودخانه بوده و رژیم برفی- بارانی را برای آن به همراه دارند. بخش‌هایی از نواحی جنوبی آن به دلیل ارتفاع زیاد، خشونت اقلیم، تعدد قله و نقاط کوهستانی، خالی از سکنه است. اما در امتداد دره هراز تا ابتدای مرز استان تهران و همچنین دره رودخانه پنجاب و بلده نقاط جمعیتی و شهرهای کوچکی وجود دارند که درخور توجه است. رودخانه هراز در محدوده کوهستانی، در دره‌ای نسبتاً باریک جریان دارد. شیب رودخانه هراز در محدوده کوهستانی بسیار متغیر است. شیب رودخانه هراز از مرز کوهستان تا شمال شهر آمل سیزده در هزار و در محدوده شهر آمل هفت در هزار می‌باشد.

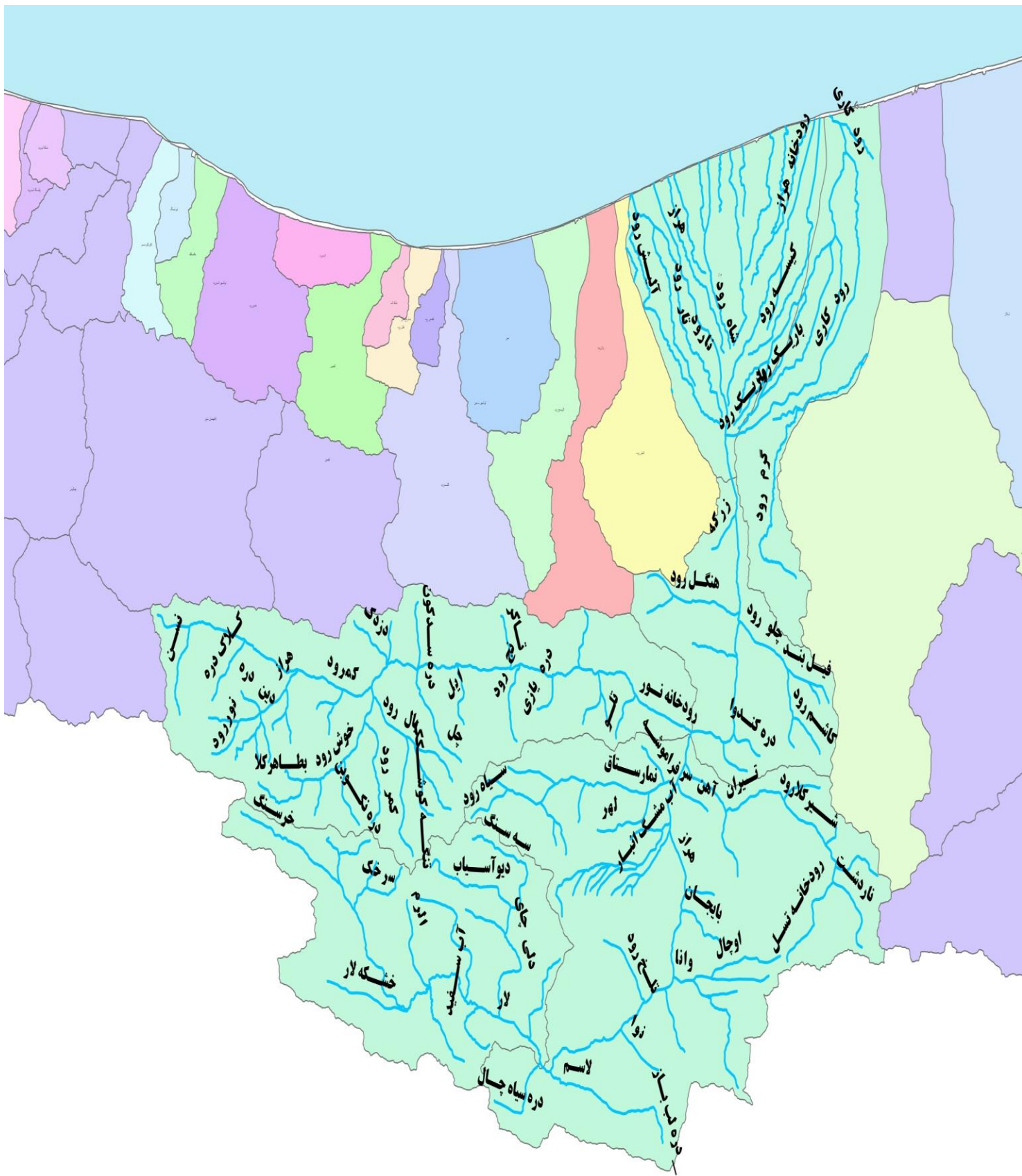
با نزدیک شدن به پهنه ساحلی، پهنای آن پهنای آن افزایش یافته و رودخانه به دلیل افت شیب بستر به چندین شاخه تفکیک می‌گردد. رودخانه هراز آب زراعی کشاورزان آمل، فریدونکنار، بخشی از بابل و نور را تأمین می‌کند. مهم‌ترین شهرهایی که بر روی مخروط‌افکنه رودخانه هراز توسعه یافته‌اند عبارت‌اند از آمل و فریدونکنار. در پیرامون روستای درکه، پهنای دره در حدود ۵۰۰ متر و در محل خروج از کوهستان پهنای مسیر رودخانه هراز به ۱۰۰۰ متر نیز می‌رسد. در محل خروج از کوهستان، رودخانه هراز به ۶ شاخه تقسیم می‌گردد. ریخت‌شناسی رودخانه هراز اگرچه به صورت کلی یک دره-رودخانه است ولی در مجموع ریخت‌شناسی آن تلفیقی از شبکه گیسواری (Braided pattern)، بادزنه‌ای (Fan forming) با چند پیچابه (maender) می‌باشد.

مشخصات رودخانه هراز به شرح زیر می‌باشد:

- پهنه سیلابی بزرگ (بستر کبیر): ۳۰۰ متر
- بستر سیلابی صغیر رودخانه: ۲۰-۳۵ متر
- پهنه سیلابی فعال: ۱۰۰-۱۵۰ متر (بخش‌هایی از این پهنه می‌توانند به صورت متناوب غرقاب شوند).

۳-۲-۳- مسیر و سرچشمه رودخانه هراز

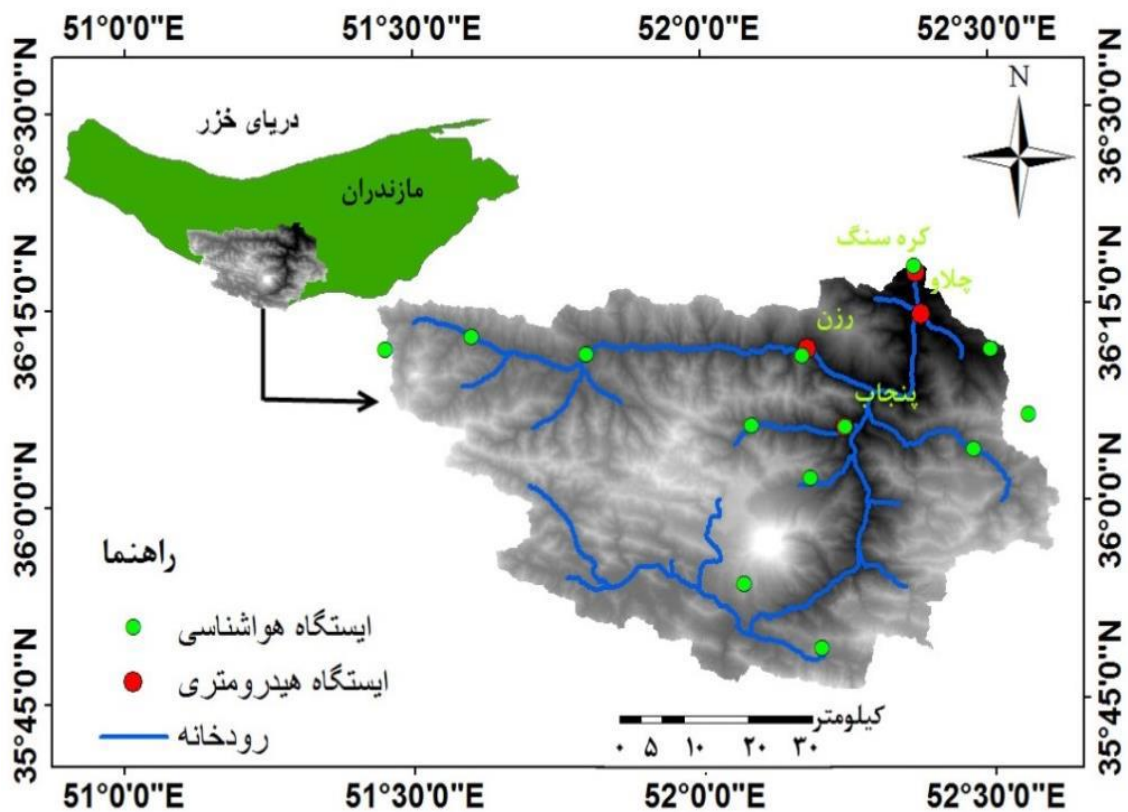
مهم‌ترین سرچشمه رود هراز، از قله ۴۳۷۵ متری پالان گردن در ۶۶ کیلومتری جنوب شرقی چالوس، با نام لار جاری می‌شود و پس از دریافت آب‌های مهم دیگری مثل آب‌سفید، الرم، آب چهل بره، آب-سیاه پلاس، آب امام پهنک، سه سنگ، دیو آسیاب، ورا رود، دلی چای و چشمه ملک و عبور از روستای پلور با نام هراز، به سمت دریای مازندران جاری می‌گردد. البته در راه باز رودها و چشمه‌هایی به آن می‌پیوندند که مهم‌ترین آن‌ها لاسم، تلخ رود، آب ارزان، آب مشک انبار، پنجاب (نمارستاق)، پردمه، شیرکلا رود، چلو رود و هلی چال هستند.



شکل (۱-۳) حوضه آبریز رودخانه هراز

۳-۲-۴- وضعیت هواشناسی و بارندگی حوضه

متوسط بارندگی سالانه از کمینه مقدار ۳۰۲ میلی‌متر در بخش تقریباً مرکزی حوضه تا بیشترین حد ۱۰۶۹ میلی‌متر در بخش شرقی حوضه در نوسان است. همچنین، متوسط دمای منطقه از کمینه مقدار ۵ درجه سانتی‌گراد تا بیشترین مقدار ۲۳/۱ درجه سانتی‌گراد متغیر می‌باشد. متوسط دمای سالانه حدود ۸ درجه سانتی‌گراد محاسبه شده است. متوسط تبخیر سالانه منطقه حدود ۱۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. بیشترین روزهای یخبندان ماهانه متعلق به ماه دی بوده است و بیشترین تعداد روز یخبندان ثبت شده در سال در منطقه، ۱۶۵ روز ثبت شده است و بر اساس تقسیمات آب و هوایی جز مناطق نیمه استپی سرد در ناحیه ایران توران محسوب می‌شود. در منطقه پژوهش، براساس نقشه‌ها و مشخصات آب و هوایی موجود، رژیم حرارتی مزیک تشخیص داده شده است.



شکل (۲-۳) ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری حوضه

۳-۳- الگوریتم‌های تکاملی

مجموعه‌ای از روش‌های ابتکاری که با اشکال متنوع و پیچیدگی‌های مختلف استفاده می‌شوند، تحت نام کلی محاسبات تکاملی می‌باشند. انعطاف‌پذیری در بهینه‌سازی توابع مختلف بیانگر برتری این روش‌ها می‌باشد (خلج، ۱۳۹۰). از انواع الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم ژنتیک می‌باشد که از علم زیست‌شناسی مانند وراثت، جهش، انتخاب ناگهانی، انتخاب طبیعی و ترکیب الهام گرفته‌اند (مطیع‌قادر و همکاران، ۱۳۸۹). این الگوریتم‌ها از لحاظ ساختاری به سه قسمت الگوریتم ژنتیک (GA)، برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) تقسیم‌بندی می‌شوند که تفاوت‌های اساسی آن‌ها به‌صورت زیر برشمرده می‌شوند (فریرا^۱، 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.
- ۲- برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) با افرادی با ساختار شاخه‌ای با اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت است که در مقایسه با GA، مراحل بیشتری را در نظر می‌گیرند.
- ۳- برنامه‌ریزی بیان ژن (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 سامانه‌ها، کروموزوم‌ها به‌وسیله برتری عوامل سببی روی فتوتیپ (ساختار شاخه‌ای) حفظ می‌شوند.

۳-۳-۱- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک در سال ۱۹۶۰ توسط جان هلند^۲ ابداع شد. الگوریتم‌های ژنتیک بر نظریه تکامل داروین^۳ استوار می‌باشد و از این نظریه در سامانه‌های کامپیوتری استفاده می‌کنند. در این روش راه‌حل‌های مسئله در رشته‌هایی با طول ثابت و به‌صورت ۰ و ۱ کدگذاری می‌شوند که کروموزوم

^۱ Ferreira

^۲ John Holland

^۳ Darwin

نام‌گذاری می‌شوند، فرآیند حل مسئله با مجموعه‌ای از این کروموزوم‌ها آغاز می‌شود که به اصطلاح جمعیت اولیه^۱ را تشکیل داده‌اند، و جواب‌های حاصل برای تولید جمعیت بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. انتخاب جواب‌ها از بین کل جواب‌ها (والدین)^۲ به منظور ایجاد جواب‌های جدید (فرزندان)^۳ بر اساس شایستگی با میزان برازش^۴ در دامنه مسئله صورت می‌پذیرد. طبیعی است جواب‌های سازگارتر، شانس بیشتری برای بقا 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؛ کریمی، ۱۳۹۳).

۳-۳-۱-۱- عملگرهای الگوریتم ژنتیک (GA)

عملگرهای الگوریتم ژنتیک عبارت‌اند از عملگر انتخاب و تولیدمثل، عملگر تقاطع (ترکیب)، ترکیب تک نقطه‌ای^۵، ترکیب دونقطه‌ای^۶، ترکیب یکنواخت^۷ و عملگر جهش.

۳-۳-۲- برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)

عملگرهای برنامه‌ریزی ژنتیک عبارت‌اند از عملگر ترکیب، عملگر جهش و عملگر جایگشت.

۳-۳-۳- برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) یک روش نوین در هوش مصنوعی است که در سال ۱۹۹۹ توسط فریرا ابداع گردید. GEP توسعه و گسترش‌یافته روش‌های GA و GP است که در سال ۱۹۹۲ توسط کوزا ابداع شد (عظمت الله و همکاران، ۲۰۱۱).

¹ Population

² Parents

³ Offspring

⁴ Fitness

⁵ Single Crossover

⁶ Two Point Crossover

⁷ Uniform Crossover

در این روش، کروموزوم‌ها ساده و خطی با طول ثابت، شبیه به آن‌هایی که در الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار می‌گیرند و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه و شکل‌های مختلف، شبیه به درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک ترکیب می‌شوند. در نهایت می‌توان گفت که برنامه‌ریزی ژن، ژنوتیپ و فتوتیپ از هم جدا شده و سیستم می‌تواند از تمام مزایای تکاملی بهره‌گیرد. حال آن‌که فتوتیپ در GEP مشابه ساختار شاخه‌ای GP می‌باشد، اما ساختار شاخه‌ای (بیان درختی) در GEP بیان‌گر یک مستقل است. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که در GEP بهینه‌سازی در یک ساختار خطی رخ می‌دهد و سپس به‌صورت ساختار درختی بیان می‌شود. در تولیدمثل تنها ژنوم اصلاح‌شده به نسل بعد انتقال می‌یابد و نیازی به ساختارهای سنگین تکثیر و جهش نباشد (فریرا، ۲۰۰۴).

۳-۳-۱- الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن

در اولین مرحله GEP می‌توان از راه‌حل‌ها جمعیت اولیه را تشکیل داد. سپس کروموزوم‌ها با بیان درختی (ETs) نشان داده می‌شوند. در مرحله بعد کارایی یا میزان سازگاری هر عضو از جمعیت کروموزوم‌ها توسط تابع برازش ارزیابی می‌شود. در حل مسائل به روش GEP نیازی به دانستن دقیق ساختار ریاضی مسائل 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 طبیعت است که پاسخ‌های سازگارتر را بر دیگر پاسخ‌ها ترجیح می‌دهد. در سیستم GEP معیارهای توقف یک و یا ترکیب دلایل زیر می‌باشد:

- معیار دستیابی به هدف: وقتی اختلاف محسوسی بین جواب‌های مطلوب طی چند نسل مشاهده نشود، می‌توان معیاری برای دستیابی به پاسخ بهینه باشد.
- معیار تکرار: اگر پس از تعداد نسل معین، به پاسخ مطلوبی دست یابیم، فرآیند تولید نسل متوقف خواهد شد.

➤ معیار زمان: پس از طی زمان معین، اگر در بهترین جواب حاصل از تولید نسل تغییر و بهبودی ایجاد نشد، محاسبات متوقف می‌شود.

خلاصه‌ای از مراحل اصلی الگوریتم تکاملی ذکر شده را می‌توان در زیر مشاهده کرد:

جمعیت اولیه با تولید تصادفی کروموزوم‌ها آغاز شده، سپس کروموزوم‌های تولید شده در GP و GEP به صورت درختی بیان می‌شوند. پس از آن تابع هدف میزان سازگاری و کارایی هر فرد را ارزیابی کرده و اعضای سازگارتر انتخاب و اصلاح می‌شوند تا نسل بعدی را ایجاد کنند. فرزندان ایجاد شده نیز تحت فرآیند توسعه‌ای قرار گرفته تا جواب خوب و مطلوب پیدا شود (فریرا، ۲۰۰۴).

منظور از تولیدمثل، تکثیر^۱ و اصلاحات ژنتیکی است. تکثیر، حفظ چندین عضو مناسب از نسل حاضر برای نسل بعدی است. بدیهی است که تکثیر تنها نمی‌تواند تغییرات را نشان دهد و این تغییرات ژنتیکی به واسطه عملگرهایی از قبیل جهش، وارونه‌سازی، ترانپس^۲ (IS)، ترانپس جهش^۳ (RIS)، ترانپس ژنی، ترکیب تک نقطه‌ای، ترکیب دونقطه‌ای و ترکیب ژنی^۴ انجام می‌شود (فریرا، ۲۰۰۱).

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

۳-۳-۲- ساختار برنامه‌ریزی بیان ژن

GEP با خلق کروموزوم‌ها و بیان درختی، بینش وسیعی در ایجاد راه‌حل‌های جدید برای محاسبات تکاملی را داراست. لذا به منظور کدگذاری اطلاعات و بیان کروموزوم‌ها، یک زبان جدید موسوم به کاروا^۵ توسط فریرا ابداع شد. همچنین، طراحی ساختار کروموزوم‌ها به گونه‌ای انجام شد که شرایط

¹ Replication

² Insrtion Sequence

³ Root Insrtion Sequence

⁴ Gene Recom Bination

⁵ Karva

ایجاد چندین ژن را فراهم کند که هر یک برای بیان درختی یا برنامه کوچک‌تر کدگذاری می‌شود (فریرا، ۲۰۰۱).

سیستم سلولی GEP به صورت خودکار و بسیار ظریف، مجموعه توابع تعریف‌شده را به کار می‌گیرد (فریرا، ۲۰۰۴). ساختار ساده و درعین حال قابل تغییر ژن‌های GEP، علاوه بر متصور ساختن کدگذاری برنامه‌ها، شرایط تکامل را نیز فراهم می‌سازند. همچنین با ساختاری تطبیق‌پذیر و به‌کارگیری مجموعه‌ای قدرتمند از عملگرهای ژنتیکی، به‌گونه‌ای مناسب فضای راه‌حل را جستجو می‌نمایند. عملگرهای GEP همانند آنچه در طبیعت دیده می‌شود، ساختار صحیح و مناسب را جستجو می‌کنند و به‌طور قابل ملاحظه‌ای منطبق بر تنوع ژنتیکی هستند (فریرا، ۲۰۰۴).

در ساختار فتوتیپ GEP نیز مانند GP، درختان توابع و پایانه وجود دارد، با این تفاوت که در GP فرآیند کدگذاری ژن‌ها وجود ندارد و فتوتیپ و ژنوتیپ دارای یک ساختار هستند، ولی در GEP، فتوتیپ از کدگذاری یک کروموزوم خطی به‌دست می‌آید. به‌عبارتی در GEP ژنوم‌ها کروموزوم‌های خطی هستند و فتوتیپ‌ها، بیان درختی (ET) که به‌صورت مجزا وجود دارند. بیان درختی، تحت کدگذاری از کروموزوم‌ها استنتاج می‌شود. درواقع کروموزوم‌ها تحت انتخاب و عملگرهای ژنتیکی قرار می‌گیرند و بیان درختی میزان سازگاری آن‌ها را نشان می‌دهد (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 چندژنی، تمامی بیان درختی‌های به‌وسیله تابع پیوند^۲، از محل گره ریشه^۳ خود به یکدیگر متصل می‌شوند. هر ژن، یک

¹ Willson

² Linking Function

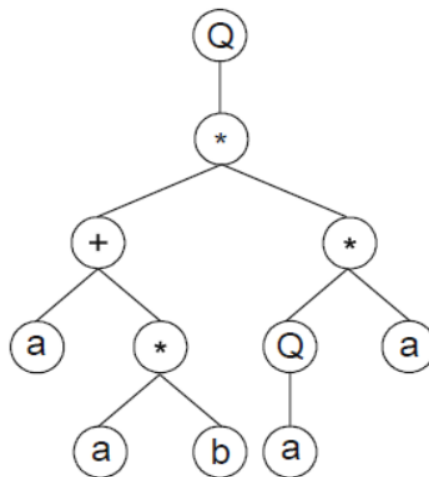
³ Root Node

ناحیه کدگذاری به نام ORF^1 (چارچوب تفسیر باز) یا بیان K دارد که پس از کدبرداری و رمزگشایی به صورت ساختار درختی (ET) بیان می‌شود و نمایش‌دهنده یک راه‌حل برای مسئله است (لوپز و وینرت، ۲۰۰۴).

مثالی برای درک بهتر از نحوه کدگذاری ORF و کدبرداری به شکل ET ارائه شده است. به عنوان مثال روند معکوس، یعنی ترجمه K به صورت بیان درختی ET، به سادگی صورت می‌پذیرد. بیان ORF زیر را در نظر بگیرید.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
Q	*	+	*	a	*	Q	a	a	b	a	(۱-۳)

موقعیت شروع ORF (موقعیت صفر) متناظر با ریشه ET می‌باشد که در مثال فوق، Q می‌باشد. در ادامه، هر تابع به صورت شاخه‌های بسیاری متصل شده است، تا جایی که شناسه توابع وجود داشته باشد. مجموعه زمانی کامل و متوقف می‌شود که یک خط انتهایی که شامل پایانه‌ها (متغیرهای مورد استفاده در یک مسئله) می‌باشد، تشکیل گردد. بیان درختی ET رابطه فوق به شکل زیر است (فریرا، ۲۰۰۱).



شکل (۳-۳) نمودار درختی رابطه (۱-۳)

¹ Open Reading Frame

در GEP طول کروموزومها ثابت است و از یک یا چند ژن با طول مساوی تشکیل شده‌اند، لذا فقط طول ORFs در GEP تغییر می‌کند. با این‌که در GEP محل شروع همیشه اولین نقطه از یک ژن است، ولی نقطه پایان همیشه به آخرین محل یک ژن ختم نمی‌شود. معمولاً برای ژن‌های GEP، نواحی کدگذاری نشده در قسمت بعد از نقطه پایانی وجود دارد. نواحی کدگذاری نشده، ماهیت GEP و قدرت استنتاج آن هستند، چون اجازه اصلاحات و بهینه‌سازی 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 و یک دنباله تقسیم می‌شود. اندازه سر (h)، به وسیله کاربر تعیین می‌شود اما اندازه دنباله (t)، به صورت تابعی از h و پارامتر n محاسبه می‌شود. پارامتر n ، بیشترین تعداد پارامتر مستقل یافت شده در مجموعه توابع مورد استفاده است. رابطه (۲-۳) طول دنباله را با توجه به پارامترهای دیگر تعیین می‌کند (لوپز و وینرت، ۲۰۰۴؛ کریمی دمنه، ۱۳۹۳).

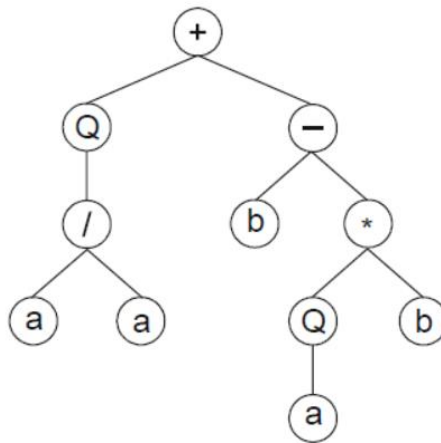
$$t = h(n-1)+1 \quad (2-3)$$

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

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

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
 + Q - / b * a a Q b a a b a a b b a a a b (۳-۳)

و پس از کدبرداری، بیان درختی آن مطابق شکل (۴-۳) خواهد بود.

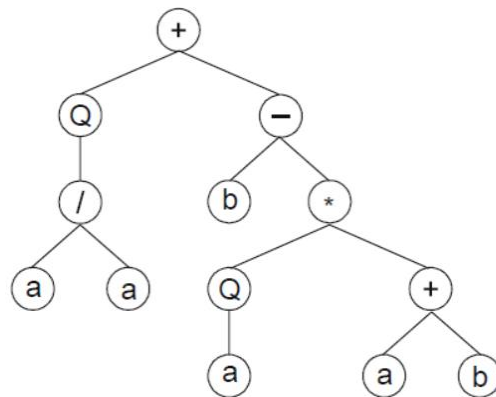


شکل (۴-۳) بیان درختی رابطه (۳-۳)

در این مورد، ORF در موقعیت ۱۰ خاتمه می‌یابد، اما ژن در موقعیت ۲۰ خاتمه می‌یابد که موقعیت کدگذاری نشده را نشان می‌دهد. حال در موقعیت ۹ یک جهش را در نظر بگیرید که سبب تغییر "b" به "+" شده است. پس ژن به‌صورت عبارت (۴-۳) 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
 + Q - / b * a a Q + a a b a a b b a a a b (۴-۳)

شکل (۵-۳) بیان درختی رابطه فوق را نشان می‌دهد.

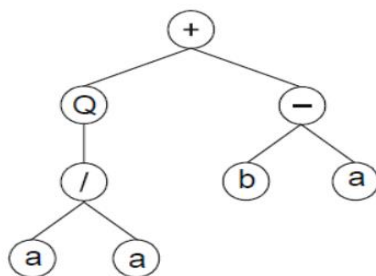


شکل (۵-۳) بیان درختی رابطه (۴-۳)

بر اثر جهش حاصل، موقعیت انتهایی ORF، دو موقعیت به سمت راست جابه‌جا شده است (موقعیت ۱۲). حال اگر در رابطه (۱-۳)، در اثر جهش در موقعیت "*" به "a" تغییر کند، مطابق با رابطه (۵-۳)، طول ORF، به‌جای 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 (۵-۳)
+ Q - / b a a a Q b a a b a a b b a a a b

بیان درختی رابطه فوق به شکل زیر خواهد بود:



شکل (۶-۳) بیان درختی رابطه (۵-۳)

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. ساده‌ترین نوع آن، فقط از یک گره (زمانی که اولین المان از یک ژن پایانه 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 می‌شوند (فریرا، ۲۰۰۱).

۳-۳-۴- تابع برازش

یکی از موارد مهم در برنامه‌ریزی بیان ژن، تعیین تابع برازش به منظور یافتن راه‌حلی است که در تمامی موارد برازش، برای یک خطای معین به خوبی عمل کند. برای برخی کاربردهای ریاضی، استفاده از خطای نسبی یا مطلق کوچک برای یافتن راه‌حل مناسب، مؤثر است. اما اگر محدوده انتخابی بی-نهایت کوچک باشد، جمعیت به کندی استنتاج شده و در نتیجه برای یافتن راه‌حل مناسب ناتوان خواهد بود. به علاوه، اگر محدوده انتخابی وسیع باشد، راه‌حل‌های متعددی با برازش حداکثر ظاهر می‌گردد که از راه‌حل‌های مناسب دور خواهند بود. به منظور رفع این مشکل، یک راه‌حل تکاملی اختراع شده است. که اجازه یافتن راه‌حل مناسب را بدون توقف تکامل می‌دهد. بنابراین، سیستم قادر خواهد به یافتن راه‌حل مناسب با کم‌ترین خطا خواهد بود (فریرا، ۲۰۰۱).

۳-۴- داده‌های مورد استفاده

برای مدل‌سازی روابط دبی-اشل و دبی-دبی رسوب رودخانه هراز آمل به کمک روش برنامه‌ریزی ژن و مارس، اطلاعات مورد استفاده مربوط به سال‌های ۹۲-۱۳۴۲ ایستگاه کره‌سنگ آمل از سازمان آب منطقه‌ای مازندران جمع‌آوری شد. پس از حذف داده‌های مشکوک، ۱۰۶۶ سری داده به مدل‌ها معرفی شد که به‌طور تصادفی ۸۰٪ آن برای آموزش مدل و ۲۰٪ آن برای آزمون مدل معرفی گردید. در جدول زیر، بیشینه و کمینه و میانگین داده‌های مورد استفاده نشان داده شده است:

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

H (cm)			Q _s (ton/dey)			Q _t (m ³ /s)		
max	min	average	max	min	average	max	min	average
۳۲۰	۴	۱۱۰/۱۵۴۱	۱۸۵۷۵۶/۲	۳/۴۲۱	۱۹۵۰۶/۶	۳۲۹/۱۱	۰/۴۶۴	۴۹/۱۰۹

در جدول (۳-۱)، Q_t دبی جریان در واحد مترمکعب بر ثانیه، Q_s دبی رسوب در واحد تن بر روز و H ارتفاع آب در واحد سانتی متر است.

۳-۵- مراحل اجرای مدل

در این پژوهش از روش‌های منحنی سنج رسوب، فائو، رگرسیون خطی چند متغیره، روش برنامه-ریزی بیان ژن و مارس برای مدل‌سازی رابطه دبی-اشل و دبی-دبی رسوب رودخانه هراز آمل استفاده شده و نتایج با یکدیگر مقایسه گردیده است، به منظور اجرای روش رگرسیون خطی چند متغیره از نرم‌افزار Spss، برای روش برنامه‌ریزی بیان ژن از نرم‌افزار Gen Xpro Tools (فریرا، ۲۰۰۱) و برای روش MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines) از نرم‌افزار MARS و Matlab استفاده شد، که در ادامه مراحل پیش‌بینی به کمک این نرم‌افزارها ارائه گردیده است.

۳-۵-۱- روش منحنی سنج رسوب (USBR)

معادله منحنی رسوب به شکل زیر می‌باشد:

$$Q_s = aQ_t^b \quad (۳-۶)$$

ضرایب ثابت از برازش یک رابطه رگرسیونی بین $\log Q_s$ و $\log Q_t$ به دست می‌آید. ضریب a شاخصی از شدت فرسایش است، مقدار بالای آن نشان‌دهنده فرسایش بالای زمین‌شناسی است که انتقال می‌یابد. 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_t دبی جریان و Q_s دبی رسوب می‌باشد.

۳-۵-۲- روش فائو (FAO)

این روش اصلاح شده روش USBR است که در آن شیب خط رگرسیون منحنی سنج رسوب ثابت فرض شده و عرض از مبدأ افزایش می‌یابد تا به نوعی اثر دبی‌های سیلابی لحاظ گردد (ماکنالی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹). این رابطه به صورت ذیل ارائه می‌گردد:

$$Q_s = a' Q_t^b \quad (۷-۳)$$

در رابطه فائو، عرض از مبدأ (a') حاصل تقسیم میانگین دبی بر دبی جریان رودخانه است (ظهیری و همکاران، ۱۳۸۸).

$$a' = \frac{\bar{Q}_s}{\bar{Q}_t^b} \quad (۸-۳)$$

۳-۵-۴- روش رگرسیون خطی چند متغیره

فرمول رگرسیون خطی به شکل زیر تعریف گردید:

$$Q_s = C_0 + a Q_t + b Q_{t-1} + c H_t + d H_{t-1} + e Q_{s-1} \quad (۹-۳)$$

برای به دست آوردن ضرایب C_0, a, b, c, d, e از نرم‌افزار SPSS کمک گرفته شد و پس از وارد کردن داده‌ها در ستون‌های مربوطه در SPSS ضرایب مذکور به دست آمده و در فرمول جایگذاری شده و دبی رسوب محاسبه شد.

SPSS یک برنامه استاتیک و تحلیل داده قوی و قدرتمند است. در نگاه اول SPSS یک صفحه گسترده به نظر می‌آید که سطرها و ستون‌های داده‌ای در آن وجود دارد، که هر ستون نشان‌دهنده یک متغیر می‌باشد، مانند شماره ID یک مشتری یا جمعیت شهر و هر سطر عموماً نشان‌دهنده یک مورد است که می‌تواند یک شخص یا یک شرکت، یک کمپین تبلیغاتی یا هر چیز دیگری باشد.

نکته خوبی که در مورد SPSS می‌توان بیان کرد، این است که مجموعه‌ای از تنظیمات یا ارجاعات را دارد که داده‌ها را به شکلی نشان می‌دهد که برای کاربر جذابیت بیشتری داشته باشد و خروجی سازمان‌دهی شده باشد و به شکلی نشان داده شود که کاربرد بیشتری داشته باشد.

۳-۵-۵- برنامه‌ریزی بیان ژن

۳-۵-۵-۱- تعیین تابع برازش

مقدار کمی که نمایش‌گر کیفیت یک کروموزوم به‌عنوان یک جواب از مسئله است و در مقابل هزینه قرار دارد و میزان شایستگی یک کروموزوم را در بین جمعیت کروموزومی نشان می‌دهد، به‌عنوان تابع برازش شناخته می‌شود. در واقع تابع برازش شاخصی برای انتخاب جفت‌های مناسب و جفت‌گیری آن‌ها در جمعیت کروموزوم‌ها فراهم می‌آورد. فرآیند GEP مانند سایر الگوریتم‌ها زمانی خاتمه می‌یابد که به ضابطه تعیین‌شده‌ای مثل میزان تعیین خطای میانگین کارایی اعضای جمعیت رسیده باشد و یا چرخه فرآیند به تعداد دلخواهی ادامه یافته باشد، در این صورت بهترین راه‌حل یافت‌شده، گزارش داده می‌شود و در غیر این صورت، بهترین راه‌حل از نسل حاضر نگه داشته می‌شود و بقیه راه‌حل‌ها به فرآیند گزینشی واگذار می‌شود که براساس آن بهترین افراد شانس بیشتری برای تولید فرزندان دارند. با تکرار روند ذکرشده و یا پیش‌رفتن 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 به‌وسیله یک محدوده انتخابی و میزان دقت کاوش می‌کند. از لحاظ ریاضی، تابع برازش f_i به‌صورت رابطه (۳-۱۰) بیان می‌شود (فریرا، ۲۰۰۶).

$$f_i = \sum_{i=1}^n \left(R - \left| \frac{P_{ij} - T_j}{T_j} \cdot 100 \right| \right) \quad (10-3)$$

که در آن R محدوده انتخابی، P_{ij} مقدار پیش‌بینی شده به‌وسیله برنامه انفرادی i برای مورد برازش j (از میان n برازش) و T_j مقدار هدف برای مورد برازش j است. عبارت داخل قدرمطلق متناظر با مقدار خطای نسبی است و دقت 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 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 راه‌حل بهینه را پیدا می‌کند. ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط میانگین خطا، به‌عنوان معیار خطای تابع برازش انتخاب شدند.

۳-۵-۲- انتخاب مجموعه پایانه‌ها و مجموعه توابع

مرحله دوم شامل انتخاب مجموعه پایانه‌ها و مجموعه توابع برای ایجاد کروموزوم‌هاست. برای برقراری رابطه بین داده‌های ورودی و خروجی لازم است توابعی تعریف شود، در این تحقیق علاوه بر چهار عمل اصلی $\{+, -, \times, \div\}$ ، 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 پایانه‌ها در بخش سر ژن قرار می‌گیرند و پایانه‌ها در قسمت دنباله قرار دارند.

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

$$Q_s = f(Q_t, H) \quad (۱۱-۳)$$

در رابطه فوق Q_s دبی رسوب، Q_t دبی جریان و H ارتفاع آب است.

۳-۵-۵-۳- انتخاب ساختار کروموزوم‌ها

مرحله سوم ساختار کروموزوم‌هاست. این مرحله شامل تعیین طول سر و تعداد ژن‌هاست. در پژوهش حاضر با سعی و خطا بر روی تعداد کروموزوم‌ها، ژن‌ها و اندازه سر، ساختار کروموزوم‌ها و اندازه دنباله از رابطه (۲-۳) 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 می‌کند. براساس تحقیقات، جمعیت‌های مناسب بین ۲۰ تا ۳۰ کروموزوم دارند. البته بعضی مواقع جمعیت‌هایی با ۵۰ تا ۱۰۰ کروموزوم نیز بهترین جواب را داده‌اند. تحقیقات دیگر نیز نشان داده‌اند که اندازه جمعیت باید براساس 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).

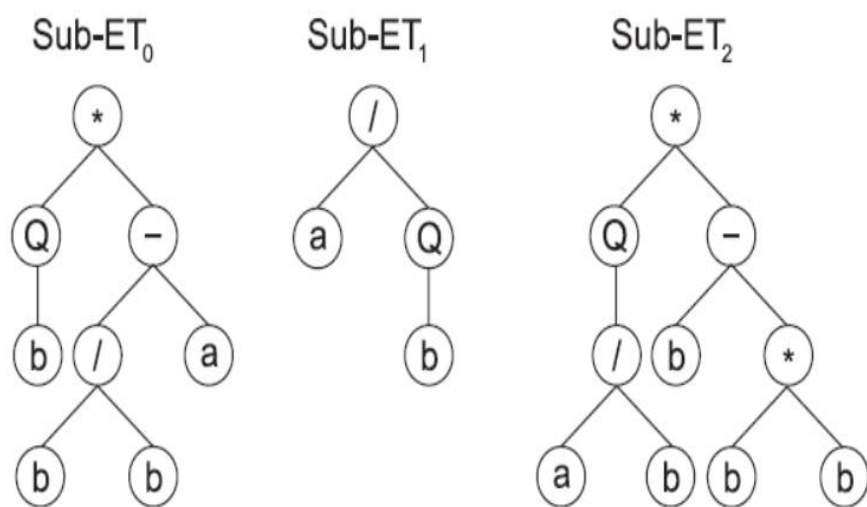
۳-۵-۵-۴- انتخاب تابع پیوند

کروموزوم‌ها در GEP، معمولاً بعد 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 زیر بیان درختی کدگذاری می‌شود. استفاده از کروموزوم‌های چندژنی، جهت استنتاج راه‌حل در مسائل پیچیده مناسب‌تر است، نتایج استفاده از هر دو نوع سامانه‌های تک ژنی و چندژنی، نشان می‌دهد که در اکثر موارد سامانه‌های چندژنی مؤثرتر از سامانه‌های تک ژنی عمل می‌کنند (خلج، ۱۳۹۰).

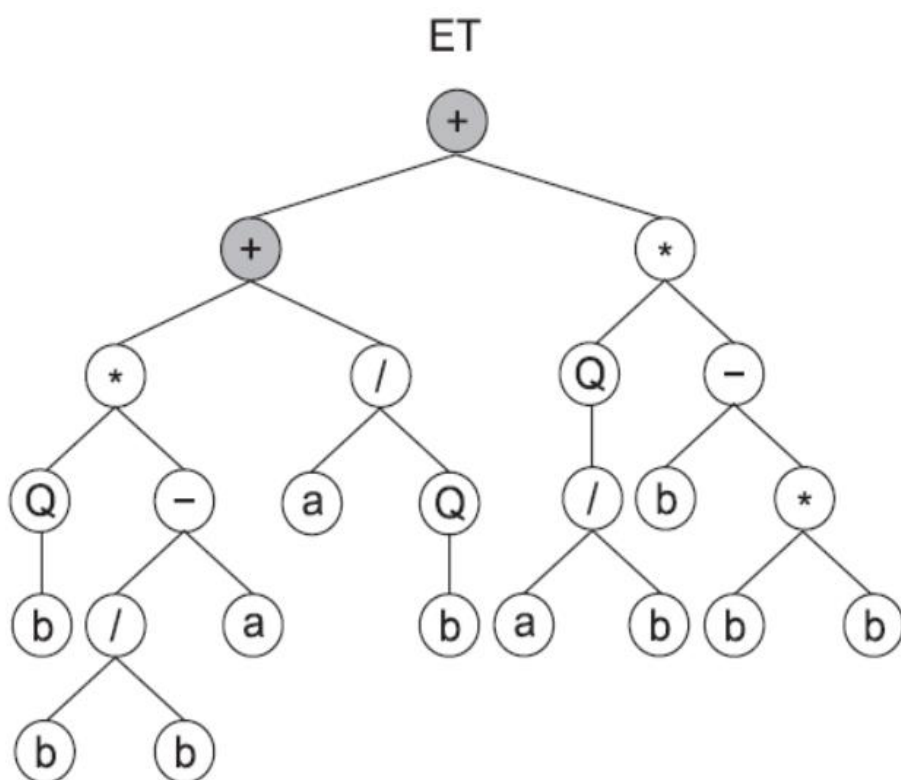
به‌عنوان مثال شکل (۳-۷) نتایج تابع یک سیستم سه ژنی را با رنگ آبی نشان داده است (فریرا،

۲۰۰۶)

(۱)



(۲)



شکل (۷-۳) شماره ۱ کدگذاری سه زن، شماره ۲ پیوند سه زن که در آن تابع پیوند با رنگ تیره نشان داده شده است

۳-۵-۵-۵- 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 خواهد 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 به وجود می‌آیند (مطیع قادر و همکاران، ۱۳۸۹).

به منظور بهبود عملکرد عملگر جهش، می‌توان از تدابیری در آن استفاده کرد. به عنوان مثال می‌توان گرایش عملگر را نسبت به اعضای ضعیف‌تر افزایش داد تا ضمن حفظ خصوصیات اعضای برانده‌تر، شانس جستجو در اعضای ضعیف افزایش یابد. در این الگوریتم‌ها، به دلیل نخبه‌گرایی بر روی بهترین کروموزوم هر نسل جهش انجام نمی‌شود و بهترین جواب بدون هیچ تغییری به نسل بعد انتقال می‌یابد، این امر سبب می‌گردد بهترین جواب نسل حاضر حداقل به خوبی جواب نسل پیشین باشد (کریمی، ۱۳۹۳). عملگر ترکیب، عملگر دیگری است که در GEP مورد استفاده قرار می‌گیرد. در GEP علاوه بر ترکیب تک نقطه‌ای و دونقطه‌ای، ترکیب ژنی نیز کاربرد دارد. نوعی ترکیب است که ژن‌ها به صورت کامل ترکیب می‌شوند. اگرچه در ترکیب تک نقطه‌ای، فرآیند انتخاب و برش به صورت تصادفی شکل می‌گیرد، لذا بیشترین تمایل به تغییر بخش‌های ابتدایی کروموزوم‌ها دیده می‌شود، لذا کیفیت کروموزوم از ابتدا تا انتها به تدریج کاهش می‌یابد. از این رو علاوه بر ترکیب تک نقطه‌ای، ترکیب دونقطه‌ای و ژنی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (خلج، ۱۳۹۰).

در GEP دو عملگر ترانهش یا جابه‌جایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که عبارت‌اند از ترانهش IS و ترانهش RIS (ریشه IS). عامل IS، ردیفی از المان‌ها یا اندازه‌های متغیر است که از یک نقطه شروع و داخل ژنوم انتخاب شده استخراج می‌گردد. در ژنوم مکان دیگری به عنوان نقطه درج انتخاب می‌شود.

این نقطه باید داخل قسمت سر ژن باشد، المان‌های IS از قسمت سر حذف می‌شوند و ساختار تشکیلات حفظ می‌شود. در واقع عملگر IS، ترانهش یافت شده در ساختار ژنوم‌های بیولوژیکی را شبیه‌سازی می‌کند. عملگر RIS نیز مشابه با ترانهش IS عمل می‌کند، با این تفاوت که اولین المان ردیف درج شده، بایستی تابع باشد و نقطه درج نیز می‌بایست اولین المان از ژن (ریشه) باشد (لوپز و وینرت، ۲۰۰۴).

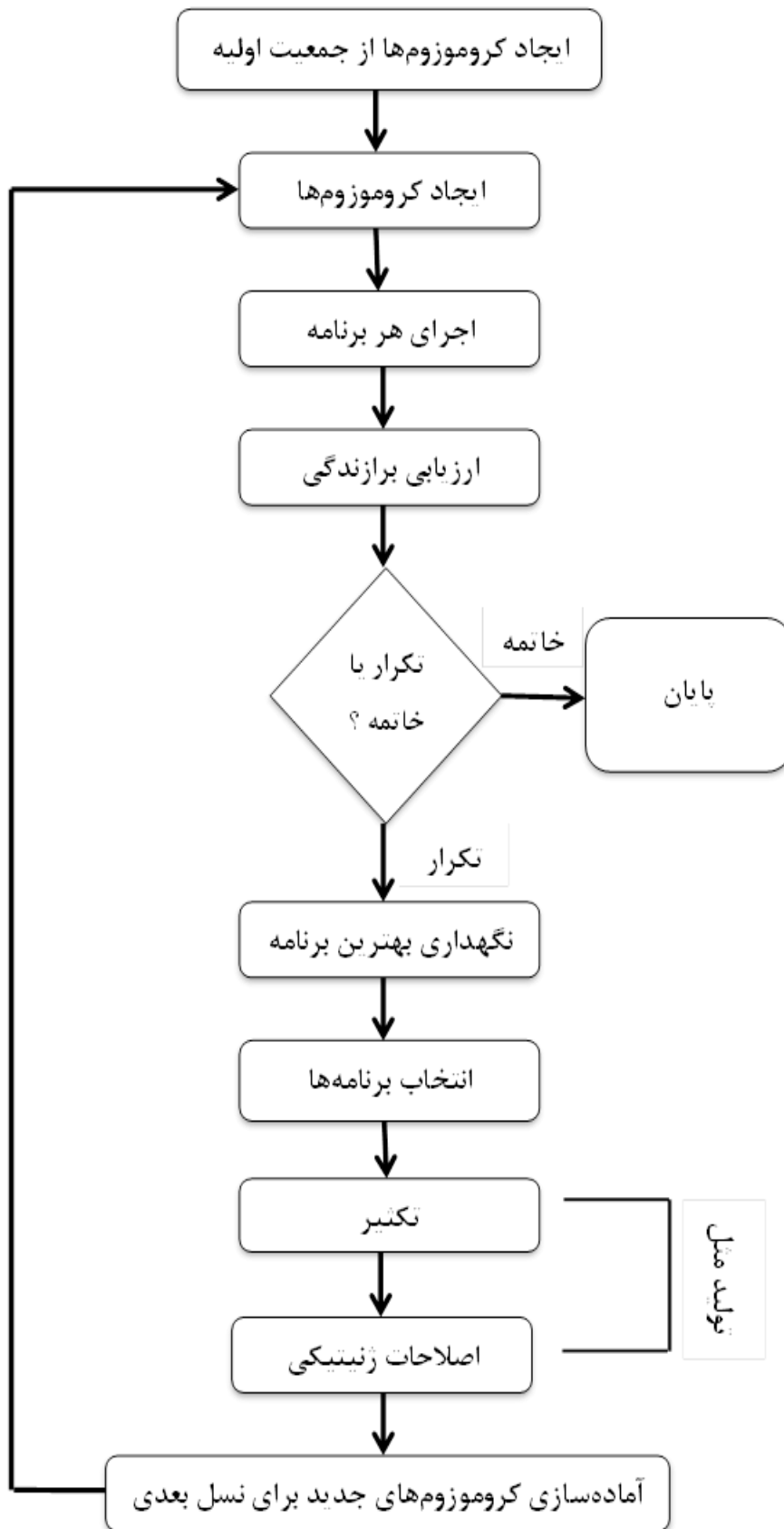
۳-۵-۶- الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن

حل مسئله به کمک GEP از الگوریتم زیر پیروی می‌کند:

- ۱- فرآیند 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، فرآیند تولید نسل متوقف شده و جمعیت موجود به‌عنوان 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 فرآیندهای توسعه‌ای، تکثیر، انتخاب براساس برازندگی یا اصلاحات ژنتیکی قرار می‌گیرند.

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

در (۳-۸) الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن نشان داده شده است (فریرا، ۲۰۰۱).



شکل (۳-۸) الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن

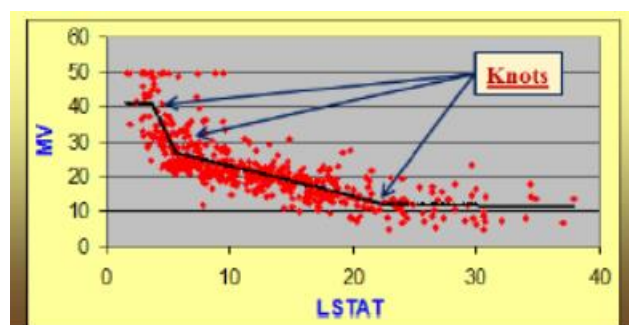
۳-۵-۶- مدل مارس (MARS)

۳-۵-۶-۱- مقدمه مارس

با توجه به متغیر هدف و مجموعه‌ای از متغیرهای نامزد پیش‌بینی، MARS به صورت خودکار تمام جنبه‌های مدل را توسعه داده و در مدل به کار می‌گیرد. از جمله:

- ۱- انتخاب متغیر: جداسازی متغیرهای وابسته از متغیرهای بی‌ربط پیش‌بینی
- ۲- تبدیل متغیرهای پیش‌بینی به یک رابطه غیرخطی باهدف
- ۳- تعیین تعامل بین متغیرهای پیش‌بینی
- ۴- دست‌کاری کردن مقادیر گمشده یا از دست‌رفته به وسیله تکنیک جدید متغیرهای تودرتو
- ۵- انجام گسترده خود آزمونی برای محافظت در برابر پیوندهای اضافی

MARS قادر به جست‌وجوی سریع از طریق تمام مدل‌های ممکن و شناسایی سریع راه‌حل "بهینه" است. MARS در اصل تکنیکی می‌باشد که با ایجاد مدل‌های منعطف به وسیله اتصالات رگرسیون تکه‌ای خطی، غیرخطی بودن یک مدل را از طریق استفاده از دامنه‌های رگرسیون، جداگانه در فواصل مشخصی از تقریب فضای متغیر پیش‌بینی می‌کند. نمونه‌ای از یک رگرسیون تکه‌ای خطی در زیر نشان داده شده است. باید توجه داشت که چگونه شیب خط رگرسیون مجاز برای تغییر از یک فاصله زمانی به زمان دیگر به عنوان دو نقطه از "گره" عبور کرده‌اند.



شکل (۳-۹) مثالی از رگرسیون تکه‌ای خطی

متغیرهای مورد استفاده و نقاط پایان فواصل برای هر متغیر از طریق یک روش جست‌وجوی فشرده سریع بسیار توسعه یافت. MARS نیز علاوه بر جست‌وجوی متغیرهای یک‌به‌یک برای جست‌وجوی تعاملات بین متغیرها، اجازه می‌دهد که هر درجه‌ای از تعامل در نظر گرفته شود.

مدل بهینه MARS در یک فرآیند دومرحله‌ای انتخاب شده است. در مرحله اول، مدل MARS سازه بیش‌ازحد بزرگ را با اضافه کردن "توابع پایه" - مکانیسم رسمی‌ای که توسط آن فواصل متغیر هستند، تعریف می‌کند. توابع پایه نشان‌دهنده تحولات متغیر تک و یا تعامل چند متغیره اصطلاحات به‌عنوان توابع پایه اضافه می‌شوند، مدل منعطف‌تر و پیچیده‌تر تا زمانی که حداکثر تعداد کاربر مشخص از توابع پایه رسیده باشد روند ادامه می‌یابد. در مرحله دوم، توابع پایه به‌منظور حداقل سهم به مدل تا زمانی که بهینه حذف مدل پیدا شود. با اجازه دادن به هرگونه شکل دلخواه برای تابع و همچنین برای تعامل، و با استفاده از روش انتخاب مدل دومرحله‌ای، MARS قادر به ردیابی قابل‌اعتماد اطلاعات بسیار پیچیده است که سازه‌هایی که اغلب در داده بالای بعدی پنهان می‌شوند، انجام دهد.

خروجی MARS شامل استقرار مدل رگرسیون است که می‌تواند به‌سادگی به داده‌های جدید به کار گرفته از درون MARS یا صادر شده به‌عنوان C-، و یا XML - SAS[®] / کد PMML سازگار است. به‌منظور تسهیل در تفسیر مدل، خروجی شامل گزارش خلاصه تفسیری و همچنین دو صادرات و منحنی سه‌بعدی و سطح قطعه است. روش معقول آسان برای تبدیل خروجی MARS تابع پایه به یک تابع اکسل VBA برای (شما می‌توانید از خروجی زبان C به‌عنوان نقطه شروع استفاده کنید) استقرار ساده در داخل یک محیط صفحه گسترده اکسل است. این رویکرد می‌تواند برای هر آزمایش کاربر اولیه مدل خود را قبل از قدرت صنعتی‌تر و یا ابزار سفارشی برای اعزام استفاده گسترده شرکت-های بزرگ مفید باشد.

بیشتر تکنیک‌های مدل‌سازی پیش‌بینی نتایج رضایت‌بخش‌تری دارد اگر داده‌های ورودی به‌درستی تمیز داده شده باشد.

MARS بدون استثنا برای این قاعده کلی است. تمیز کردن داده‌ها شامل تصحیح خطاهای ورود اطلاعات، حل و فصل تناقضات و به‌ویژه، دسته‌بندی، از بین بردن، یا جایگزینی پرت. پرت تک متغیره (به‌عنوان مثال، نسبت نقاط دورافتاده را به یک متغیر تک) می‌تواند از طریق آمار توصیفی ساده تولید شناسایی شود به‌صورت اختیاری در MARS وجود دارد. در پرت چند متغیره نگرانی کمتر است و می‌تواند در اجرا سبد خرید به‌عنوان نقاط دورافتاده شناسایی شود، معمولاً در گره پایانه کوچک جدا شده است. هنگامی که داده‌ها تمیز می‌باشد و آزمون مقدماتی از صحت گذشت، مدل‌سازی MARS می‌تواند شروع شود (توجه: سبد خرید MARS به مشکلات داده مقاوم‌تر است اگر شما نگرانی‌های جدی در رابطه با کیفیت و قابلیت اطمینان داده خود، مطمئن شوید که برای انجام برخی سبد خرید تجزیه و تحلیل است).

۳-۵-۶-۲- مدل‌سازی مجموعه داده‌ها

نکاتی در مورد متغیرهای غیرتبدیلی:

منع تغییرات متغیرها انتخاب معادل گره را منع می‌کند، اگر یک متغیر را در یک شبه گره وارد کنید در حداقل مقدار متغیر داده‌های آموزشی است. تضمینی وجود ندارد که متغیر در مدل نهایی بعد از مرحله حذف عقب نگه داشته شود.

دلایل ممنوع تحولات متغیرهای خاص عبارت‌اند از:

۱. طراح یک قضاوت قابل مقایسه در بخشی که متغیر مقدار پیش‌بینی شده‌ای از مدل‌های دیگری دارد و نیاز به ماندن خطی برای قابل تفسیر است.
۲. اگر تحولات در همه متغیرهای ممنوع است، MARS یک نوع از یک رگرسیون گام‌به‌گام تولید خواهد کرد. از این مدل می‌توان به‌عنوان یک پایه برای اندازه‌گیری از مزایای تحولات استفاده کرد.

۳-۵-۶-۳- هدف از متغیرهای دودویی

در اجرای فعلی، MARS یک روش رگرسیون است، به این معنی که همیشه رفتار هدف به عنوان متغیر پیوسته می باشد. با وجود این، MARS می تواند به طور مؤثر برای تخمین پاسخ باینری (دودویی) مدل، مدل هایی که در آن هدف که معمولاً به عنوان پیش بینی ۰ یا ۱ است. MARS برای این گونه مسائل کدگذاری خواهد شد که به طور معمول فراکسیون بین ۰ و ۱ و در نتیجه می تواند به عنوان احتمال مشاهده شود. با این حال، هیچ چیز مانع از مدل MARS از پیش بینی مقادیر منفی و یا مقادیر بزرگ تر از ۱ نیست. بنابراین، پس از بررسی مدل های پاسخ باینری پیش بینی MARS باید به عنوان نمرات به جای تحت اللفظی احتمالات مشاهده شود.

با در نظر گرفتن موارد فوق، MARS شامل ویژگی هایی برای کمک به مدل سازی پاسخ دودویی است. به استناد آن ها، حالت دودویی لجستیک در گروه نوع تحلیل را انتخاب نمایید.

MARS در حالت باینری لجستیکی، گزارش بر این فرض تولید که هدف یا ۰ یا ۱ یا احتمال بین ۰ و ۱ خواهد بود. با استفاده از یک آستانه به طور پیش فرض از ۰، ۵. MARS تمام مقادیر هدف در نظر (واقعی یا پیش بینی) کمتر از ۰/۵ مربوط به عدم پاسخ و ارزش بیشتر از ۰/۵ به مطابقت به پاسخ. پس از طبقه بندی کلیه مقادیر پیش بینی شده و واقعی یا ۰ یا ۱، یک موفقیت پیش بینی جدول (ماتریس سردرگمی) متقابل طبقه بندی در مقابل پیش بینی تکالیف کلاس واقعی تولید می شود. اغلب برای تنظیم آستانه تقسیم ۰ از ۱ به دست آوردن نتایج معقول لازم باشد. با استفاده از نوار لغزنده پیدا شده در پنجره، پس از پردازش به تغییر آستانه به عنوان مورد نیاز است.

۳-۶- شاخص‌های آماری سنجش مدل‌ها

برای سنجش روش‌های سنج‌ه رسوب، فائو، رگرسیون خطی چند متغیره، برنامه‌ریزی بیان ژن و مارس از معیارهای آماری ضریب همبستگی (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و متوسط خطای میانگین (MAE) استفاده شد. که به ترتیب در روابط (۳-۱۲) تا (۳-۱۴) تعریف شده‌اند:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (۳-۱۲)$$

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

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad (۳-۱۴)$$

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 چہارم

بحث و نتایج

۴-۱- مقدمه

همان طوری که در فصل‌های قبلی اشاره گردید، در پژوهش حاضر هدف برآورد دبی رسوب و دبی جریان می‌باشد. برای برآورد دبی رسوب از روش‌های منحنی سنج رسوب، فائو، رگرسیون خطی، برنامه‌ریزی بیان ژن و مارس برای پیش‌بینی بار رسوب معلق رودخانه هراز آمل استفاده گردیده است. در مدل ارائه شده توسط رگرسیون خطی، GEP و MARS، علاوه بر داده‌های متناظر دبی جریان و دبی رسوب از اطلاعات متناظر ارتفاع آب (اشل) ایستگاه کره‌سنگ آمل نیز بهره گرفته شده است. این در حالی است که بیشتر مدل‌های مشابه، تنها از اطلاعات دبی جریان و دبی رسوب استفاده می‌نمایند و از تأثیر ارتفاع متناظر آب در میزان رسوب‌گذاری چشم‌پوشی می‌کنند. لذا نتایج این تحقیق در دو بخش ارائه شد. در بخش اول به پیش‌بینی دبی رسوب رودخانه و در بخش دوم به برآورد دبی جریان رودخانه و با برقرار کردن آن با اشل رودخانه پرداخته شد.

۴-۲- پیش‌بینی دبی رسوب رودخانه هراز آمل

به‌منظور پیش‌بینی دبی رسوب رودخانه هراز آمل، اطلاعات دبی جریان، دبی رسوب و ارتفاع آب متناظر آن از ایستگاه هیدرومتری کره‌سنگ آمل، مربوط به سال‌های آماری ۱۳۹۲-۱۳۴۴ از سازمان آب منطقه‌ای استان مازندران جمع‌آوری گردید. با توجه به اینکه در همه ماه‌های این سال‌ها، داده اندازه‌گیری شده‌ای وجود نداشته و نواقصی در این سال‌ها وجود داشته است، به‌منظور یکسان‌سازی فضای مقایسه، پس از حذف آمارهای تنها و آمارهای مشکوک دبی جریان، دبی رسوب و ارتفاع آب متعلق به این سال‌های آماری، تعداد ۱۰۶۶ سری داده مورد استفاده قرار گرفت. ۸۰ درصد داده‌های مربوط به این سال‌ها، به‌عنوان آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده، به‌عنوان آزمون در نظر گرفته شد.

۴-۲-۱- روش منحنی سنجه (USBR)

رابطه (۳-۶) که در فصل قبل به آن اشاره شد به صورت زیر می باشد:

$$Q_s = aQ_t^b$$

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

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

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

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

$$a=0.3791, b=2.3428$$

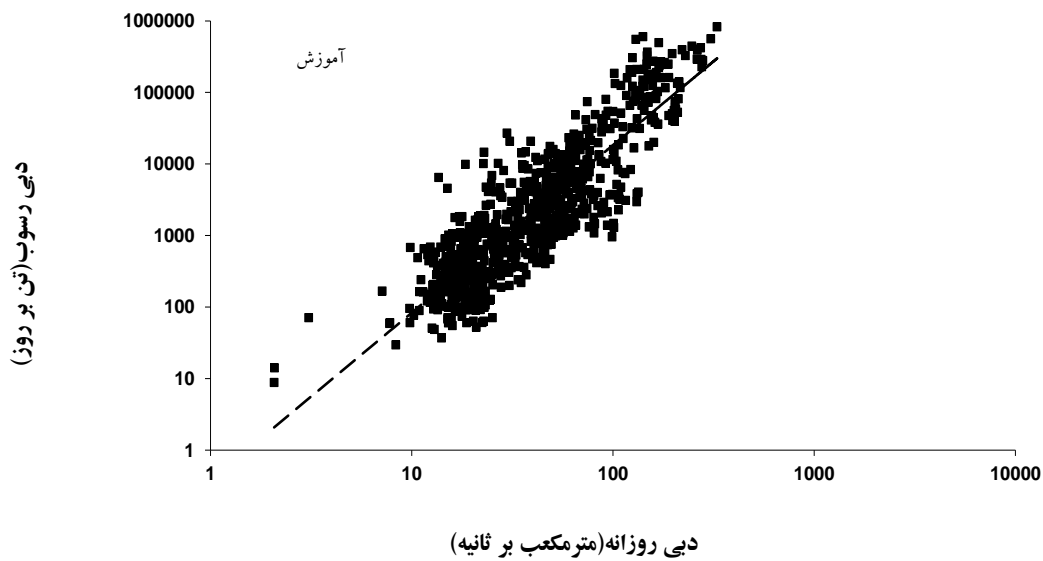
و رابطه USBR برای مرحله آموزش و آزمون به ترتیب در رابطه (۴-۳) تعیین گردید:

$$Q_s = 0.3791Q_t^{2.3428} \quad (۳-۴)$$

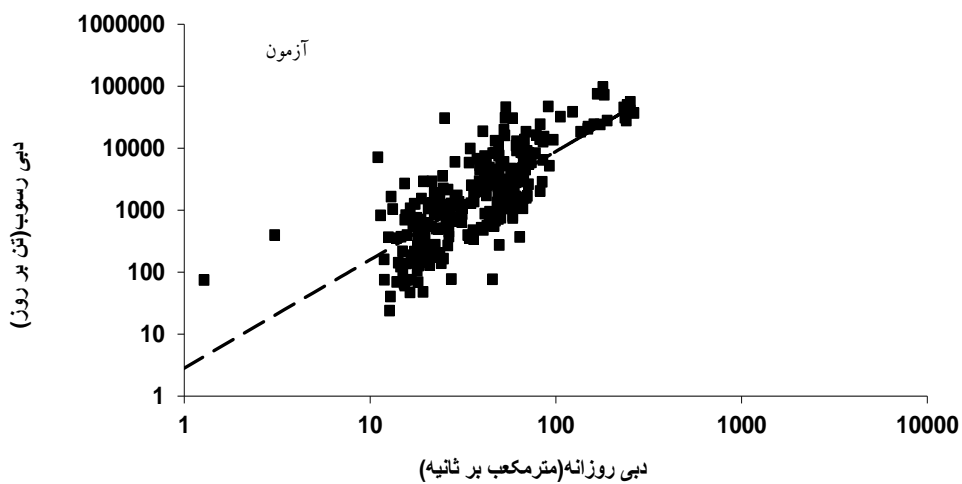
شکل (۴-۱) و (۴-۲) نمودار دبی-دبی رسوب داده های ایستگاه کره سنگ آمل را در مرحله آموزش و

آزمون نشان می دهند. پراکندگی داده ها، تراکم نمونه برداری را در دبی های پایین و نمونه برداری محدود

از دبی های سیلابی را نشان می دهد.

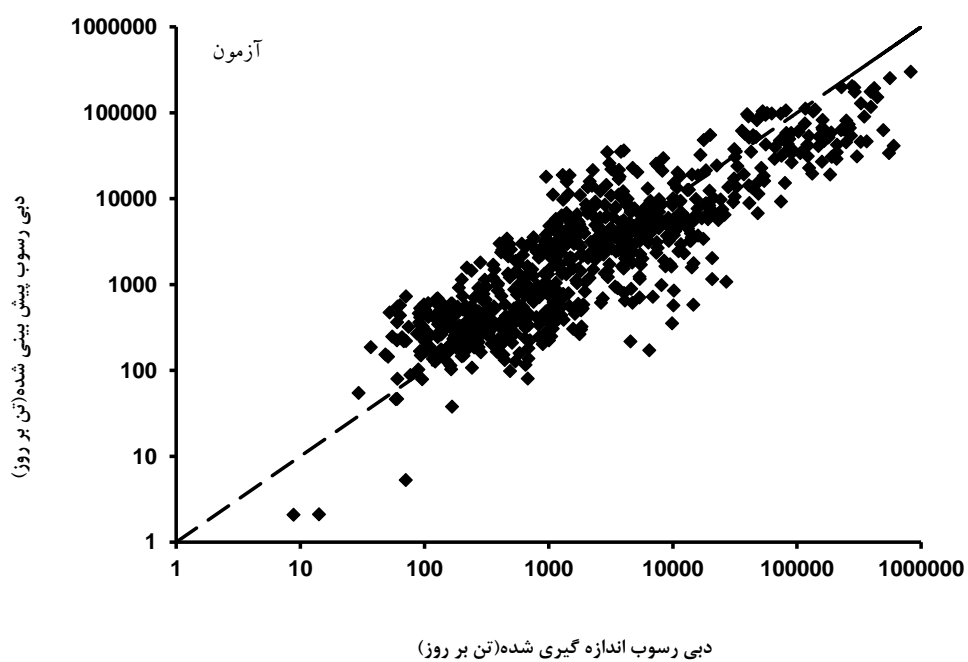


شکل (۱-۴) نمودار دبی-دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری کره سنگ در مرحله آموزش

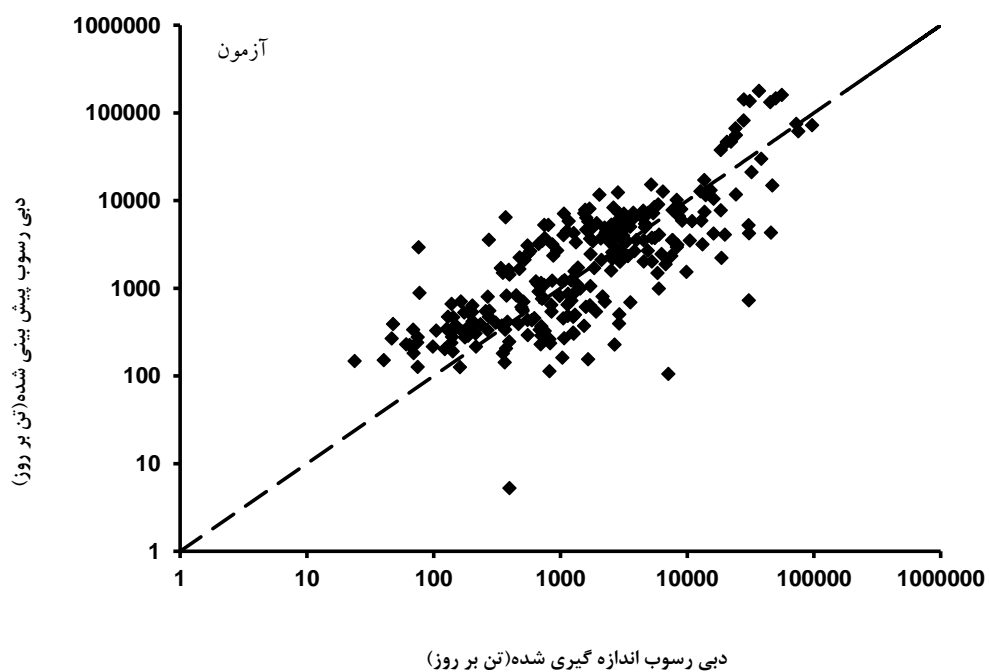


شکل (۲-۴) نمودار دبی-دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری کره سنگ در مرحله آزمون

نتایج برازش رابطه (۳-۴) در دو مرحله آموزش و آزمون در شکل های (۳-۴) و (۴-۴) نشان داده شده است.



شکل (۳-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از منحنی سنج رسوب در مرحله آموزش



شکل (۴-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از منحنی سنج رسوب در مرحله آزمون

جدول (۱-۴) نتایج حاصل از برازش منحنی سنجه رسوب در مرحله آموزش و آزمون

R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	مرحله برازش
0.62	55719.4	15777.6	آموزش
0.49	18116.4	5774.6	آزمون

با توجه به جدول (۱-۴) مشخص شد که ضرایب همبستگی برای رابطه USBR برای مراحل آموزش و آزمون به ترتیب برابر ۰/۶۲ و ۰/۴۹ می باشد که این ضرایب مقادیری نسبتاً پایینی را نشان می دهند. در همین راستا می توان نتیجه گرفت که روش USBR از توانایی قابل قبولی در تعیین بار رسوب معلق برخوردار نمی باشد. هم چنین میزان خطای بالای این روش با جذر میانگین مربعات خطا $555719/42$ (تن بر روز) و $18116/436$ (تن بر روز) به ترتیب در مرحله آموزش و آزمون، دلیل دیگری بر عدم اطمینان به رابطه به دست آمده و تعمیم نتایج می باشد.

۴-۲-۲- روش فائو (FAO)

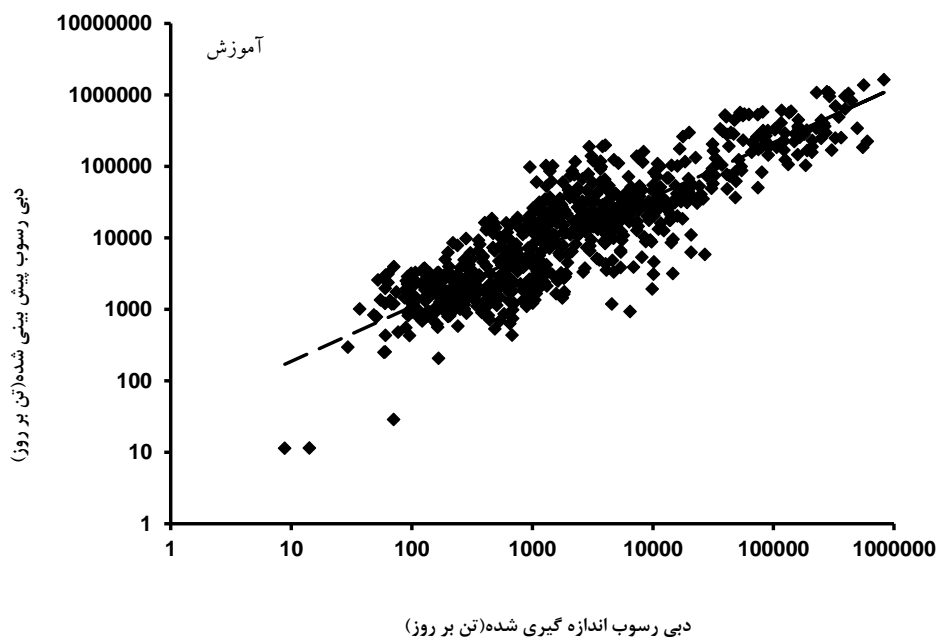
طبق رابطه (۳-۸)، ضریب a' به صورت زیر تعیین گردید:

$$a' = 2366.161$$

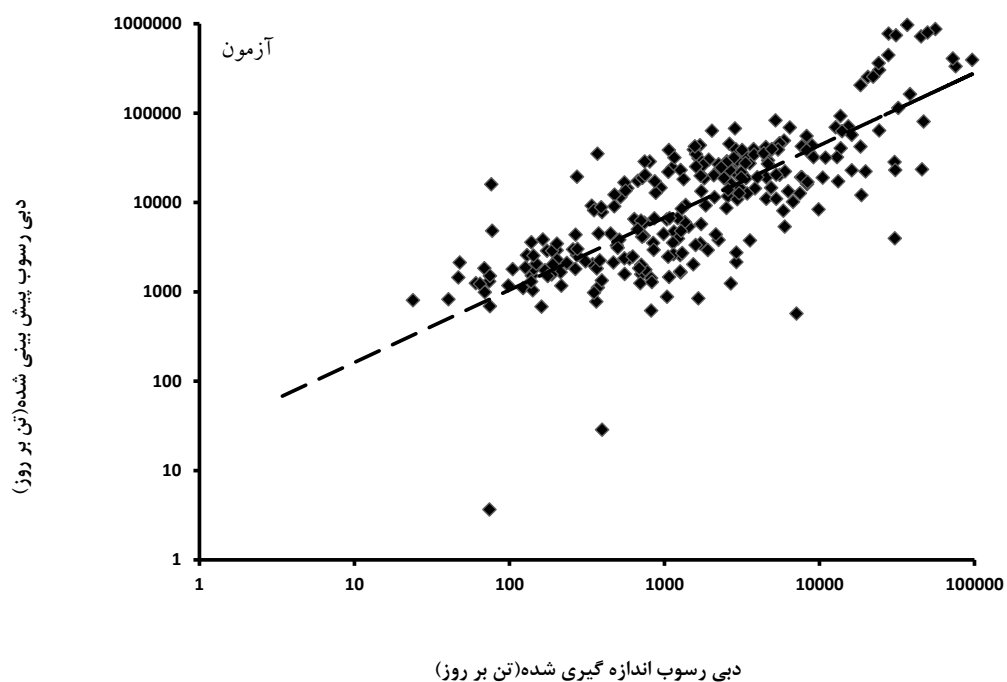
لذا رابطه فائو به صورت رابطه (۴-۴) به ترتیب برای مرحله آموزش و آزمون تعیین شد:

$$Q_s = 2366.161Q_t^{0.573864} \quad (4-4)$$

شکل های (۴-۵) و (۴-۶)، نتایج برازش رابطه فائو برای مرحله آموزش و آزمون و دقت این رابطه را در پیش بینی بار معلق رسوب این ایستگاه نشان می دهد. هم چنین در ادامه میزان خطای محاسبه شده از برازش این رابطه در جدول (۲-۴) ارائه گردیده است.



شکل (۴-۵) نمودار رابطه بین رسوب اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از روش فائو در مرحله آموزش



شکل (۴-۶) نمودار رابطه بین رسوب اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از روش فائو در مرحله آموزش

جدول (۲-۴) نتایج حاصل از برازش رابطه فائو در مرحله آموزش و آزمون

R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	مرحله برازش
0.43	67385.1	28274.5	آموزش
0.52	10517.6	5451.3	آزمون

رابطه فائو با ضرایب همبستگی پایین ۰/۴۳ و ۰/۵۲ و همچنین خطای بالای (تن بر روز) $RMSE=67385/1$ و $RMSE=10517/6$ (تن بر روز) $RMSE = 10517/60.5$ به ترتیب در بخش آموزش و آزمون، در برآورد رسوب معلق، موفق عمل نکرد. نتایج به دست آمده، نشان می‌دهد که دقت ناکافی و خطای نسبتاً بالای این روش در پیش‌بینی بار رسوب معلق می‌باشد.

۴-۲-۳- روش رگرسیون خطی چند متغیره

همان‌طور که در فصل قبل اشاره در این روش به کمک نرم‌افزار SPSS استفاده گردید و روابط بین متغیرها برقرار شده است.

رابطه رگرسیونی که در فصل قبل به آن اشاره شد به صورت تعیین گردید:

$$Q_s = C_0 + a Q_t + b Q_{t-1} + c H_t + d H_{t-1} + e Q_{s-1} \quad (۵-۴)$$

همان‌طور که گفته شد برای به دست آوردن ضرایب C_0, a, b, c, d, e از نرم‌افزار SPSS کمک گرفته شد و پس از وارد کردن داده‌ها در ستون‌های مربوطه در نرم‌افزار SPSS، ضرایب مذکور به دست آمده و به منظور محاسبه دبی رسوب، در رابطه مورد نظر جایگذاری گردید.

به منظور اجرای مدل رگرسیونی، از ۱۶ ترکیب ورودی استفاده شد که در ادامه در جدول (۳-۴) ارائه شده است. واضح است که با تغییر ترکیب‌های ورودی، ضریب همبستگی و خطاها تغییر می‌کند که برای هر ترکیب محاسبه شده است.

ترکیبات ورودی برای مدل رگرسیون خطی به صورت جدول زیر دسته‌بندی گردید:

جدول (۳-۴) ترکیبات ورودی به مدل

ترکیبات	الگو
$Q_s = f(Q_t)$	۱
$Q_s = f(Q_t, H_t)$	۲
$Q_s = f(Q_t, Q_{s-1})$	۳
$Q_s = f(Q_t, H_{t-1})$	۴
$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1})$	۵
$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_t)$	۶
$Q_s = f(Q_t, H_t, H_{t-1})$	۷
$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, Q_{s-1})$	۸
$Q_s = f(Q_t, H_t, Q_{s-1})$	۹
$Q_s = f(Q_t, H_{t-1}, Q_{s-1})$	۱۰
$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_{t-1})$	۱۱
$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_t, H_{t-1})$	۱۲
$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_t, Q_{s-1})$	۱۳
$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_{t-1}, Q_{s-1})$	۱۴
$Q_s = f(Q_t, H_t, H_{t-1}, Q_{s-1})$	۱۵
$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_t, H_{t-1}, Q_{s-1})$	۱۶

با توجه به جدول فوق می‌توان دریافت که در ترکیب اول، همانند روش سنجه و فائو تنها از دبی جریان به‌عنوان ترکیب ورودی استفاده گردید. سپس با هدف دستیابی به پاسخ مطلوب‌تر، در ترکیب دوم از دبی جریان و اشل به‌عنوان ترکیب ورودی استفاده شد. در ترکیب سوم از دبی جریان و دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی (Q_t, Q_{s-1}) ، در ترکیب چهارم از دبی جریان و اشل با یک گام تأخیر زمانی (Q_t, H_{t-1}) و در ترکیب پنجم از دبی جریان و دبی جریان (Q_t, Q_{t-1}) با یک گام تأخیر زمانی به‌عنوان ورودی مدل استفاده شد. مشاهده می‌شود که دبی جریان در همه ترکیب‌های ورودی حضوری ثابت داشته و دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی، اشل و اشل با یک گام تأخیر زمانی، دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی به‌صورتی که مشاهده شده در ترکیب‌های ورودی به‌کار گرفته شده‌اند، که در ترکیب آخر $(Q_t, Q_{t-1}, H_t, H_{t-1}, Q_{s-1})$ همه متغیرها به همراه یک گام تأخیر زمانی در ترکیب ورودی بهره گرفته شد.

۱. در حالت اول، هر سه متغیر بدون نرمال‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

۲. در حالت دوم، متغیرهای Q_t و Q_s به صورت نرمال و متغیر H_t به صورت غیر نرمال مورد استفاده قرار گرفتند.

۳. در حالت سوم، هر سه متغیر نرمال‌سازی شدند.

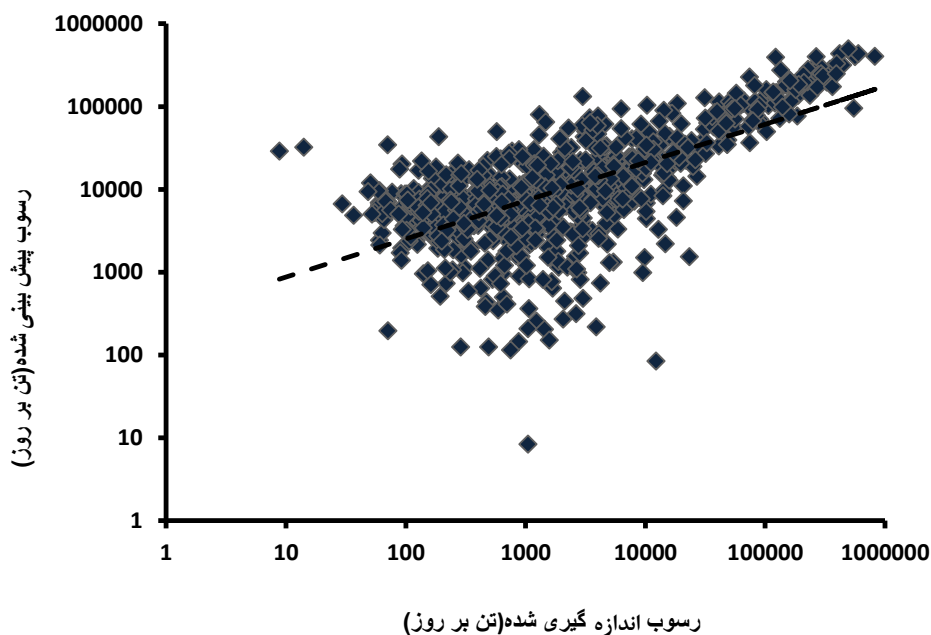
۴-۲-۳-۱- حالت اول ترکیبها

در جدول (۴-۴) ضرایب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین حاصل از ترکیب‌های ذکر شده در حالت اول (حالتی که متغیرها بدون نرمال شدن به کار گرفته شدند) در مراحل آموزش و آزمون، ارائه گردیده است. ترکیبی مطلوب و بهینه است که بیشترین ضریب همبستگی را دارا بوده و کم‌ترین میزان خطا را به خود اختصاص دهد.

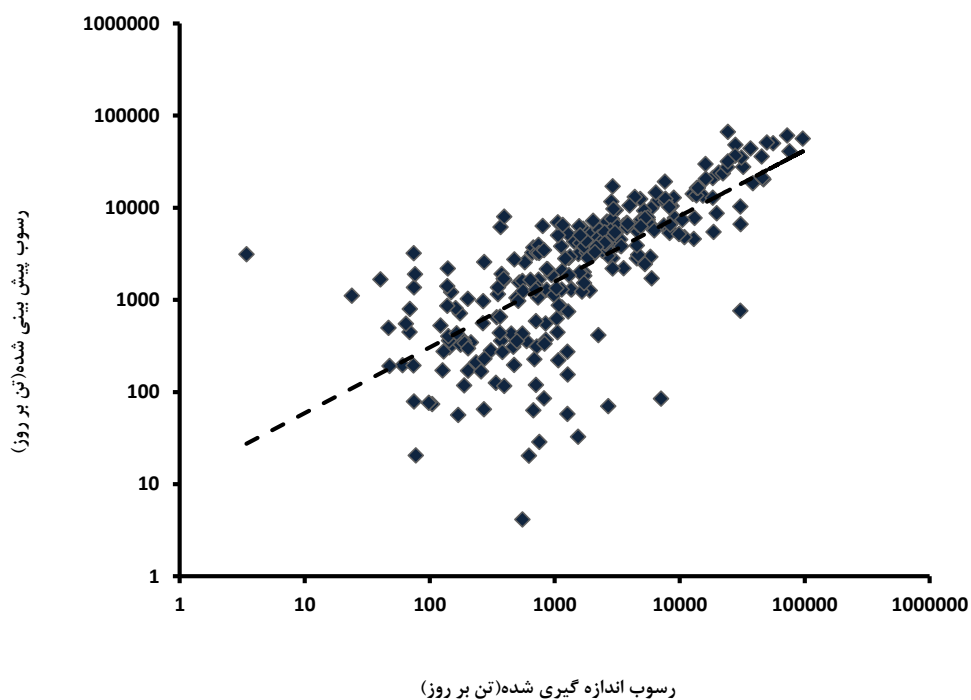
جدول (۴-۴) نتایج ترکیبات رگرسیون در حالت اول

الگو	آموزش			آزمون		
	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
۱	0.53	50921.86	27127.35	0.57	8040.06	4305.13
۲	0.53	50744.14	26173.71	0.58	7978.25	4079.17
۳	0.68	41583.44	18521.16	0.61	17316.22	7302.37
۴	0.53	50710.22	26401.48	0.58	14921.73	4907.8
۵	0.53	50781.76	27067.67	0.57	8008.43	6261.14
۶	0.52	50618.72	26332.69	0.58	7948.04	6017.83
۷	0.55	50691.35	26282.19	0.59	7889.36	6013.69
۸	0.78	35023.81	15231.5	0.61	13662.76	4852.72
۹	0.69	43637.71	18010.2	0.64	19754.43	7008.21
۱۰	0.70	40234.99	17623.78	0.43	35371.7	9301.05
۱۱	0.53	50684.15	26501.12	0.58	7999.63	6422.44
۱۲	0.52	50600.98	26393.58	0.59	7888.31	6018.51
۱۳	0.76	35901.11	15951.47	0.38	15440.08	5978.87
۱۴	0.76	36021.34	16182.59	0.50	21543.87	6860.48
۱۵	0.71	39913.09	17524.4	0.34	30594.61	8723.07
۱۶	0.77	35469.42	15550.4	0.48	20881.68	8746.55

مقایسه و بررسی نتایج جدول (۴-۴)، نشان داد که ترکیب هشتم با ورودی دبی جریان، دبی جریان با یک گام تأخیر و دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی $\{Q_t, Q_{t-1}, Q_{s-1}\}$ ، با دارا بودن ضریب همبستگی ۰/۷۸ و ۰/۶۱، متوسط خطای میانگین ۱۵۲۳۱/۵ (تن بر روز) و ۴۸۵۲/۷۲ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۳۵۰۲۳/۸۱ (تن بر روز) و ۱۳۶۶۲/۷۶ (تن بر روز) به ترتیب در بخش‌های آموزش و آزمون ترکیب بهینه می‌باشد. نتایج نشان داد که ترکیب موردنظر، با دارا بودن ضریب همبستگی ۰/۶۱، در بخش آزمون از توانایی قابل قبول تری در برآورد رسوب معلق برای این حالت برخوردار است و به عبارتی نتایج قابل اطمینان تری در پیش‌بینی بار رسوب معلق ارائه می‌کند. در شکل‌های (۴-۷) و (۴-۸) نتایج حاصل از اجرای ترکیب هشتم در هر دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده شده است.



شکل (۴-۷) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۸ حالت اول در مرحله آموزش



شکل (۴-۸) نمودار رابطه بین رسوب اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۸ حالت اول در مرحله آزمون

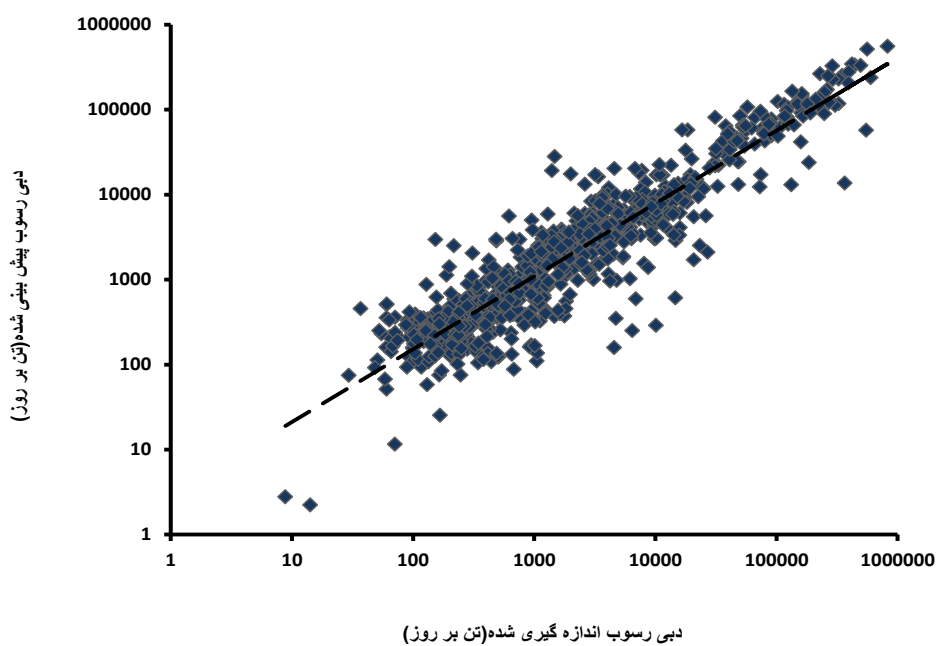
۴-۲-۳-۲- حالت دوم ترکیبها

در جدول (۴-۵) ضرایب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین حاصل از ترکیب‌های ذکر شده در حالت دوم (در حالت دوم، متغیرهای Q_t و Q_s به صورت نرمال و متغیر H_t به صورت غیر نرمال مورد استفاده قرار گرفتند) در هر دو مرحله آموزش و آزمون، ارائه گردیده است. همان طور که پیش تر گفته شد، ترکیبی مطلوب و بهینه است که بیشترین ضریب همبستگی را دارا بوده و کمترین میزان خطا را به خود اختصاص دهد.

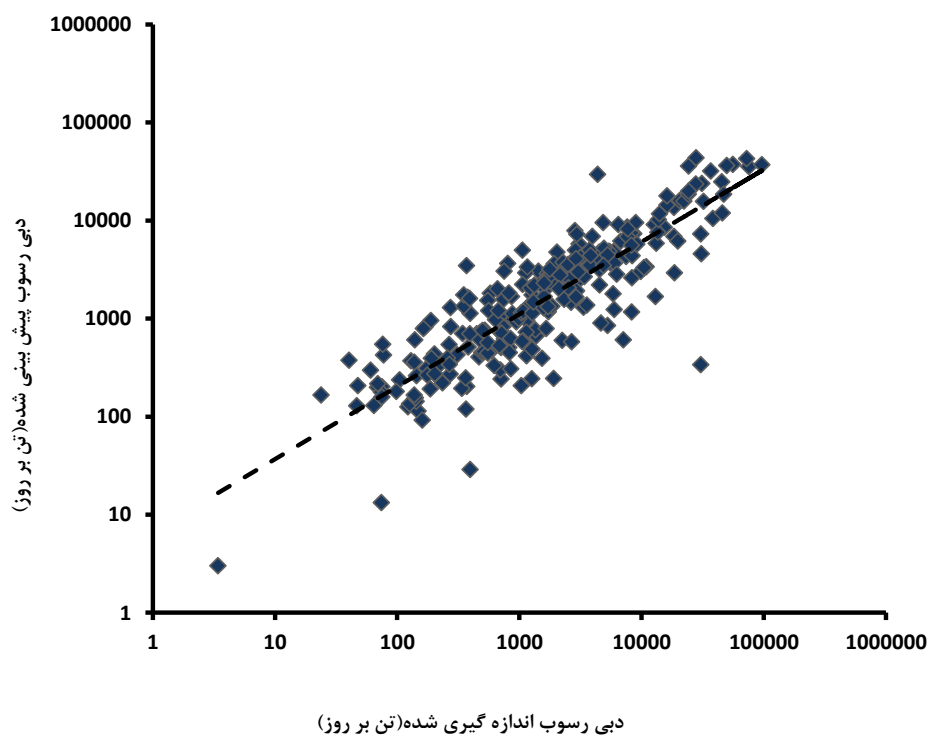
جدول (۴-۵) نتایج ترکیبات رگرسیون در حالت دوم

الگو	آموزش			آزمون		
	R ²	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	R ²	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
۱	0.58	55690.29	15771.63	0.54	22548.25	7038.186
۲	0.38	12809878	1290361	0.53	20752.42	8479.22
۳	0.74	45904.09	12183.26	0.63	12617.44	4375.843
۴	0.57	54486.65	15264.22	0.39	42243.03	9715.215
۵	0.58	15780.49	15780.49	0.50	30557.32	8406.138
۶	0.61	48682.41	14002.03	0.43	33167.61	8334.037
۷	0.65	46915.28	13758.45	0.52	12162.53	4530.310
۸	0.80	38665.03	10127.86	0.67	10332.38	3599.908
۹	0.75	49412.24	13032.30	0.64	12335.83	4352.003
۱۰	0.75	1293613	368881.9	0.65	9143.552	3667.901
۱۱	0.56	56130.10	15656.68	0.40	39892.88	9365.020
۱۲	0.59	48032.95	14054.86	0.40	40380.81	9543.467
۱۳	0.83	36175.92	9385.108	0.68	9014.489	2835.460
۱۴	0.82	44710.95	11867.51	0.21	12698.82	5316.935
۱۵	0.65	52667.98	11856.56	0.62	14584.85	4705.125
۱۶	0.82	57619.45	16363.77	0.60	11444.91	2932.419

بررسی جدول (۴-۵) نشان داد که ترکیب سیزدهم با ورودی دبی جریان، دبی جریان با یک گام تأخیر، اشل و دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی $\{ (Q_t, Q_{t-1}, H_t, Q_{s-1}) \}$ ، با دارا بودن ضریب همبستگی ۰/۸۳ و ۰/۶۸، متوسط خطای میانگین ۹۳۸۵/۱۰۸ (تن بر روز) و ۲۸۳۵/۴۶ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۳۶۱۷۵/۹۲ (تن بر روز) و ۹۰۱۴/۴۸۹ (تن بر روز) به ترتیب در بخش‌های آموزش و آزمون ترکیب بهینه می‌باشد. نتایج نشان داد که ترکیب موردنظر، با دارا بودن ضریب همبستگی ۰/۶۸، در بخش آزمون از توانایی قابل قبول تری در برآورد رسوب معلق برای این حالت برخوردار است و به عبارتی نتایج قابل اطمینان تری در پیش‌بینی بار رسوب معلق ارائه می‌کند. در شکل‌های (۴-۹) و (۴-۱۰) نتایج حاصل از اجرای ترکیب سیزدهم در هر دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده شده است.



شکل (۹-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۱۳ حالت دوم در مرحله آموزش



شکل (۱۰-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۱۳ حالت دوم در مرحله آزمون

۴-۲-۳-۳- حالت سوم ترکیبها

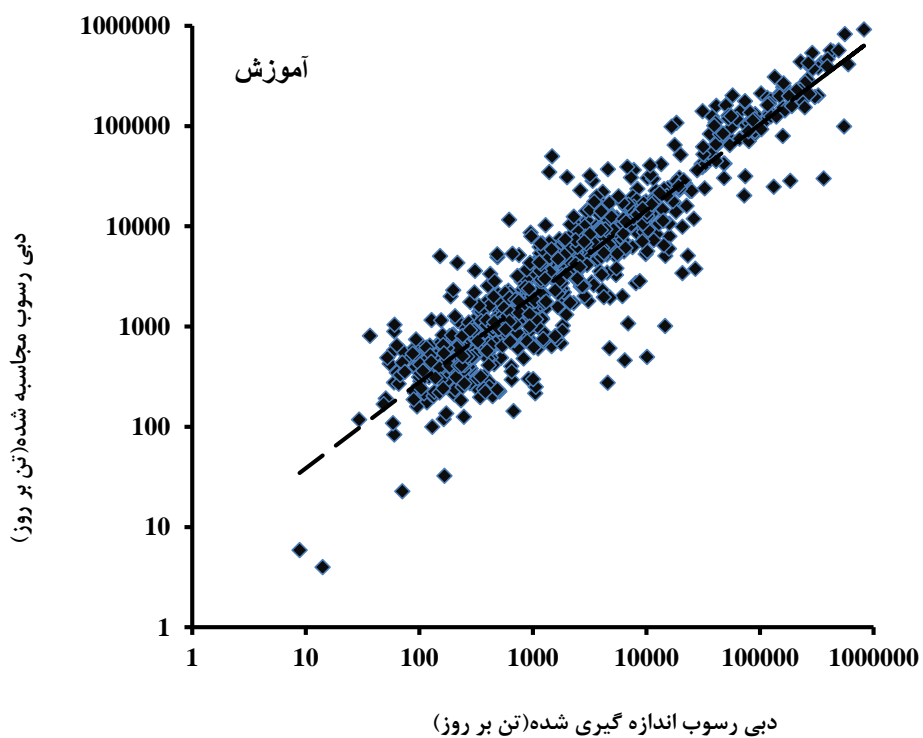
در جدول (۴-۶) ضرایب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین مربوط به حالت سوم، حالتی که سه متغیر نرمال سازی شدند، برای مراحل آموزش و آزمون، ارائه گردیده است. همان طور که پیش تر گفته شد، ترکیبی مطلوب و بهینه است که بیشترین ضریب همبستگی را دارا بوده و کمترین میزان خطا را به خود اختصاص دهد.

جدول (۴-۶) نتایج ترکیبات رگرسیون در حالت سوم

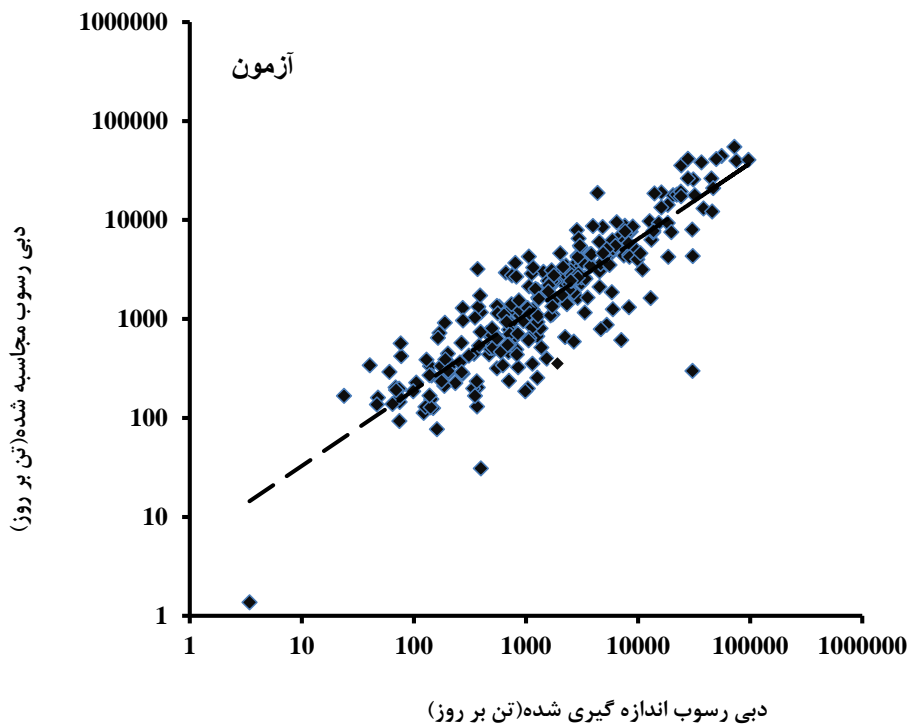
آزمون			آموزش			الگو
R ²	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	R ²	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	
0.54	22548.2	7038.1	0.58	55690.2	15771.6	۱
0.46	14940.9	5034.6	0.53	74202.5	16992.4	۲
0.63	12617.4	4376.3	0.74	45903.6	12175.8	۳
0.52	26114.1	7556.6	0.58	55680.4	15774.3	۴
0.50	30557.3	8406.6	0.62	55771.6	15773	۵
0.42	34130.8	8471.2	0.60	55553.5	15695.1	۶
0.41	37294.9	8945.3	0.59	55321.6	15701.5	۷
0.67	10332.3	3600.3	0.80	35126.3	11032.3	۸
0.63	12436	4330.9	0.75	39486.5	10578.6	۹
0.64	13304.6	4573.1	0.75	45122.8	12124.5	۱۰
0.42	21172.3	6150.5	0.62	55731.7	15773.4	۱۱
0.45	21419.9	6168.2	0.55	55269.8	15659.4	۱۲
0.68	43716.7	5675.9	0.81	38717.9	10112.1	۱۳
0.65	8462.8	3186.3	0.82	38816.2	10201.6	۱۴
0.00	609192.7	41009.7	0.55	49977.9	11883.1	۱۵
0.71	7850.8	2796.4	0.82	33133.7	9257.6	۱۶

بررسی جدول (۴-۶) مشخص می کند که ترکیب ۱۶ با تمام پارامترها به همراه یک گام تأخیر زمانی - شان، یعنی دبی جریان و دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی، اشل و اشل با یک گام تأخیر زمانی و دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی $\{Q_t, Q_{t-1}, H_t, H_{t-1}, Q_{s-1}\}$ به عنوان ورودی مدل، با دارا بودن ضریب همبستگی ۰/۸۲ و ۰/۷۱، متوسط خطای میانگین ۹۲۵۷/۶ (تن بر روز) و ۲۷۹۶/۴ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۳۳۱۳۳/۷ (تن بر روز) و ۷۸۵۰/۸ (تن بر روز) به ترتیب در بخش های آموزش و آزمون ترکیب بهینه می باشد. نتایج نشان داد که ترکیب موردنظر، با دارا بودن ضریب همبستگی ۰/۷۱، در بخش آزمون از توانایی قابل قبول تری در برآورد رسوب معلق برای این حالت

برخوردار است و به عبارتی نتایج قابل اطمینان تری در پیش بینی بار رسوب معلق ارائه می کند. در شکل های (۱۱-۴) و (۱۲-۴) نتایج حاصل از اجرای ترکیب شانزدهم در هر دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده شده است.



شکل (۱۱-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۱۶ حالت سوم در مرحله آموزش



شکل (۴-۱۲) نمودار رابطه بین رسوب اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۱۶ حالت سوم در مرحله آزمون

۴-۲-۳-۴- مقایسه ترکیب های برتر سه حالت ذکر شده برای رگرسیون خطی چند متغیره

در جدول (۴-۷) مقایسه نتایج ترکیب های برتر در سه حالت ذکر شده را شاهد هستیم، که ضریب همبستگی، متوسط خطای میانگین و جذر میانگین مربعات خطا در مرحله آموزش و آزمون ارائه گردیده است.

جدول (۴-۷) مقایسه نتایج ترکیب برتر رگرسیون در سه حالت ذکر شده

R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	مرحله اجرا	الگو
0.78	35023.81	15231.5	آموزش	ترکیب ۸ حالت اول
0.61	13662.7	4852.7	آزمون	
0.83	36175.9	9385.1	آموزش	ترکیب ۱۳ حالت دوم
0.68	9014.4	2835.4	آزمون	
0.82	33133.7	9257.6	آموزش	ترکیب ۱۶ حالت سوم
0.71	7850.8	2796.4	آزمون	

مطابق جدول (۷-۴) مشخص گردید که، ترکیب ۱۶ $\{ (Q_t, Q_{t-1}, H_t, H_{t-1}, Q_{s-1}) \}$ حالت سوم (حالتی که، هر سه متغیر نرمال سازی شدند) با ضریب همبستگی ۰/۸۲، متوسط خطای میانگین ۹۳۸۵/۱ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۳۶۱۷۵/۹ (تن بر روز) در مرحله آموزش، عملکرد بهتری را دارا بوده است و با ضریب همبستگی ۰/۷۱، متوسط خطای میانگین ۲۷۹۶/۴ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۷۸۵۰/۸ (تن بر روز) در مرحله آزمون می باشد و این نشان دهنده توانایی قابل قبولی در برآورد رسوب معلق در این بخش برخوردار است و به عبارتی نتایج قابل اطمینان تری در پیش بینی بار رسوب معلق ارائه می کند.

۴-۲-۴- برنامه ریزی بیان ژن (GEP)

با توجه به آن چه که اشاره شد، روش های متداول به دلیل دقت کم و خطای بالا در تعیین بار رسوب معلق، از عدم قطعیت برخوردار هستند. در این بخش از پژوهش حاضر از روش برنامه ریزی ژن (GEP) برای پیش بینی بار رسوب معلق رودخانه هراز آمل بهره گرفته شده است. باهدف یکسان سازی فضای مقایسه و صحت اجرا، پارامترهای GEP به طور همسان تعیین شدند که به طور خلاصه در جدول (۸-۴) ارائه گردیده است.

یکی از برتری های روش برنامه ریزی بیان ژن (GEP) در مقایسه با دیگر روش های هوشمند از جمله شبکه عصبی مصنوعی، قابلیت برقراری رابطه ریاضی بین پارامترهای مستقل و وابسته است. در این پژوهش، پس از تعیین بهترین گزینه، یک رابطه ریاضی برای پیش بینی بار رسوب معلق ارائه گردید. هم چنین بیان درختی رابطه مذکور نیز شرح داده شد.

جدول (۴-۸) مقادیر پارامترهای برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی بار رسوب معلق

مقدار	پارامتر
۸	اندازه سر (Head Size)
۳۰	تعداد کروموزوم (Number of Chromosomes)
۳	تعداد ژن‌ها در هر کروموزوم (Number of Genes)
۰/۰۴۴	نرخ جهش (Mutation Rate)
۰/۱	نرخ وارون سازی (Inversion Rate)
۰/۳	نرخ ترکیب تک‌نقطه‌ای (One-Point Recombination Rate)
۰/۳	نرخ ترکیب دونقطه‌ای (Two-Points Recombination Rate)
۰/۱	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)
RRS ¹	معیار خطای تابع (Fitness Function Error Type)
جمع (+)	تابع پیوند (Linking Function)

به‌منظور اجرای مدل برنامه‌ریزی ژن، از ۱۶ ترکیب ورودی که در جدول (۴-۹) 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 (۴-۹) ترکیبات ورودی به مدل

الگو	ترکیبات	اندازه دنباله
۱	$Q_s = f(Q_t)$	۱
۲	$Q_s = f(Q_t, H_t)$	۹
۳	$Q_s = f(Q_t, Q_{s-1})$	۹
۴	$Q_s = f(Q_t, H_{t-1})$	۹
۵	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1})$	۹
۶	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_t)$	۱۷
۷	$Q_s = f(Q_t, H_t, H_{t-1})$	۱۷
۸	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, Q_{s-1})$	۱۷
۹	$Q_s = f(Q_t, H_t, Q_{s-1})$	۱۷
۱۰	$Q_s = f(Q_t, H_{t-1}, Q_{s-1})$	۱۷
۱۱	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_{t-1})$	۱۷
۱۲	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_t, H_{t-1})$	۲۵
۱۳	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_t, Q_{s-1})$	۲۵
۱۴	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_{t-1}, Q_{s-1})$	۲۵
۱۵	$Q_s = f(Q_t, H_t, H_{t-1}, Q_{s-1})$	۲۵
۱۶	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_t, H_{t-1}, Q_{s-1})$	۳۳

در ترکیب اول همانند روش‌های رگرسیونی، تنها از دبی جریان به‌عنوان ورودی مدل استفاده گردید و این پارامتر در همه ترکیب‌های ورودی حضوری ثابت داشته است. همان‌طور که قبل‌تر اشاره شد برای دستیابی به پاسخ مطلوب‌تر در ترکیب دوم، پارامتر اشل نیز به‌عنوان ورودی مدل استفاده شد. در ترکیب سوم از دبی جریان و دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی (Q_t, Q_{s-1}) به‌عنوان ورودی مدل استفاده گردید. در ترکیب چهارم، پارامتر اشل با یک گام تأخیر زمانی (Q_t, H_{t-1}) ، جایگزین دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی در ترکیب سوم شد. در ترکیب پنجم، از دبی جریان و دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی (Q_t, Q_{t-1}) به‌عنوان ورودی مدل استفاده شد. در ترکیب‌های ششم تا یازدهم از ۳ پارامتر ورودی به مدل بهره گرفتیم، به‌طوری‌که دبی جریان در همه ترکیب‌ها ثابت و دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی، اشل، اشل با یک گام تأخیر زمانی و دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی به‌تناسب در ترکیب‌ها به‌کار گرفته شدند. ترکیب‌های دوازدهم تا پانزدهم دارای ۴ پارامتر ورودی هستند که به‌تناسب به‌عنوان ورودی مدل معرفی گردیدند. ترکیب شانزدهم که تمامی پارامترها در آن حضور دارند، دبی جریان، دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی، اشل، اشل با یک گام تأخیر زمانی و دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی $(Q_t, Q_{t-1}, H_t, H_{t-1}, Q_{s-1})$ به‌عنوان ورودی مدل معرفی و مورد استفاده قرار گرفتند.

ترکیب‌های فوق با توجه به مطالعات محققانی چون آیتک و کیسی (۲۰۰۸)، گوون و ارسین تالو (۲۰۱۰) و کیسی (۲۰۱۱) انتخاب گردیده‌اند. می‌توان به پژوهش کریمی و همکاران (۱۳۹۳) نیز اشاره کرد.

۱۶ ترکیب ذکرشده در ۳ حالت مختلف مورد استفاده قرار گرفت که به شرح زیر می‌باشد:

۱. در حالت اول، هر سه متغیر بدون نرمال‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند.
۲. در حالت دوم، متغیرهای Q_t و Q_s به‌صورت نرمال و متغیر H_t به‌صورت غیر نرمال مورد استفاده قرار گرفتند.

۳. در حالت سوم، هر سه متغیر نرمال سازی شدند.

۴-۲-۴-۱- حالت اول ترکیبها

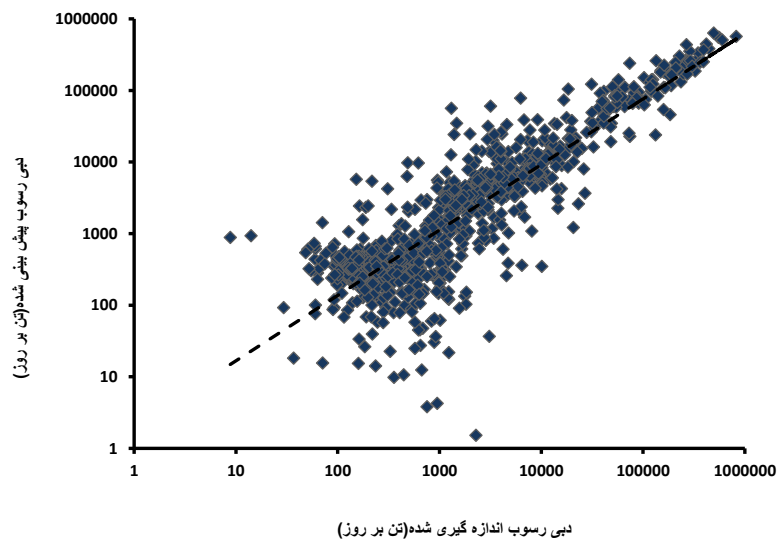
در جدول (۴-۱۰) ضرایب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین حاصل از ترکیبهای مذکور در حالتی که متغیرها بدون نرمال شدن به کار گرفته شدند، در مراحل آموزش و آزمون، ارائه گردیده است. همانطور که پیش تر گفته شد، ترکیبی مطلوب و بهینه است که بیشترین ضریب همبستگی را دارا بوده و کمترین میزان خطا را در هر دو مرحله به خود اختصاص دهد.

جدول (۴-۱۰) نتایج ترکیبات GEP در حالت اول

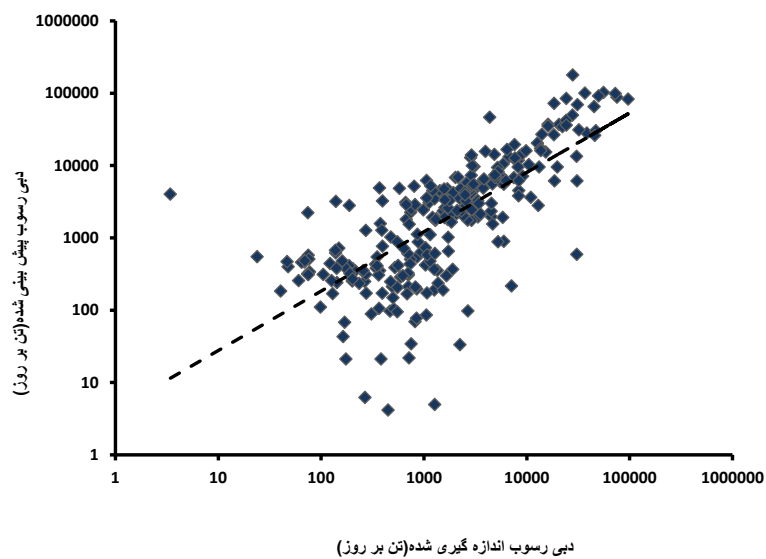
الگو	آموزش			آزمون		
	R ²	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	R ²	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
۱	0.69	41393.5	14922.5	0.52	41595.9	14425.9
۲	0.70	40803.5	13605.1	0.48	12241.9	7696.2
۳	0.80	33170.6	11504.2	0.67	7036.1	3592.4
۴	0.70	40956.8	15182.2	0.30	54401.6	14660
۵	0.70	40679.6	14482	0.56	34998.4	11269.9
۶	0.71	39853.8	15990.1	0.37	38612.2	14456.7
۷	0.75	36824.3	13546.3	0.45	18642.3	9975.5
۸	0.90	23386	7949.4	0.73	6416.1	3046.8
۹	0.75	36660.9	11199.2	0.67	7011.4	3438.1
۱۰	0.83	30732	10396.5	0.68	9607.5	299.9
۱۱	0.69	41389.1	16060.2	0.48	30989.7	13053.1
۱۲	0.68	41753.2	16009.7	0.51	26144	11768.4
۱۳	0.90	23425.6	7905.2	0.71	6596.3	3133.9
۱۴	0.86	27479.1	9113.5	0.71	6578.1	3108.2
۱۵	0.85	28236.2	9280.5	0.70	6678.9	3293.5
۱۶	0.85	28484.1	11060.1	0.72	6547.6	3136.7

با بررسی جدول فوق، می توان بیان کرد که ترکیب ۸ با ورودی دبی جریان، دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی و دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی (Q_t, Q_{t-1}, Q_{s-1})، با ضریب همبستگی ۰/۹۰ و ۰/۷۳، متوسط خطای میانگین ۷۹۴۹/۴ (تن بر روز) و ۳۰۴۶/۸ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات

خطا ۲۳۳۸۶ (تن بر روز) و ۶۴۱۶/۱ (تن بر روز) به ترتیب در بخش‌های آموزش و آزمون ترکیب بهتری از بین ترکیب‌های دیگر می‌باشد. در شکل‌های (۱۳-۴) و (۱۴-۴) نتایج حاصل از اجرای ترکیب هشتم در مراحل آموزش و آزمون نشان داده شده است.



شکل (۱۳-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۸ حالت اول در مرحله آموزش



شکل (۱۴-۴) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۸ حالت اول در مرحله آزمون

در جدول (۱۱-۴) مقادیر پارامترهای ثابت ترکیب برتر، ارائه شده است. همان‌طور که اشاره گردید، G1، G2 و G3 ژن‌های ۱، ۲ و ۳ می‌باشند.

جدول (۱۱-۴) مقادیر ثابت در بیان درختی ترکیب ۸ حالت اول

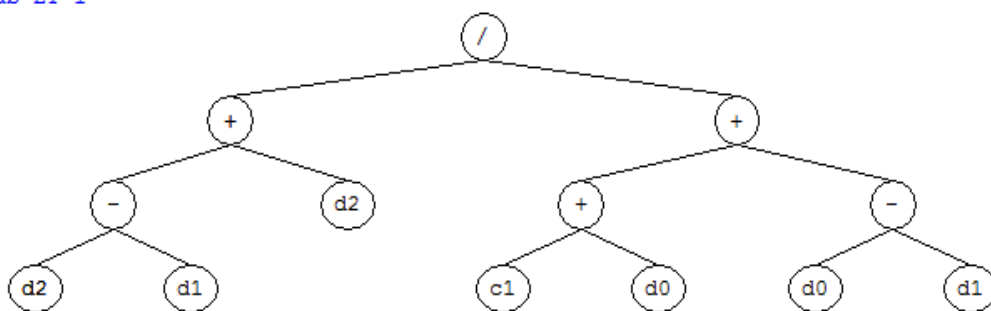
G3C1	G3C0	G2C1	G2C0	G1C1	G1C0
-8.401153	-9.991333	2.935883	-8.739105	2.866028	6.174804

هم‌چنین ساختار ORF ژن‌های موردنظر به زبان Matlab به‌صورت زیر می‌باشد.

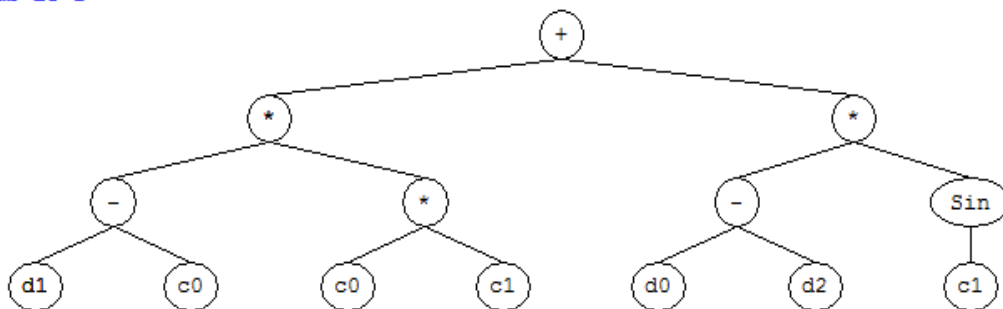
$$\begin{aligned}
 & [(\tan^{-1}(d(1))^2) \times ((d(1) - d(2)) + d(4)) \times \text{sqrt}(d(5))] \\
 & + \\
 & \left(\left(\left((2.935883 + d(1)) - (d(2) - 2.935883) \right) + \left((d(1) + d(1)) - (d(4) - 2.935883) \right) \right) \right)^2 \\
 & + \\
 & \left(\left(\left(\left(-\frac{8.401153}{d(2)} \right) \times (d(4) + 9.991333) \right) \times (-8.401153 + d(2)) \right) \times \log((d(5)^3)) \right)
 \end{aligned}$$

در ساختار بالا، d_1 ، d_2 ، d_3 ، d_4 و d_5 به ترتیب دبی جریان، دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی، ارتفاع آب، ارتفاع آب با یک گام تأخیر زمانی و دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی است.

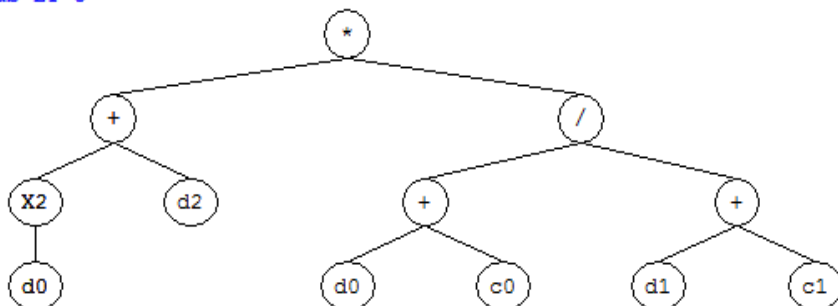
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



شکل (۴-۱۵) بیان درختی ژن‌های ۱، ۲ و ۳ برای ترکیب ۸ حالت اول

۴-۲-۴-۲- حالت دوم ترکیب‌ها

در جدول (۴-۱۲) ضرایب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین حاصل از ترکیب‌های ذکر شده در حالتی که متغیرهای Q_t و Q_s به صورت نرمال و متغیر H_t به صورت غیر نرمال مورد استفاده قرار گرفتند، در مراحل آموزش و آزمون، ارائه گردیده است. همان‌طور که پیش‌تر گفته

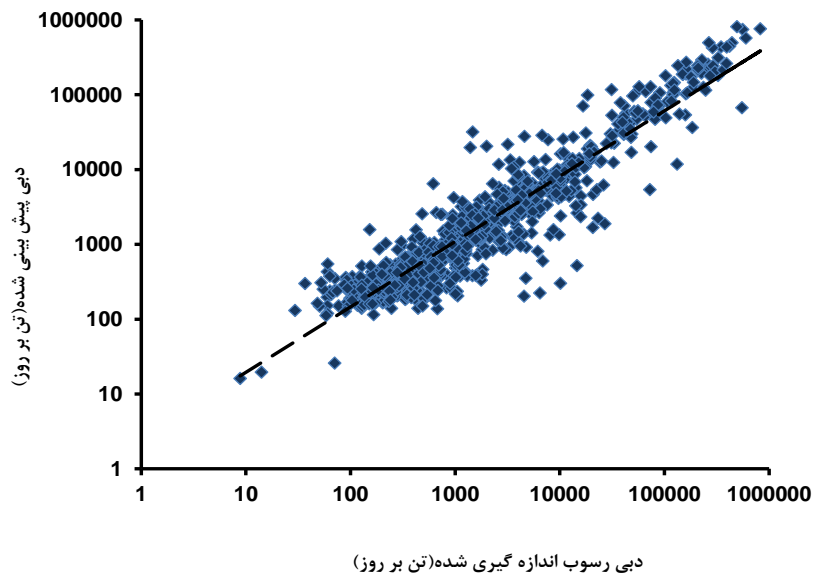
شد، ترکیبی مطلوب و بهینه است که بیشترین ضریب همبستگی را دارا بوده و کمترین میزان خطا را در هر دو مرحله به خود اختصاص دهد.

جدول (۴-۱۲) نتایج ترکیبات GEP در حالت دوم

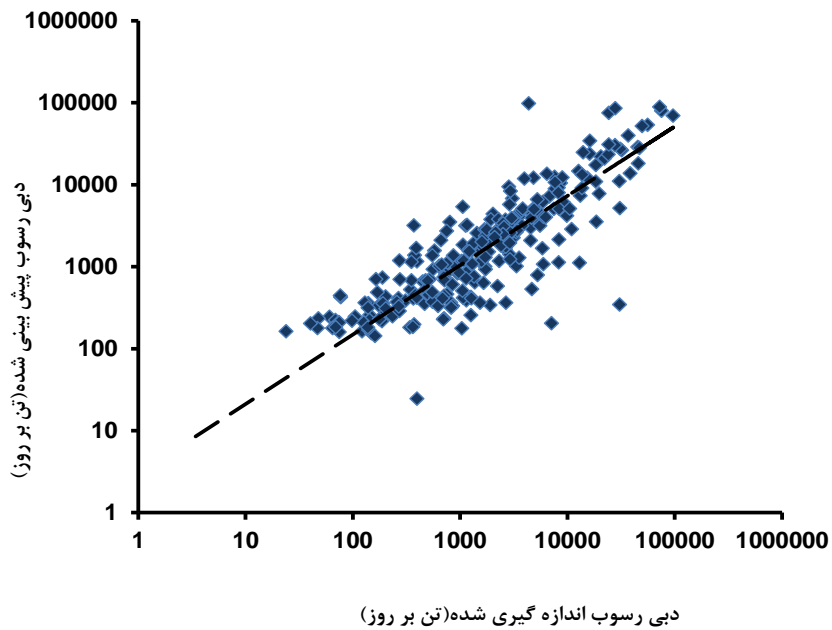
الگو	آموزش			آزمون		
	R ²	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	R ²	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
۱	0.62	49236.1	14060.4	0.55	8780.3	3351.2
۲	0.59	49825.2	13965.9	0.38	43463.9	9955.3
۳	0.75	38118.2	10484.5	0.65	7472.6	2969.1
۴	0.63	49384.8	14841.5	0.55	8575.4	3298.3
۵	0.62	50607	14813.3	0.55	8894.9	3403.6
۶	0.65	47126.4	13971.4	0.56	9486	3625.1
۷	0.66	46297.7	13379	0.58	8590.6	3352
۸	0.83	33133.7	8694	0.72	7190.9	2773.3
۹	0.77	37543.7	10239	0.65	7549.9	2956.4
۱۰	0.78	44670.3	11787.4	0.67	7392.7	2956.4
۱۱	0.64	49428.4	14849.7	0.55	9097.1	3461
۱۲	0.65	46533.3	13687.2	0.58	8232.1	3266.3
۱۳	0.83	35529	9265.6	0.71	7478.3	2900.6
۱۴	0.83	32531.9	8504.9	0.70	9837.3	3617.7
۱۵	0.74	37959	10022.2	0.74	6437.6	2674
۱۶	0.84	30647.8	8094.6	0.74	6425.2	2567.2

مقایسه و بررسی نتایج جدول فوق، نشان داد که ترکیب شانزدهم با ورودی دبی جریان، دبی جریان با یک گام تأخیر، اشل، اشل با یک گام تأخیر زمانی و دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی $\{ (Q_t, Q_{t-1}, H_t, H_{t-1}, Q_{s-1}) \}$ ، با دارا بودن ضریب همبستگی ۰/۸۴ و ۰/۷۴، متوسط خطای میانگین ۸۰۹۴/۶ (تن بر روز) و ۲۵۶۷/۲ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۳۰۶۴۷/۸ (تن بر روز) و ۶۴۲۵/۲ (تن بر روز) به ترتیب در بخش‌های آموزش و آزمون ترکیب بهینه می‌باشد. نتایج نشان داد که ترکیب موردنظر، با دارا بودن ضریب همبستگی ۰/۷۴، در بخش آزمون از توانایی قابل قبولی در برآورد رسوب معلق برای این حالت برخوردار است و به عبارتی نتایج قابل اطمینانی در پیش-

بینی بار رسوب معلق ارائه می‌کند. در شکل‌های (۴-۱۶) و (۴-۱۷) نتایج حاصل از اجرای ترکیب شانزدهم در هر دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۶) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۱۶ حالت دوم در مرحله آموزش



شکل (۴-۱۷) نمودار رابطه بین رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۱۶ حالت دوم در مرحله آزمون

در جدول (۴-۱۳) مقادیر پارامترهای ثابت ترکیب برتر، ارائه شده است. همان‌طور که اشاره گردید، G1، G2 و G3 ژن‌های ۱، ۲ و ۳ می‌باشند.

جدول (۴-۱۳) مقادیر ثابت در بیان درختی ترکیب ۱۶ حالت دوم

G3C1	G3C0	G2C1	G2C0	G1C1	G1C0
3.377869	-7.121734	2.877207	8.612671	7.877818	-5.977479

هم‌چنین ساختار ORF ژن‌های موردنظر به زبان Matlab به صورت زیر می‌باشد.

$$\left[\left(\frac{d(1)}{\exp\left(\left(d(1)^3\right) \times \left(d(1) \times d(5)\right)\right)} + d(1) \right) \right]$$

+

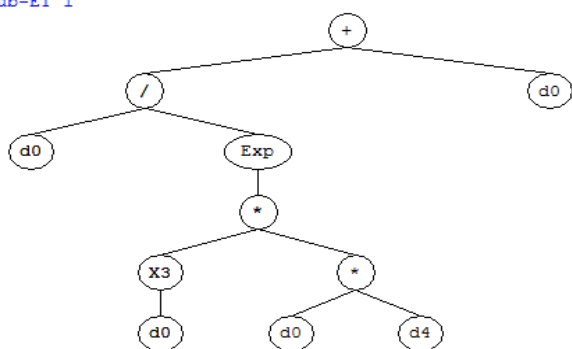
$$\left(\left(\frac{\left(\frac{d(1) \times d(1)}{d(1) - d(5)}\right)}{\left(\frac{d(4)}{2.877207}\right) - d(4)} \right) + d(1) \right)$$

+

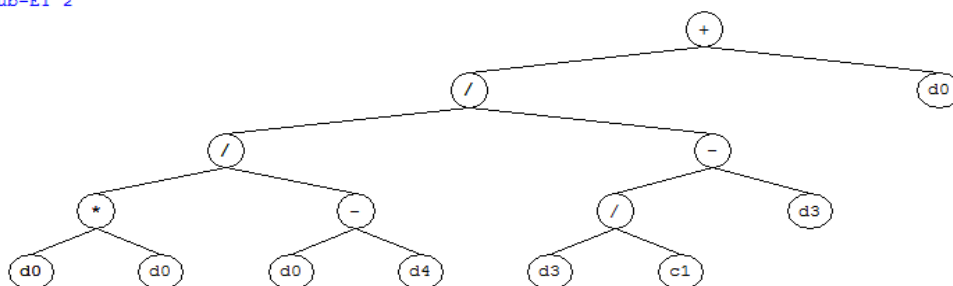
$$\left(\left(d(5) - (d(2) + d(2)) \right) - \left(\frac{3.377869}{d(3)} \right) \right) \times \sin((-7.121734 + d(1)))$$

در ساختار فوق، d_1 دبی جریان، d_2 دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی، d_3 ارتفاع آب، d_4 ارتفاع آب با یک گام تأخیر زمانی و d_5 دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی می‌باشند.

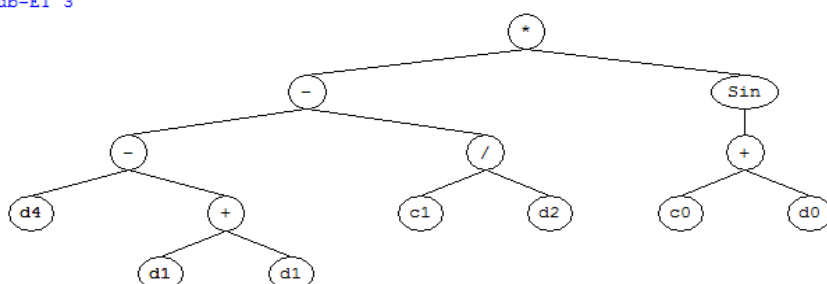
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



شکل (۴-۱۸) بیان درختی ژن‌های ۱، ۲ و ۳ برای ترکیب ۱۶ حالت دوم

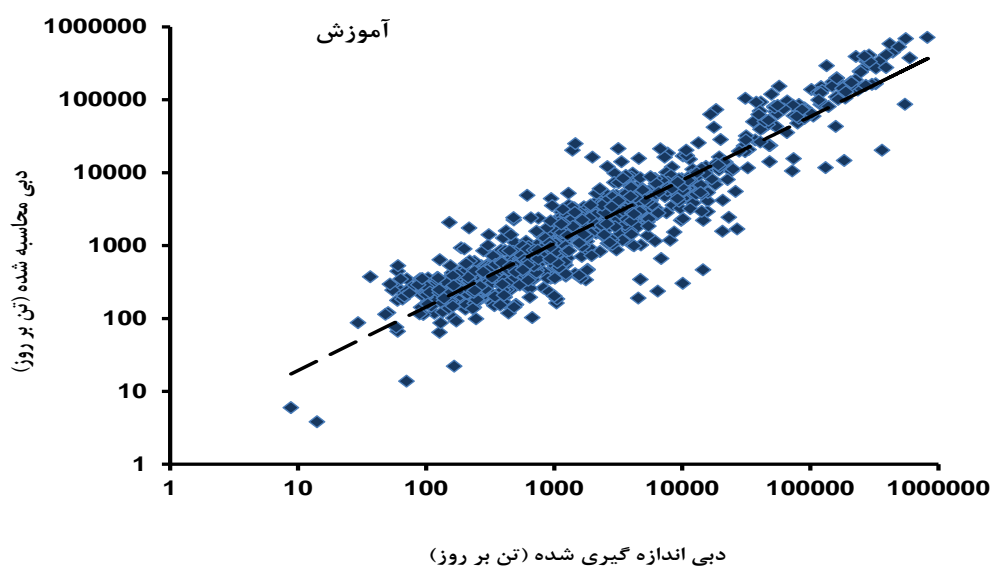
۴-۲-۳- حالت سوم ترکیب‌ها (حالتی که پارامترها نرمال شدند)

در جدول (۴-۱۴) ضرایب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین حاصل از ترکیب‌های ذکر شده در این حالت، در مراحل آموزش و آزمون، ارائه گردیده است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، ترکیبی مطلوب و بهینه است که بیشترین ضریب همبستگی را دارا بوده و کم‌ترین میزان خطا را به خود اختصاص دهد.

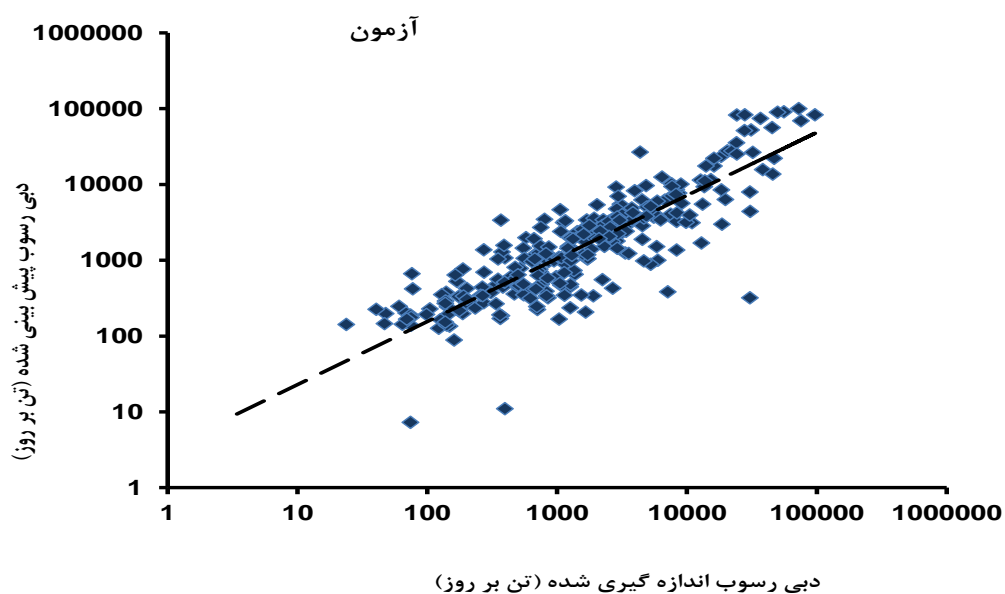
جدول (۴-۱۴) نتایج ترکیبات GEP حالت سوم

الگو	آموزش			آزمون		
	R ²	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	R ²	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)
۱	0.62	49236.1	14060.4	0.55	8780.3	3351.2
۲	0.63	55798.6	15752.5	0.55	8810.5	3371.7
۳	0.75	38118.2	10484.5	0.65	7472.5	2967.2
۴	0.63	45591.5	13468.7	0.54	8725.3	3302.4
۵	0.62	50607	14813.3	0.55	8894.8	3401.6
۶	0.63	47921.2	14317.1	0.55	8988.8	3446.3
۷	0.63	48346.9	14479.2	0.57	8818.4	3343.3
۸	0.83	32027.5	8693.9	0.72	7191	2774
۹	0.75	38260.7	10481.2	0.65	7483.8	2983.3
۱۰	0.75	38901.4	10240.4	0.66	7484.2	3106.8
۱۱	0.66	44165.9	12440.2	0.54	8793.6	3342.5
۱۲	0.63	54187	14559.4	0.58	8671.5	3279.6
۱۳	0.83	33367.7	8709.7	0.71	7384.8	2865.6
۱۴	0.83	31323.2	8189.5	0.72	6999.1	2689.3
۱۵	0.76	44269.1	11624.3	0.73	6612.6	2538
۱۶	0.83	31394	8390.5	0.76	6748.4	2603.5

تحلیل و بررسی جدول فوق نشان داد که ترکیب ۱۶ با ورودی تمام متغیرها به همراه یک گام تأخیر زمانی‌شان، یعنی دبی جریان و دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی، اشل و اشل با یک گام تأخیر زمانی و دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی $\{(Q_t, Q_{t-1}, H_t, H_{t-1}, Q_{s-1})\}$ ، با دارا بودن ضریب همبستگی ۰/۸۳ و ۰/۷۶، متوسط خطای میانگین ۸۳۹۰/۵ (تن بر روز) و ۲۶۰۳/۵ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۳۱۳۹۴ (تن بر روز) و ۶۷۴۸/۴ (تن بر روز) به ترتیب در بخش‌های آموزش و آزمون ترکیب بهینه می‌باشد. نتایج نشان داد که ترکیب موردنظر، با دارا بودن ضریب همبستگی ۰/۷۶، در بخش آزمون از توانایی قابل قبول تری در برآورد رسوب معلق برای این حالت برخوردار است و به - عبارتی نتایج قابل اطمینان تری در پیش‌بینی بار رسوب معلق ارائه می‌کند. در شکل‌های (۴-۱۹) و (۴-۲۰) نتایج حاصل از اجرای ترکیب شانزدهم در هر دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۹) نمودار رابطه بین رسوب اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۱۶ حالت سوم در مرحله آموزش



شکل (۴-۲۰) نمودار رابطه بین رسوب اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۱۶ حالت سوم در مرحله آزمون

در جدول (۴-۱۵) مقادیر پارامترهای ثابت ترکیب برتر، ارائه شده است. همان طور که اشاره گردید، G_1 ، G_2 و G_3 ژن های ۱، ۲ و ۳ می باشند.

جدول (۴-۱۵) مقادیر ثابت در بیان درختی ترکیب ۱۶ حالت سوم

G3C1	G3C0	G2C1	G2C0	G1C1	G1C0
-0.992127	-7.432007	9.275024	4.276459	6.917389	3.385162

همچنین ساختار ORF ژن‌های موردنظر به زبان Matlab به صورت زیر می‌باشد.

$$\left(\left(\left(\log \left(\left((d(5) - d(4)) + d(3) \right) \right)^2 \right)^2 \right)^{\frac{1}{3}} \right)$$

+

$$\left(\tan^{-1} \left(\left(\frac{d(2) + d(2)}{d(1) \times d(1)} \right) \right) + d(5) \right) + d(1)$$

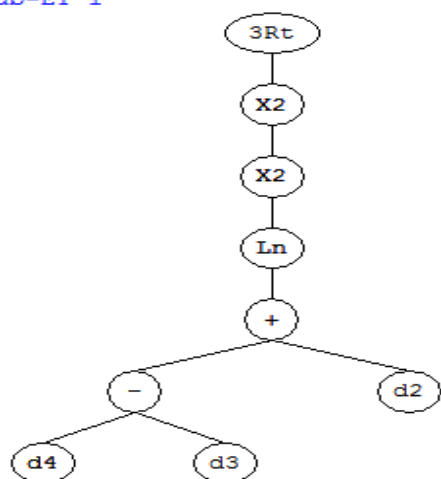
+

$$\left((\sin(d(5) \times \cos(-0.992127))) - d(2) \right) + d(1)$$

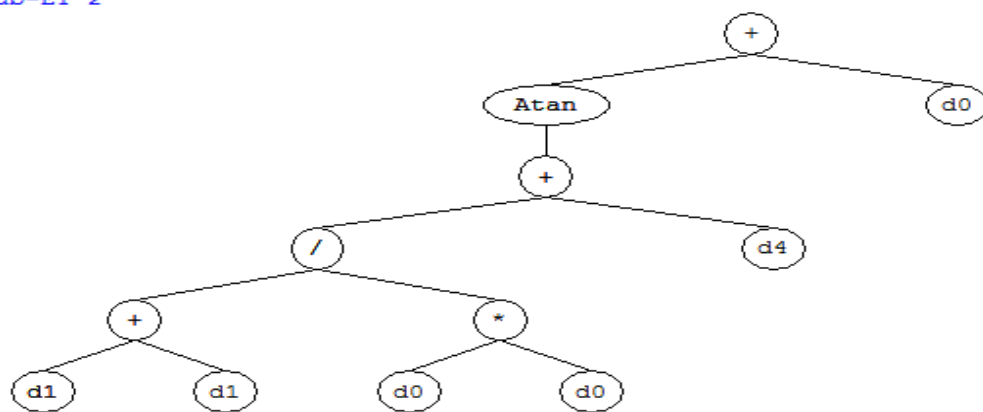
در ساختار فوق، d_1 ، d_2 ، d_3 ، d_4 و d_5 به ترتیب دبی جریان، دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی، اشل،

اشل با یک گام تأخیر زمانی و دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی می‌باشد.

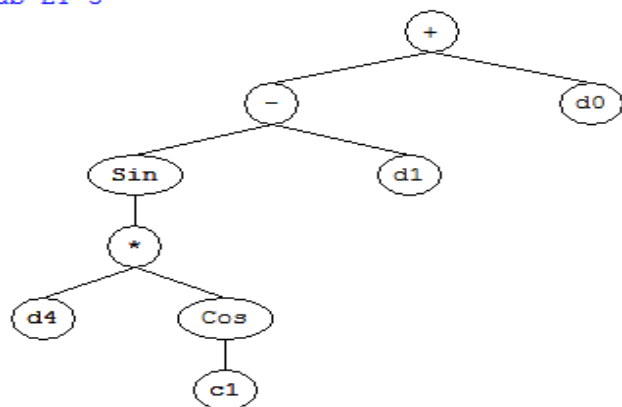
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



شکل (۴-۲۱) بیان درختی ژنهای ۱، ۲ و ۳ برای ترکیب ۱۶ حالت سوم

۴-۲-۴- مقایسه ترکیب‌های برتر حالت‌های مورد بررسی در برنامه‌ریزی ژن (GEP)

در جدول (۴-۱۶) مقایسه نتایج ترکیب‌های برتر در سه حالت ذکرشده، براساس ضریب همبستگی، متوسط خطای میانگین و جذر میانگین مربعات خطا در مراحل آموزش و آزمون ارائه گردیده است.

جدول (۴-۱۶) مقایسه نتایج ترکیب‌های برتر GEP در سه حالت ذکرشده

R ²	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	مرحله اجرا	الگو
0.90	23386	7949.4	آموزش	ترکیب ۸ حالت اول
0.73	6416.1	3046.8	آزمون	
0.84	30647.8	8094.6	آموزش	ترکیب ۱۶ حالت دوم
0.74	6425.2	2567.2	آزمون	
0.83	31394	8390.5	آموزش	ترکیب ۱۶ حالت سوم
0.76	6748.4	2603.5	آزمون	

نتایج جدول (۴-۱۶) نشان داد که ترکیب ۸ $\{ (Q_t, Q_{t-1}, Q_{s-1}) \}$ در حالتی که متغیرها بدون نرمال-سازی استفاده شدند، با ضریب همبستگی ۰/۹۰، متوسط خطای میانگین ۷۹۴۹/۴ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۲۳۳۸۶ (تن بر روز) در مرحله آموزش نسبت به ترکیبات دیگر عملکرد بهتری داشته ولی در مرحله آزمون ترکیب ۱۶ $\{ (Q_t, Q_{t-1}, H_t, H_{t-1}, Q_{s-1}) \}$ در حالتی که متغیرها نرمال شدند، با ضریب همبستگی ۰/۷۶، متوسط خطای میانگین ۲۶۰۳/۵ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۶۷۴۸/۴ (تن بر روز) عملکرد قابل قبولی را داراست. ضریب همبستگی ۰/۷۶، نشان-دهنده توانایی قابل قبولی در برآورد رسوب معلق در این بخش می‌باشد و به عبارتی نتایج قابل اطمینانی در پیش‌بینی بار رسوب معلق ارائه می‌کند.

۴-۲-۵- مدل مارس (MARS)

یکی دیگر از روش‌های به کار گرفته‌شده در این پژوهش، مدل مارس می‌باشد. این مدل نوآورانه و قابل انعطافی است که مدل ساختمان پیش‌بینی خودکار دقیق برای متغیرهای وابسته است. آن در پیدا

کردن تحولات متغیر بهینه برتری و تعامل بالقوه در هر راه حل مدل‌سازی مبتنی بر رگرسیون است و به راحتی دسته ساختار داده پیچیده که اغلب در داده بالا بعدی پنهان می‌کند.

به منظور اجرای مدل مارس، از ۱۵ ترکیب ورودی که در جدول (۴-۱۷) ارائه شده است، استفاده گردید.

جدول (۴-۱۷) ترکیبات ورودی به مدل

الگو	ترکیبات
۱	$Q_s = f(Q_t, H_t)$
۲	$Q_s = f(Q_t, Q_{s-1})$
۳	$Q_s = f(Q_t, H_{t-1})$
۴	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1})$
۵	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_t)$
۶	$Q_s = f(Q_t, H_t, H_{t-1})$
۷	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, Q_{s-1})$
۸	$Q_s = f(Q_t, H_t, Q_{s-1})$
۹	$Q_s = f(Q_t, H_{t-1}, Q_{s-1})$
۱۰	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_{t-1})$
۱۱	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_t, H_{t-1})$
۱۲	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_t, Q_{s-1})$
۱۳	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_{t-1}, Q_{s-1})$
۱۴	$Q_s = f(Q_t, H_t, H_{t-1}, Q_{s-1})$
۱۵	$Q_s = f(Q_t, Q_{t-1}, H_t, H_{t-1}, Q_{s-1})$

در ترکیب اول برخلاف روش‌های قبل، از دبی جریان و اشل به عنوان ورودی مدل استفاده گردید. در ترکیب دوم از دبی جریان و دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی (Q_t, Q_{s-1}) به عنوان ورودی مدل استفاده گردید. در ترکیب سوم، پارامتر اشل با یک گام تأخیر زمانی (Q_t, H_{t-1}) ، جایگزین دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی در ترکیب دوم شد. در ترکیب چهارم، از دبی جریان و دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی (Q_t, Q_{t-1}) به عنوان ورودی مدل استفاده شد. در ترکیب‌های پنجم تا دهم از ۳ پارامتر ورودی به مدل بهره گرفتیم، به طوری که دبی جریان در همه ترکیب‌ها ثابت و دبی جریان با یک گام

تأخیر زمانی، اشل، اشل با یک گام تأخیر زمانی و دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی به تناسب در ترکیب‌ها به کار گرفته شدند. ترکیب‌های یازدهم تا چهاردهم دارای ۴ پارامتر ورودی هستند که به تناسب به عنوان ورودی مدل معرفی گردیدند. ترکیب پانزدهم که تمامی پارامترها در آن حضور دارند، دبی جریان، دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی، اشل، اشل با یک گام تأخیر زمانی و دبی رسوب با یک گام تأخیر زمانی ($Q_t, Q_{t-1}, H_t, H_{t-1}, Q_{s-1}$) به عنوان ورودی مدل معرفی و مورد استفاده قرار گرفتند. همانند روش‌های قبل از سه حالت ذکر شده استفاده شد و نتایج به ترتیب در ادامه ارائه شده است.

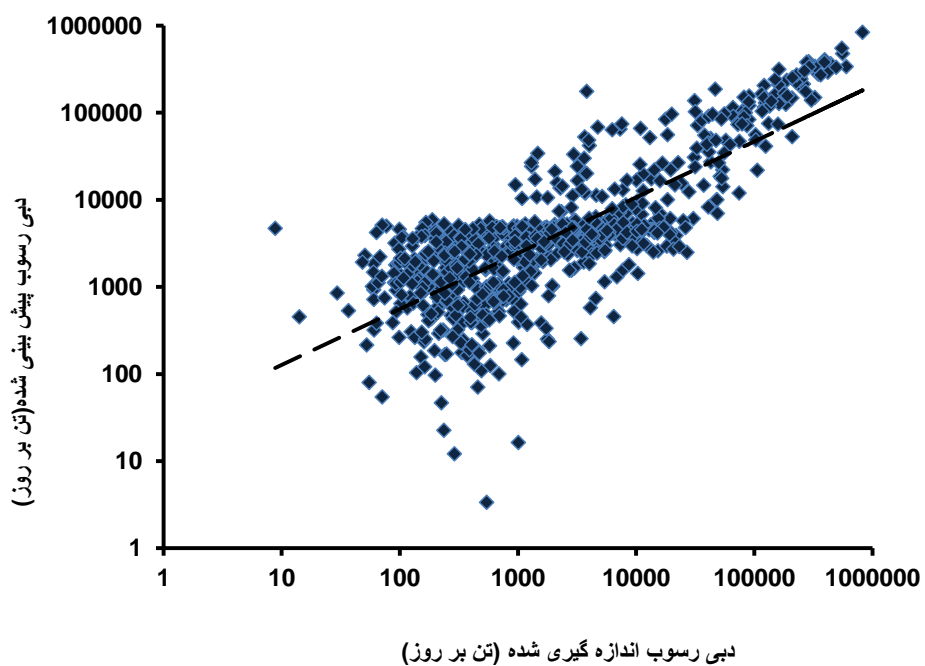
۴-۲-۵-۱- حالت اول ترکیب‌ها

ضرایب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین حاصل از ترکیب‌های ذکر شده در حالت اول (در حالت اول، متغیرها بدون نرمال شدن استفاده شدند) در هر دو مرحله آموزش و آزمون در جدول (۴-۱۸) ارائه گردیده است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، ترکیبی مطلوب و بهینه است که بیشترین ضریب همبستگی را دارا بوده و کم‌ترین میزان خطا را به خود اختصاص دهد.

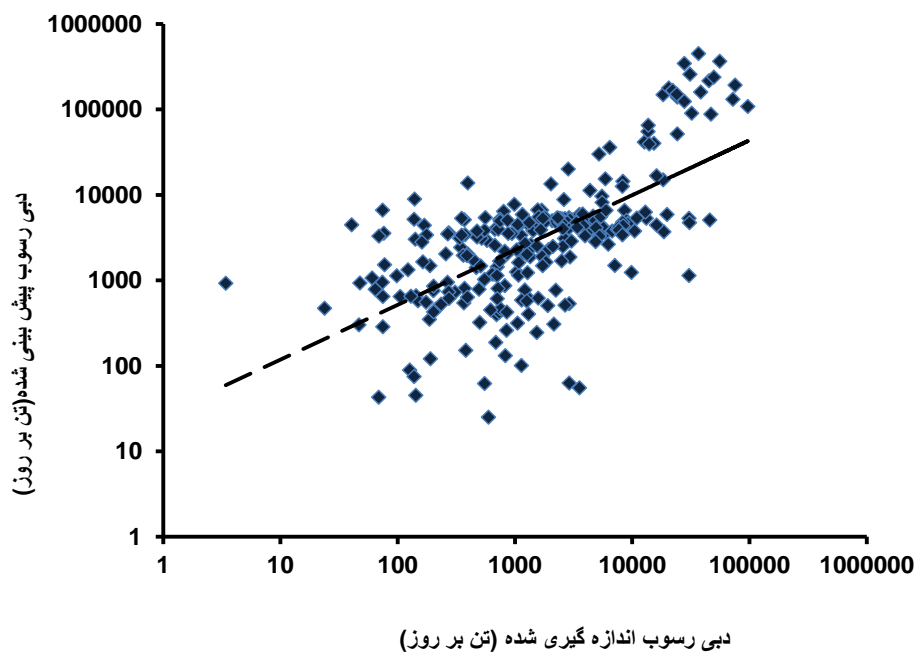
جدول (۴-۱۸) نتایج ترکیبات مارس حالت اول

آزمون			آموزش			الگو
R ²	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	R ²	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	
0.53	41705.9	13164.7	0.84	29980.4	10273.2	۱
0.32	55817.6	11628.6	0.96	14836.9	5523.8	۲
0.28	77938.5	16943.6	0.88	25334.9	9959.9	۳
0.07	214278	23874.7	0.86	27455.5	9236.3	۴
0.20	231201	40682.2	0.88	26159.7	8830.7	۵
0.41	49400.7	14515.9	0.88	25450.7	9476.4	۶
0.46	35949.2	8617.4	0.97	13337.1	5333	۷
0.05	209451.8	47922.2	0.96	14957.9	5939	۸
0.45	44169.5	11966.2	0.96	15480.3	6117.8	۹
0.04	97204.2	19698.8	0.86	27497	9449.4	۱۰
0.01	59474.2	15624.6	0.88	25848.8	8877.3	۱۱
0.23	101235.4	23212	0.97	13610.5	6426.1	۱۲
0.24	50121.9	10477.3	0.97	13828.6	5223.7	۱۳
0.21	77391.7	15776.7	0.97	13048.7	5579.2	۱۴
0.27	44219.3	12089.6	0.97	13775.3	5851.9	۱۵

براساس جدول فوق مشخص شد که ترکیب ۷ با ضریب همبستگی ۰/۹۷، متوسط خطای میانگین ۵۳۳۳ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۱۳۳۳۷/۱ (تن بر روز) در قسمت آموزش و با ضریب همبستگی ۰/۴۶، متوسط خطای میانگین ۸۶۱۷/۴ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۳۵۹۴۹/۲ (تن بر روز) در قسمت آزمون بهترین نتایج را ارائه داده است. در شکل‌های (۴-۲۲) و (۴-۲۳) نتایج حاصل از اجرای ترکیب سوم در دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده شده است.



شکل (۲۲-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۷ حالت اول در مرحله آموزش



شکل (۲۳-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۷ حالت اول در مرحله آزمون

۲-۴-۵-۲- حالت دوم ترکیبها

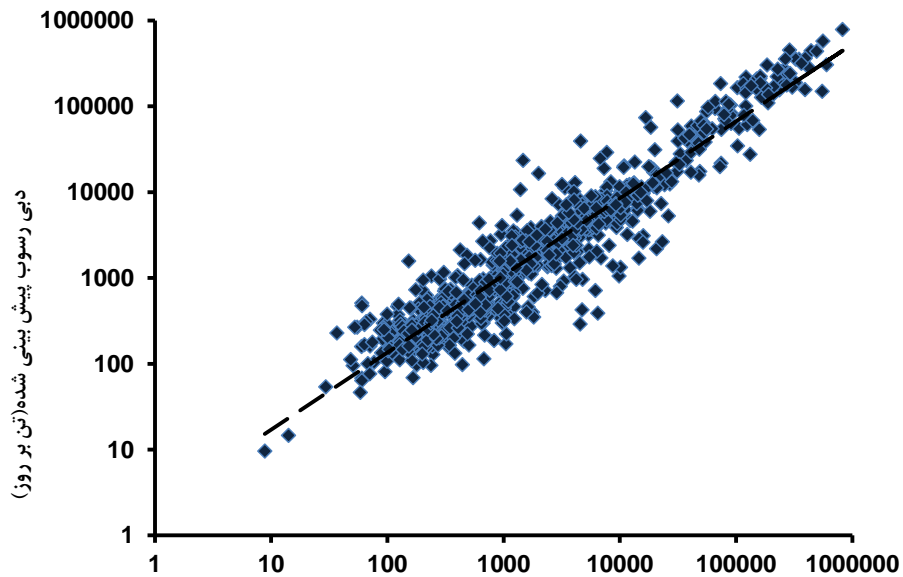
در جدول (۱۹-۴) ضرایب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین حاصل از ترکیبهای ذکرشده در حالتی که متغیرهای Q_t و Q_s به صورت نرمال و متغیر H_t به صورت غیر نرمال مورد استفاده قرار گرفتند، در مراحل آموزش و آزمون، ارائه گردیده است.

جدول (۱۹-۴) نتایج ترکیبات مارس حالت دوم

آزمون			آموزش			الگو
R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	
0.15	862134.4	121802.7	0.70	41200.8	11097.5	۱
0.64	11343.5	4136.8	0.77	36406.4	9855.3	۲
-	-	-	0.69	41709.7	11497.1	۳
0.21	63434.1	11246.7	0.62	46049.8	13863.1	۴
0.19	16087.4	5137.7	0.61	47643.6	12244.5	۵
0.50	22026	6697.8	0.70	41077.4	11383.1	۶
0.70	7164.4	2621.7	0.84	29778.8	8003.8	۷
0.19	14928.6	6536.6	0.83	30864.2	8436.6	۸
0.59	15518.5	5485.6	0.80	34039.5	9111.6	۹
-	-	-	0.72	39231.7	10743	۱۰
0.50	9209.2	3681.8	0.73	38958.9	10962.8	۱۱
0.00	3204445.9	200472.3	0.84	29635.2	7708.4	۱۲
0.25	25187.9	4836.9	0.80	33221.9	8707.4	۱۳
0.56	9463.4	3685.7	0.85	31148.1	8149.1	۱۴
0.56	11575.9	3680.1	0.87	27144.9	7270.9	۱۵

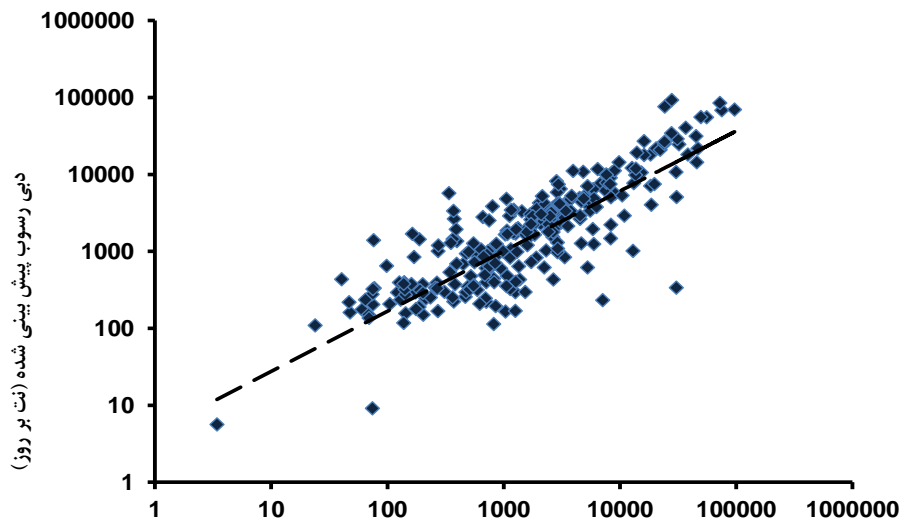
نتایج جدول (۱۹-۴) نشان داد که ترکیب ۱۵ با ضریب همبستگی ۰/۸۷، متوسط خطای میانگین ۷۲۷۰/۹ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۲۷۱۴۴/۹ (تن بر روز) در مرحله آموزش و ترکیب ۷ با ضریب همبستگی ۰/۷۰، متوسط خطای میانگین ۲۶۲۱/۷ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۷۱۶۴/۴ (تن بر روز) در مرحله آزمون دارای بیشترین ضریب و کمترین خطا بوده است. از بین این ۲ ترکیب، ترکیب ۷ به علت اطمینان بیشتری در پیش‌بینی به‌عنوان ترکیب برتر انتخاب می‌شود. همچنین ترکیب‌های ۳ و ۱۰ در مرحله آزمون دارای خطاهای بالا و غیرمعقول بوده‌اند. در شکل‌های

نتایج حاصل از اجرای ترکیب ۱۵ و ۷ به ترتیب در دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده شده است.



دبی رسوب اندازه گیری شده (تن بر روز)

شکل (۴-۲۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۱۵ حالت دوم در مرحله آموزش



دبی رسوب اندازه گیری شده (تن بر روز)

شکل (۴-۲۵) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۷ حالت دوم در مرحله آزمون

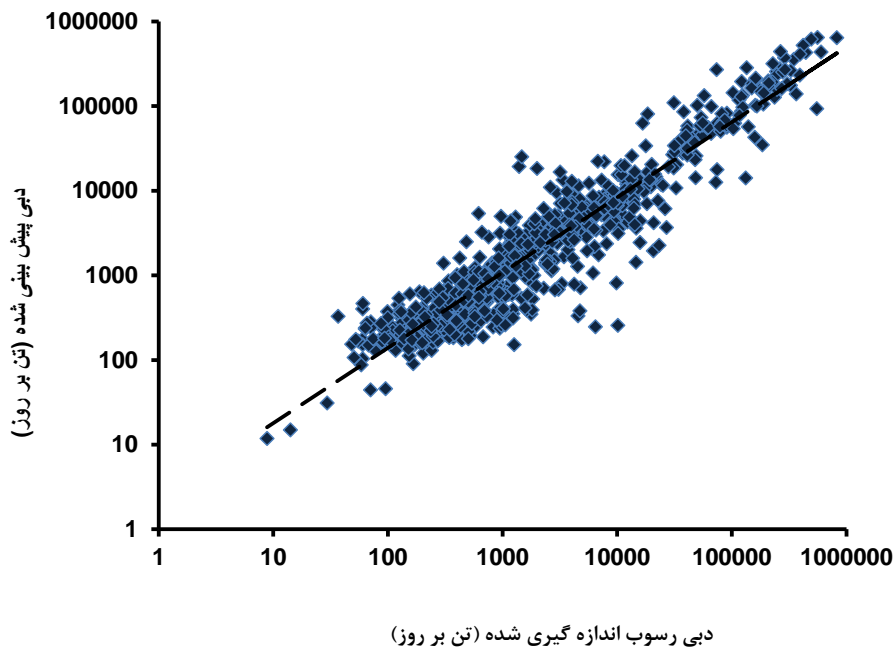
۴-۲-۵-۳- حالت سوم (حالتی که پارامترها نرمال شدند)

در جدول (۴-۲۰) ضرایب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین حاصل از ترکیب‌های ذکر شده در این حالت، در هر دو مرحله آموزش و آزمون، ارائه گردیده است.

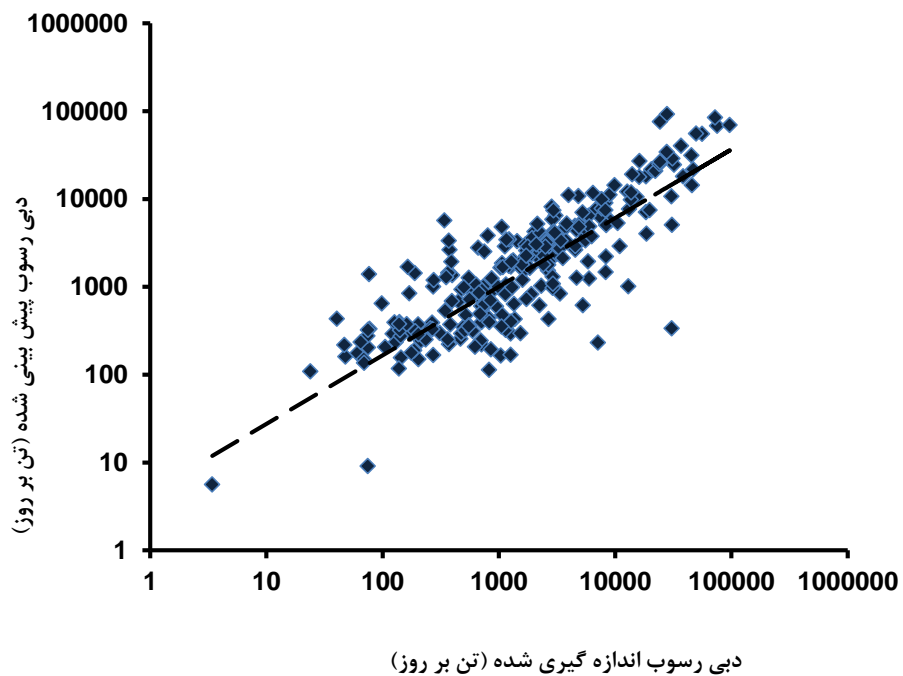
جدول (۴-۲۰) نتایج ترکیبات مارس حالت سوم

الگو	آموزش			آزمون		
	MAE (ton/day)	RMSE (ton/day)	R ²	MAE (ton/day)	RMSE (ton/day)	R ²
۱	10825.2	39980.3	0.72	-	-	-
۲	9855.3	36406.4	0.77	11343.5	4136.8	0.64
۳	12282	43798	0.65	-	-	-
۴	13863.1	46049.8	0.62	63434.1	11246.7	0.21
۵	10993.4	39099.9	0.73	19676.4	4842.1	0.10
۶	10917.9	39854.2	0.71	-	-	-
۷	8003.8	29778.8	0.84	7164.4	2621.7	0.70
۸	9003.8	29878.8	0.83	31859.3	9022.6	0.43
۹	9800.6	37067.5	0.76	-	-	-
۱۰	13567.8	52332.8	0.54	-	-	-
۱۱	11197.8	42009.4	0.68	667371989	40873139	0.00
۱۲	7815.3	29667.2	0.85	18561.5	4685.8	0.40
۱۳	8841	34124.1	0.79	11685.9	3951.6	0.58
۱۴	8168.4	38036.9	0.86	80736595509	4931778825	0.00
۱۵	8438.6	32457.1	0.81	2322381830	141866629	0.00

مطابق جدول (۴-۲۰) ترکیب ۷ $\{ (Q_t, Q_{t-1}, Q_{s-1}) \}$ ، با ضریب همبستگی ۰/۸۴ و ۰/۷۰، متوسط خطای میانگین ۳۰۰۸/۸ و ۲۶۲۱/۷ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۲۹۷۷۸/۸ و ۷۱۶۴/۴ (تن بر روز) به ترتیب در مرحله آموزش و آزمون بهترین عملکرد را نشان داد. در بخش آزمون هم ترکیب‌های ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۰ خطای بالا و ضریب همبستگی غیرمعقولی داشته‌اند. در شکل‌های (۴-۲۶) و (۴-۲۷) نتایج حاصل از اجرای ترکیب ۷ به ترتیب در دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۶) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۷ حالت سوم در مرحله آموزش



شکل (۴-۲۷) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۷ حالت سوم در مرحله آموزش

۴-۲-۵-۴- جدول مقایسه‌ای ترکیب‌های برتر سه حالت استفاده‌شده در مدل مارس

در جدول (۴-۲۱) مقایسه نتایج ترکیب‌های برتر در سه حالت ذکرشده را شاهد هستیم، که ضریب همبستگی، متوسط خطای میانگین و جذر میانگین مربعات خطا در مرحله آموزش و آزمون ارائه گردیده است.

جدول (۴-۲۱) مقایسه نتایج ترکیب‌های برتر MARS در سه حالت ذکرشده

R^2	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	مرحله اجرا	الگو
0.97	13337.1	5333	آموزش	ترکیب ۷ حالت اول
0.46	35949.2	8617.4	آزمون	
0.84	29778.8	8003.8	آموزش	ترکیب ۷ حالت دوم
0.70	7164.4	2621.7	آزمون	
0.84	29778.8	8003.8	آموزش	ترکیب ۷ حالت سوم
0.70	7164.4	2621.7	آزمون	

بررسی و مقایسه نتایج جدول فوق نشان داد که ترکیب ۷ $\{ (Q_t, Q_{t-1}, Q_{s-1}) \}$ در حالت اول (حالتی که متغیرها بدون نرمال‌سازی استفاده شدند)، با ضریب همبستگی ۰/۹۷، متوسط خطای میانگین ۵۳۳۳ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۱۳۳۳۷/۱ (تن بر روز) در مرحله آموزش نسبت به ترکیبات دیگر عملکرد بهتری داشته ولی در مرحله آزمون ترکیب ۷ $\{ (Q_t, Q_{t-1}, Q_{s-1}) \}$ در حالت سوم (حالتی که متغیرها نرمال شدند) با ضریب همبستگی ۰/۷۰، متوسط خطای میانگین ۲۶۲۱/۷ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۷۱۶۴/۴ (تن بر روز) عملکرد قابل قبولی را داراست. ضریب همبستگی ۰/۷۰، نشان‌دهنده توانایی قابل قبولی در برآورد رسوب معلق در این بخش می‌باشد و به عبارتی نتایج قابل اطمینانی در پیش‌بینی بار رسوب معلق ارائه می‌کند.

۴-۲-۶- مقایسه ترکیبات برتر روش‌های مورد بررسی در بخش اول

در جدول (۴-۲۲) نتایج ترکیب برتر روش‌های مورد بررسی ارائه گردید.

جدول (۴-۲۲) مقایسه ترکیبات برتر روش‌های مورد بررسی در بخش اول

آزمون			آموزش			مدل
R ²	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	R ²	RMSE (ton/day)	MAE (ton/day)	
0.49	18116.4	5774.6	0.62	55719.4	15777.6	USBR
0.52	10517.6	5451.3	0.43	67385.1	28274.5	FAO
0.71	7850.8	2796.4	0.82	33133.7	9257.6	رگرسیون خطی
0.76	6748.4	2603.5	0.83	31394	8390.5	GEP
0.70	7164.4	2621.7	0.84	29778.8	8003.8	MARS

باتوجه به جدول فوق و تجزیه و تحلیل نتایج، روش‌های منحنی سنج و فائو نسبت به روش‌های دیگر ضعیف‌تر عمل کرده و قابل اعتماد نبوده‌اند. در بین روش‌های دیگر روش مارس در بخش آموزش با ضریب همبستگی ۰/۸۴، متوسط خطای میانگین ۸۰۰۳/۸ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۲۹۷۷۸/۸ (تن بر روز) و روش برنامه‌ریزی ژن در بخش آزمون با ضریب همبستگی ۰/۷۶، متوسط خطای میانگین ۲۶۰۳/۵ (تن بر روز) و جذر میانگین مربعات خطا ۷۱۶۴/۴ (تن بر روز) دارای بهترین عملکرد بوده‌اند. ضریب همبستگی ۰/۷۶ در قسمت آزمون بیان‌گر این بوده است که روش برنامه‌ریزی ژن پیش‌بینی قابل اعتمادتری نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌کند. در جدول زیر روش‌ها باهم مقایسه شده‌اند.

جدول (۴-۲۳) - میزان افزایش دقت و کاهش خطای روش مارس نسبت به دیگر روش‌ها در مرحله آموزش

روش‌ها	MAE	RMSE	R^2
USBR	۴۹/۲۷ درصد کاهش	۴۶/۵۵ درصد کاهش	۳۵/۴۸ درصد افزایش
FAO	۷۱/۶۹ درصد کاهش	۵۵/۸۱ درصد کاهش	۹۵/۳۴ درصد افزایش
رگرسیون خطی	۱۳/۵۴ درصد کاهش	۱۰/۱۲ درصد کاهش	۲/۴۳ درصد افزایش
برنامه‌ریزی بیان ژن	۴/۶ درصد کاهش	۵/۱۴ درصد کاهش	۱/۲ درصد افزایش

جدول (۴-۲۴) - میزان افزایش دقت و کاهش خطای روش برنامه‌ریزی ژن نسبت به دیگر روش‌ها در مرحله آزمون

روش‌ها	MAE	RMSE	R^2
USBR	۵۴/۹۱ درصد کاهش	۵۷/۲۲ درصد کاهش	۵۵/۱ درصد افزایش
FAO	۵۲/۲۴ درصد کاهش	۳۵/۸۳ درصد کاهش	۴۲/۳ درصد افزایش
رگرسیون خطی	۶/۸۹ درصد کاهش	۱۴/۰۴ درصد کاهش	۷/۰۴ درصد افزایش
مارس	۰/۶۹ درصد کاهش	۵/۸ درصد کاهش	۸/۵۷ درصد افزایش

۳-۴- بخش دوم بر آورد دبی جریان رودخانه با برقرار کردن رابطه بین دبی جریان و اشل رودخانه

اندازه‌گیری دائمی دبی رودخانه‌ها در ایستگاه‌های هیدرومتری مخصوصاً در مواقع سیلابی غالباً پرهزینه و مشکل می‌باشد، بدین منظور جهت مدل‌سازی رابطه دبی - اشل مدل‌های ریاضی و هوشمند متعددی توسعه یافته و مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌منظور پیش‌بینی دبی جریان رودخانه هراز آمل، اطلاعات دبی جریان و ارتفاع آب متناظر آن از ایستگاه هیدرومتری کره‌سنگ آمل، مربوط به سال‌های آماری ۱۳۹۲-۱۳۴۴ از سازمان آب منطقه‌ای استان مازندران جمع‌آوری گردید. با توجه به اینکه در همه ماه‌های این سال‌ها، داده اندازه‌گیری شده‌ای وجود نداشته و نواقصی در این سال‌ها وجود داشته است، به‌منظور یکسان‌سازی فضای مقایسه، پس از حذف آمارهای تنها و مشکوک دبی جریان و ارتفاع آب متعلق به این سال‌های آماری، تعداد ۱۰۶۶ سری داده مورد استفاده قرار گرفت. ۸۰ درصد داده‌های مربوط به این سال‌ها، به‌عنوان آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده، به‌عنوان آزمون در نظر گرفته شد.

۳-۴-۱- روش رگرسیون خطی چند متغیره

همان‌طور که در فصل قبل اشاره شد در این روش به کمک نرم‌افزار SPSS استفاده گردید و روابط بین متغیرها برقرار شده است.

رابطه رگرسیونی که در فصل قبل به آن اشاره شد به‌صورت تعیین گردید:

$$Q_t = C_0 + a H_t + b H_{t-1} + c Q_{t-1} \quad (۴-۶)$$

همان‌طور که گفته شد برای به دست آوردن ضرایب C_0 , a , b , c از نرم‌افزار SPSS کمک گرفته شد و پس از وارد کردن داده‌ها در ستون‌های مربوطه در نرم‌افزار SPSS، ضرایب مذکور به دست آمده و به‌منظور محاسبه دبی رسوب، در رابطه موردنظر جایگذاری گردید.

به منظور اجرای مدل رگرسیونی، از ۶ ترکیب ورودی استفاده شد که در ادامه در جدول (۴-۲۵) ارائه شده است. واضح است که با تغییر ترکیب‌های ورودی، ضریب همبستگی و خطاها تغییر می‌کند که برای هر ترکیب محاسبه شده است.

ترکیبات ورودی برای مدل رگرسیون خطی به صورت جدول زیر دسته‌بندی گردید:

جدول (۴-۲۵) ترکیبات ورودی به مدل	
الگو	ترکیبات
۱	$Q_t = f(H_t)$
۲	$Q_t = f(H_t, Q_{t-1})$
۳	$Q_t = f(H_t, H_{t-1}, Q_{t-1})$
۴	$Q_t = f(H_t, H_{t-1}, H_{t-2})$
۵	$Q_t = f(H_t, Q_{t-1}, Q_{t-2})$
۶	$Q_t = f(H_t, H_{t-1}, H_{t-2}, Q_{t-1}, Q_{t-2})$

در جدول فوق، همان‌طور که مشاهده می‌شود در ترکیب اول، تنها ورودی مدل، ارتفاع آب می‌باشد. سپس برای هدف دستیابی به پاسخ مطلوب‌تر، در ترکیب دوم از اشل و دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی $\{H_t, Q_{t-1}\}$ به عنوان ورودی به مدل معرفی گردید. در ترکیب سوم اشل، اشل با یک گام تأخیر زمانی و دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی $\{H_t, H_{t-1}, Q_{t-1}\}$ به عنوان ورودی مدل استفاده شد. در ترکیب چهارم اشل، اشل با یک گام و دو گام تأخیر زمانی $\{H_t, H_{t-1}, H_{t-2}\}$ به عنوان ورودی مدل استفاده گردید. در ترکیب پنجم اشل، دبی جریان با یک گام و دو گام تأخیر زمانی $\{H_t, Q_{t-1}, Q_{t-2}\}$ به عنوان ورودی مدل تعیین شد. در ترکیب ششم اشل، اشل با یک گام و دو گام تأخیر، دبی جریان با یک گام و دو گام تأخیر زمانی به عنوان ورودی مدل معرفی گردید.

ترکیب‌های فوق با توجه به مطالعات محققانی چون آیتک و کیسی (۲۰۰۸)، گوون و ارسین تالو (۲۰۱۰) و کیسی (۲۰۱۱) انتخاب گردیده‌اند. هم‌چنین می‌توان به پژوهش کریمی و همکاران (۱۳۹۳) نیز اشاره کرد.

ترکیب‌های ذکر شده در ۲ حالت مختلف استفاده شد که به شرح زیر می‌باشد:

۱- حالت اول، حالتی که متغیرها بدون نرمال‌سازی به‌عنوان ورودی معرفی شدند.

۲- حالت دوم، حالتی که متغیرها به‌صورت نرمال مورد استفاده قرار گرفتند.

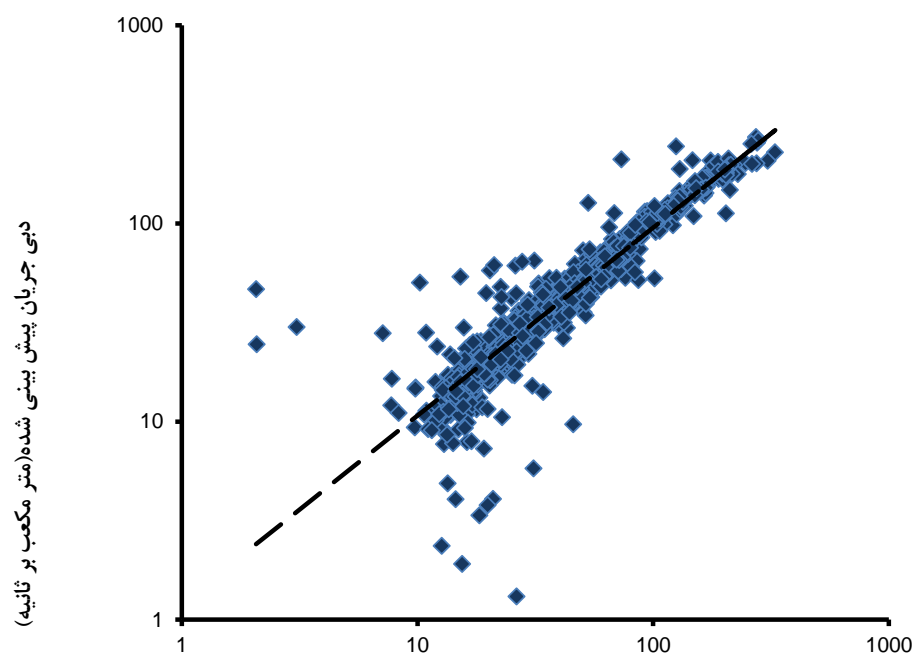
۴-۳-۱-۱- حالت اول ترکیبها

در جدول (۴-۲۶) ضرایب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین حاصل از ترکیب‌های ذکر شده در حالت اول (در حالت اول، متغیرها بدون نرمال‌سازی، استفاده شدند) در دو مرحله آموزش و آزمون، ارائه گردیده است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، ترکیبی مطلوب و بهینه است که بیشترین ضریب همبستگی را دارا بوده و کم‌ترین میزان خطا را به خود اختصاص دهد.

جدول (۴-۲۶) نتایج ترکیبات رگرسیونی در حالت اول

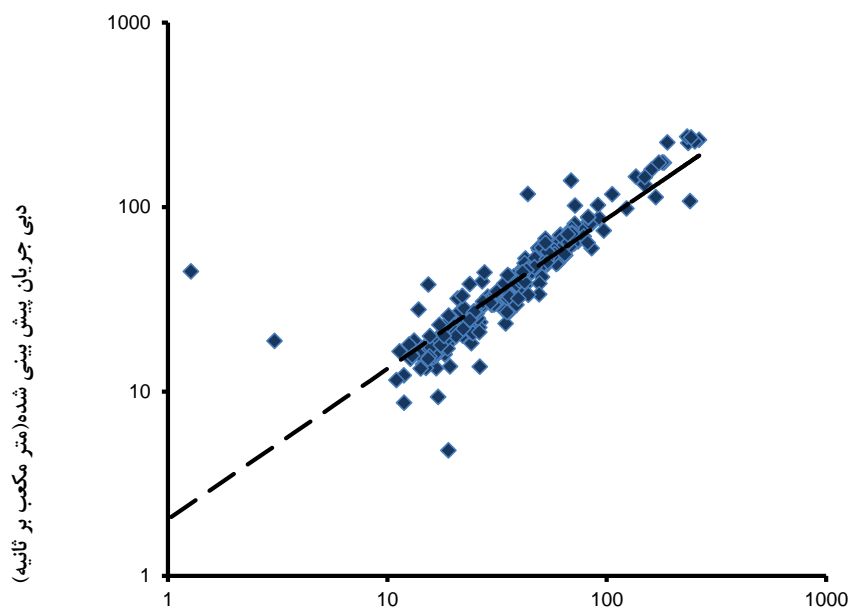
الگو	آموزش			آزمون		
	MAE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	R ²	MAE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	R ²
۱	19.215	25.829	0.74	19.464	33.949	0.38
۲	11.760	19.149	0.86	9.368	17.268	0.84
۳	8.148	14.307	0.87	9.114	17.560	0.85
۴	54.796	89.684	0.29	19.380	33.863	0.38
۵	11.554	18.858	0.86	10.777	18.160	0.84
۶	9.157	14.613	0.86	13.633	18.458	0.84

در بررسی نتایج جدول بالا، نشان داد که ترکیب ۳ $\{ (H_t, H_{t-1}, Q_{t-1}) \}$ با ضریب همبستگی ۰/۸۷، متوسط خطای میانگین ۸/۱۴۸ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۱۴/۳۰۷ (مترمکعب بر ثانیه) در مرحله آموزش و با ضریب همبستگی ۰/۸۵، متوسط خطای میانگین ۹/۱۱۴ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۱۷/۵۶ (مترمکعب بر ثانیه) عملکرد بهتری نسبت به بقیه ترکیبها را دارا بوده است. در شکل‌های (۴-۲۸) و (۴-۲۹) نتایج حاصل از اجرای ترکیب سوم در دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده شده است.



دبی جریان اندازه گیری شده (متر مکعب بر ثانیه)

شکل (۴-۲۸) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۳ حالت اول در مرحله آموزش



دبی جریان اندازه گیری شده (متر مکعب بر ثانیه)

شکل (۴-۲۹) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۳ حالت اول در مرحله آزمون

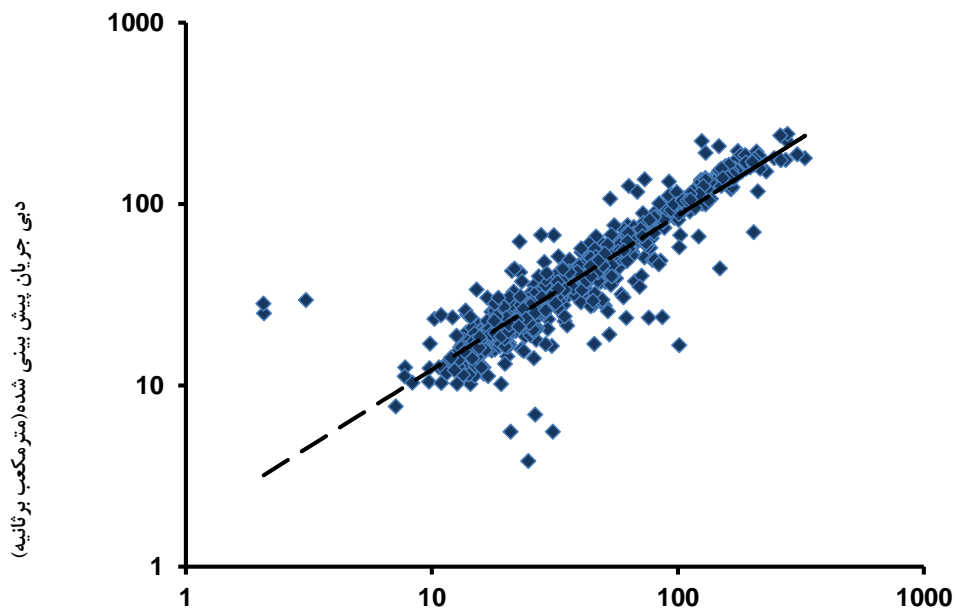
۴-۳-۱-۲- حالت دوم ترکیبها

در جدول (۴-۲۷) ضرایب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین حاصل از ترکیب‌های ذکر شده در حالت دوم (در حالت دوم، متغیرها نرمال شدند) در دو مرحله آموزش و آزمون، ارائه گردیده است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، ترکیبی مطلوب و بهینه است که بیشترین ضریب همبستگی را دارا بوده و کم‌ترین میزان خطا را به خود اختصاص دهد.

جدول (۴-۲۷) نتایج ترکیبات رگرسیونی در حالت دوم

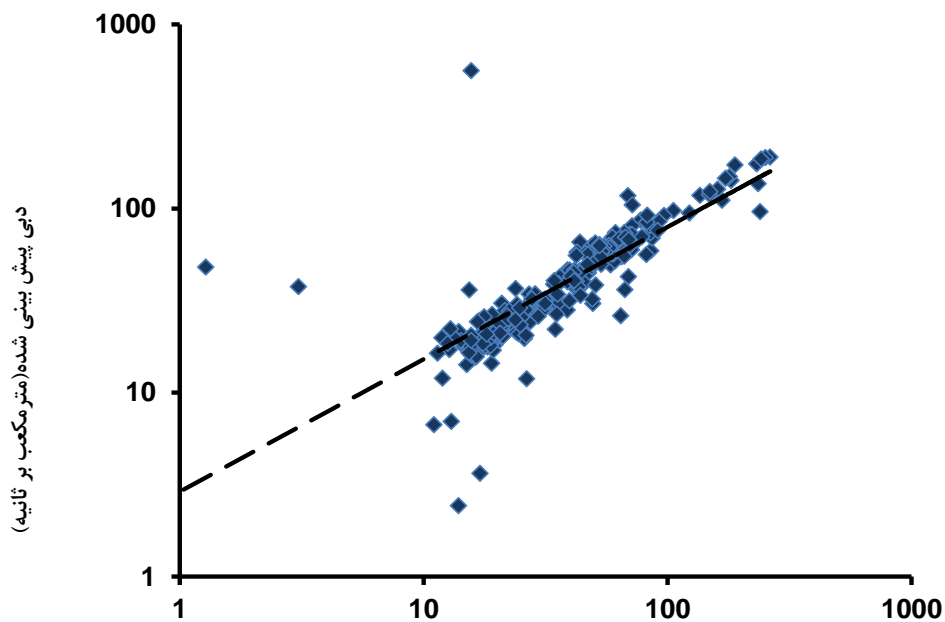
الگو	آموزش			آزمون		
	MAE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	R ²	MAE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	R ²
۱	18.129	30.733	0.76	3563.553	4626.478	0.37
۲	10.339	19.802	0.86	14.394	41.548	0.26
۳	9.431	18.815	0.88	11.496	39.059	0.34
۴	18.193	30.677	0.75	19.153	48.191	0.09
۵	10.231	19.477	0.86	14.140	40.917	0.29
۶	8.889	17.591	0.87	10.529	37.457	0.41

مقایسه نتایج جدول فوق، نشان داد که ترکیب ۶ $\{H_t, H_{t-1}, H_{t-2}, Q_{t-1}, Q_{t-2}\}$ با ضریب همبستگی ۰/۸۷ و ۰/۴۱، متوسط خطای میانگین ۸/۸۸۹ (مترمکعب بر ثانیه) و ۱۰/۵۲۹ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۱۷/۵۹۱ (مترمکعب بر ثانیه) و ۳۷/۴۵۷ (مترمکعب بر ثانیه) به ترتیب در مرحله آموزش و آزمون از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد. در اشکال (۴-۳۰) و (۴-۳۱) نتایج حاصل از اجرای ترکیب سوم در دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده شده است.



دبی جریان اندازه گیری شده (مترمکعب بر ثانیه)

شکل (۳۰-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۶ حالت دوم در مرحله آموزش



دبی اندازه گیری شده (مترمکعب بر ثانیه)

شکل (۳۱-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۶ حالت دوم در مرحله آزمون

۳-۱-۳-۴- جدول مقایسه‌ای ترکیب‌های برتر دو حالت مورد بررسی در روش رگرسیون خطی

در جدول (۲۸-۴) مقایسه نتایج ترکیب‌های برتر در دو حالت مورد بررسی ارائه گردید.

جدول (۲۸-۴) مقایسه نتایج ترکیب‌های برتر رگرسیون خطی در دو حالت مورد بررسی

R^2	RMSE (m^3/s)	MAE (m^3/s)	مرحله اجرا	الگو
0.87	14.307	8.148	آموزش	ترکیب ۳ حالت اول
0.85	17.560	9.114	آزمون	
0.87	17.591	8.889	آموزش	ترکیب ۶ حالت دوم
0.41	37.457	10.529	آزمون	

بررسی نتایج جدول فوق نشان داد که ترکیب ۳ $\{H_t, H_{t-1}, Q_{t-1}\}$ در حالت اول (حالتی که متغیرها بدون نرمال‌سازی استفاده شدند)، با ضریب همبستگی ۰/۸۷، متوسط خطای میانگین ۸/۱۴۸ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۱۴/۳۰۷ (مترمکعب بر ثانیه) در مرحله آموزش و با ضریب همبستگی ۰/۸۵، متوسط خطای میانگین ۹/۱۱۴ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۱۷/۵۶ (مترمکعب بر ثانیه) در مرحله آزمون عملکرد قابل قبولی را داراست. ضریب همبستگی ۰/۸۵، نشان‌دهنده توانایی قابل قبولی در برآورد رسوب معلق در این بخش می‌باشد و به عبارتی نتایج قابل اطمینانی در پیش‌بینی بار رسوب معلق ارائه می‌کند.

۲-۳-۴- برنامه‌ریزی بیان ژن

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، روش‌های رگرسیونی به دلیل دقت کم و خطای بالا، از عدم قطعیت برخوردار هستند. در این بخش نیز از روش برنامه‌ریزی ژن برای پیش‌بینی دبی جریان رودخانه هراز آمل بهره گرفته شده است. با هدف یکسان‌سازی فضای مقایسه و صحت اجرا، پارامترهای GEP به‌طور همسان تعیین شدند که به‌طور خلاصه در جدول (۲۹-۴) ارائه گردیده است. پس از تعیین بهترین گزینه، یک رابطه ریاضی برای پیش‌بینی بار رسوب معلق ارائه گردید. همچنین بیان درختی رابطه مذکور نیز شرح داده شد.

جدول (۴-۲۹) مقادیر پارامترهای برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی بار رسوب معلق

مقدار	پارامتر
۸	اندازه سر (Head Size)
۳۰	تعداد کروموزوم (Number of Chromosomes)
۳	تعداد ژن‌ها در هر کروموزوم (Number of Genes)
۰/۰۴۴	نرخ جهش (Mutation Rate)
۰/۱	نرخ وارون سازی (Inversion Rate)
۰/۳	نرخ ترکیب تک‌نقطه‌ای (One-Point Recombination Rate)
۰/۳	نرخ ترکیب دونقطه‌ای (Two-Points Recombination Rate)
۰/۱	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)
RRS ¹	معیار خطای تابع (Fitness Function Error Type)
جمع (+)	تابع پیوند (Linking Function)

به‌منظور اجرای مدل برنامه‌ریزی ژن، از ۶ ترکیب ورودی که در جدول (۴-۳۰) ارائه شده است، استفاده گردید. واضح است که با تغییر در ترکیب ورودی‌ها، اندازه دنباله نیز با توجه به رابطه (۴-۳) تغییر می‌کند که برای هر ترکیب، محاسبه شد.

جدول (۴-۳۰) ترکیبات ورودی به مدل

الگو	ترکیبات	اندازه دنباله
۱	$Q_t = f(H_t)$	۱
۲	$Q_t = f(H_t, Q_{t-1})$	۹
۳	$Q_t = f(H_t, H_{t-1}, Q_{t-1})$	۱۷
۴	$Q_t = f(H_t, H_{t-1}, H_{t-2})$	۱۷
۵	$Q_t = f(H_t, Q_{t-1}, Q_{t-2})$	۱۷
۶	$Q_t = f(H_t, H_{t-1}, H_{t-2}, Q_{t-1}, Q_{t-2})$	۳۳

در جدول فوق، همان‌طور که مشاهده می‌شود در ترکیب اول، تنها ورودی مدل، ارتفاع آب می‌باشد. سپس برای هدف دستیابی به پاسخ مطلوب‌تر، در ترکیب دوم از اشل و دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی $\{H_t, Q_{t-1}\}$ به‌عنوان ورودی به مدل معرفی گردید. در ترکیب سوم اشل، اشل با یک گام تأخیر زمانی و دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی $\{H_t, H_{t-1}, Q_{t-1}\}$ به‌عنوان ورودی مدل استفاده

شد. در ترکیب چهارم اشل، اشل با یک گام و دو گام تأخیر زمانی $\{H_t, H_{t-1}, H_{t-2}\}$ به عنوان ورودی مدل استفاده گردید. در ترکیب پنجم اشل، دبی جریان با یک گام و دو گام تأخیر زمانی $\{H_t, Q_{t-1}, Q_{t-2}\}$ به عنوان ورودی مدل تعیین شد. در ترکیب ششم اشل، اشل با یک گام و دو گام تأخیر، دبی جریان با یک گام و دو گام تأخیر زمانی به عنوان ورودی مدل معرفی گردید.

ترکیب‌های ذکر شده در ۲ حالت مختلف استفاده شد که به شرح زیر می‌باشد:

۱- حالت اول، حالتی که متغیرها بدون نرمال‌سازی به عنوان ورودی معرفی شدند.

۲- حالت دوم، حالتی که متغیرها به صورت نرمال مورد استفاده قرار گرفتند.

۴-۳-۲-۱- حالت اول

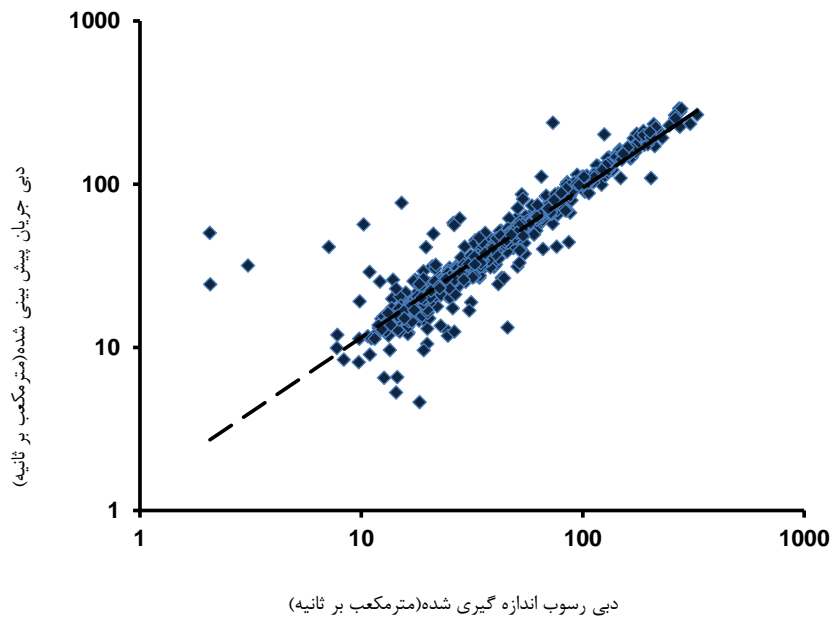
ضرایب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین حاصل از ترکیب‌های ذکر شده در حالتی که پارامترها بدون نرمال‌سازی، استفاده شدند، در دو مرحله آموزش و آزمون، در جدول (۴-۳۱) ارائه گردیده است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، ترکیبی مطلوب و بهینه است که بیشترین ضریب همبستگی را دارا بوده و کم‌ترین میزان خطا را به خود اختصاص دهد.

جدول (۴-۳۱) نتایج ترکیبات GEP حالت اول

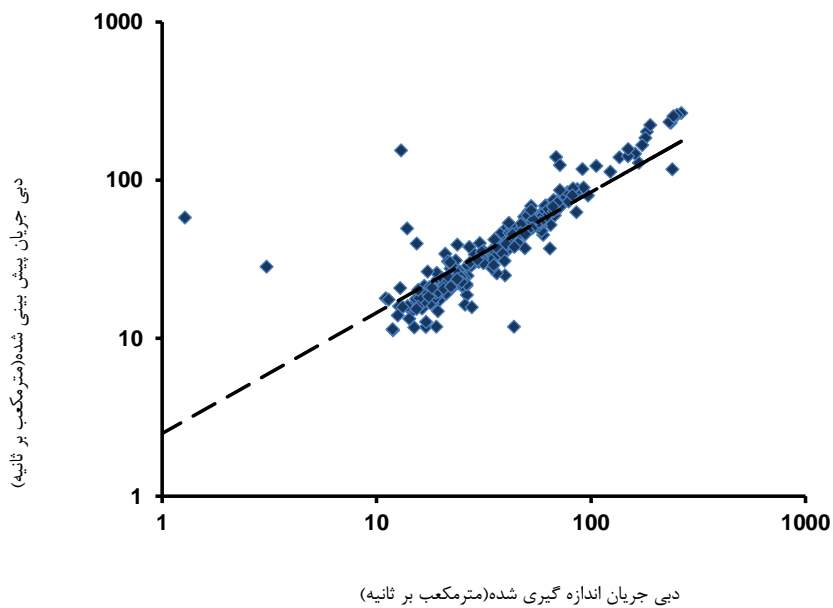
الگو	آموزش			آزمون		
	MAE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	R ²	MAE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	R ²
۱	13.489	20.105	0.84	20.374	34.616	0.36
۲	10.178	17.346	0.88	12.852	21.505	0.76
۳	7.356	13.623	0.93	8.583	15.506	0.87
۴	13.296	20.141	0.84	20.592	34.531	0.37
۵	11.483	25.461	0.87	12.024	19.099	0.81
۶	6.036	12.095	0.92	6.484	15.407	0.88

با توجه به جدول فوق، ترکیب ۶ $\{H_t, H_{t-1}, H_{t-2}, Q_{t-1}, Q_{t-2}\}$ با ضریب همبستگی ۰/۹۲، متوسط خطای میانگین ۶/۰۳۶ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۱۲/۰۹۵ (مترمکعب بر ثانیه) و با ضریب همبستگی ۰/۸۸، متوسط خطای میانگین ۶/۴۸۴ و جذر میانگین مربعات خطا ۱۵/۴۰۷

به ترتیب در مرحله آموزش و آزمون از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد. در شکل‌های (۴-۳۲) و (۴-۳۳) نتایج حاصل از اجرای ترکیب سوم در دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده شده است.



شکل (۴-۳۲) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۶ حالت اول در مرحله آموزش



شکل (۴-۳۳) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۶ حالت اول در مرحله آزمون

در جدول (۴-۳۲) مقادیر پارامترهای ثابت ترکیب برتر، ارائه شده است. همان طور که اشاره گردید، G1، G2 و G3 ژن های ۱، ۲ و ۳ می باشند.

جدول (۴-۳۲) مقادیر ثابت در بیان درختی ترکیب

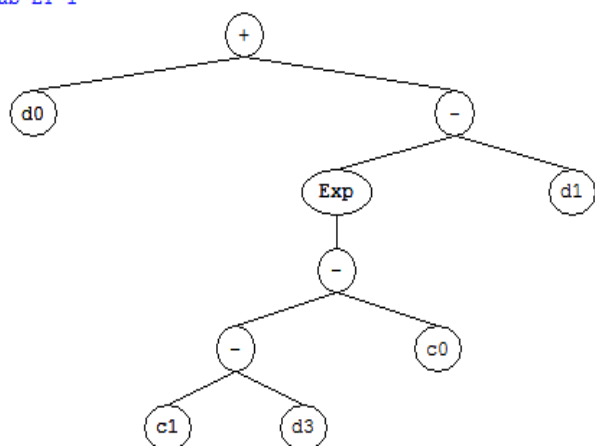
G3C1	G3C0	G2C1	G2C0	G1C1	G1C0
-0.992127	-7.432007	9.275024	4.276459	6.917389	3.385162

همچنین ساختار ORF ژن های مورد نظر به زبان Matlab به صورت زیر می باشد.

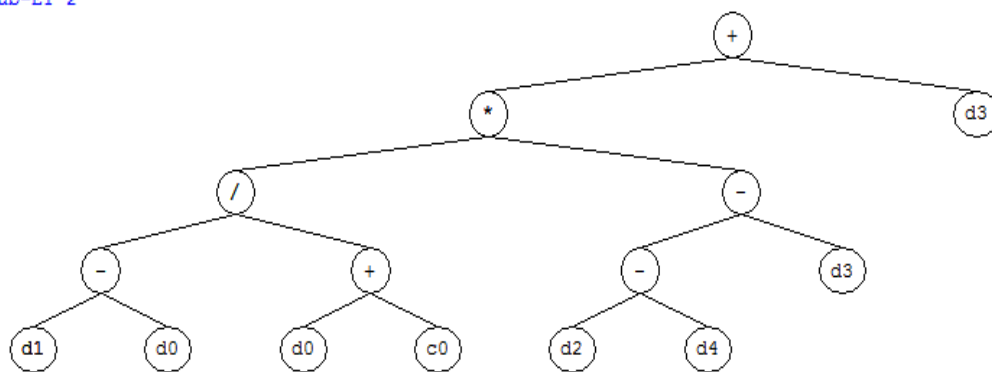
$$\begin{aligned} & \left(d(1) + \left(\exp((6.917389 - d(4) - 3.385162)) - d(2) \right) \right) \\ + \\ & \left(\left(\left(\frac{d(2) - d(1)}{d(1) + 4.276459} \right) \right) \times \left((d(3) - d(5)) - d(4) \right) \right) + d(4) \\ + \\ & \left(\left(\log(d(2)) \times \log(d(2)) \right) + \left(\frac{d(2)}{d(1)} \right) \right) - \left(\log(d(3))^2 \right) \end{aligned}$$

در ادامه بیان درختی رابطه فوق نشان داده شده است. در ساختار فوق، d_1 اشل، d_2 اشل با یک گام تأخیر زمانی، d_3 اشل با دو گام تأخیر زمانی، d_4 دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی و d_5 دبی جریان با دو گام تأخیر زمانی می باشد.

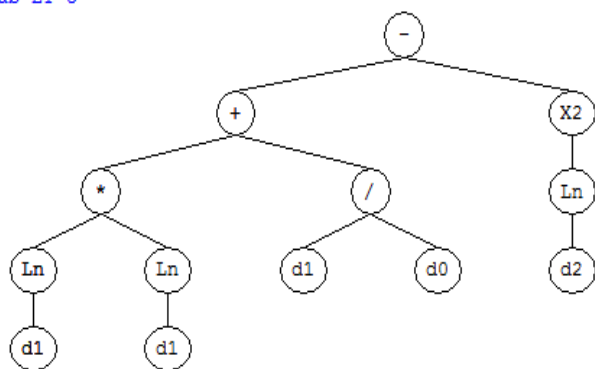
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



شکل (۴-۳۴) بیان درختی ژنهای ۱، ۲ و ۳ برای ترکیب ۶ حالت اول

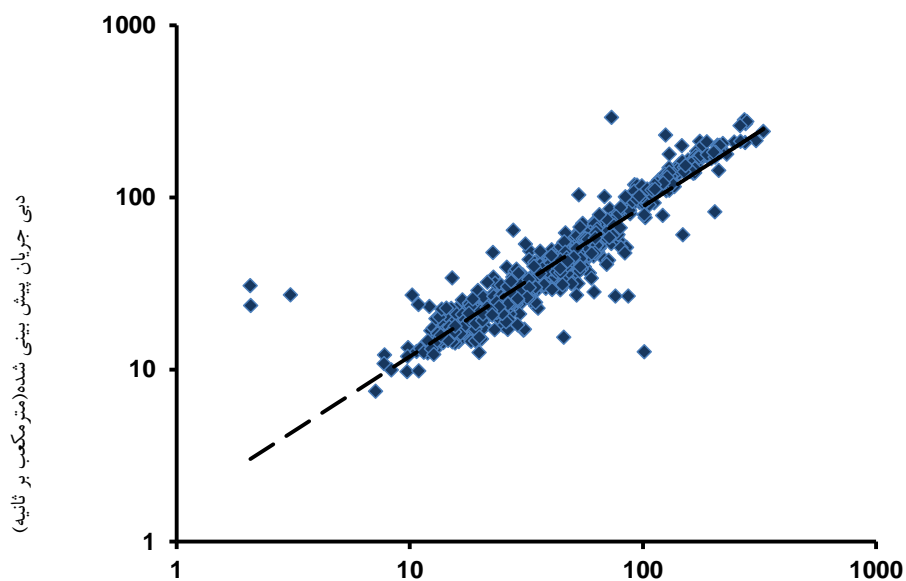
۴-۳-۲-۲- حالت دوم ترکیبها

در جدول (۴-۳۳) ضرایب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین حاصل از ترکیبهای ذکرشده در حالتی که متغیرها نرمالسازی شدند، در دو مرحله آموزش و آزمون، ارائه گردیده است. همانطور که پیشتر گفته شد، ترکیبی مطلوب و بهینه است که بیشترین ضریب همبستگی را دارا بوده و کمترین میزان خطا را به خود اختصاص دهد.

جدول (۴-۳۳) نتایج ترکیبات GEP حالت دوم

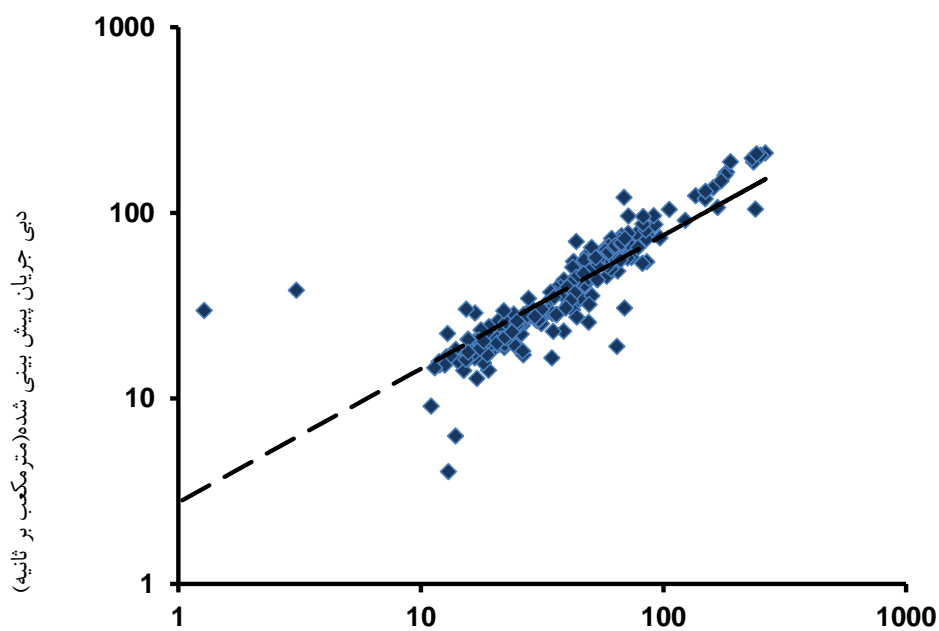
الگو	آموزش			آزمون		
	R ²	RMSE (m ³ /s)	MAE (m ³ /s)	R ²	RMSE (m ³ /s)	MAE (m ³ /s)
۱	0.84	20.623	12.556	0.36	34.819	19.623
۲	0.87	18.668	9.769	0.82	19.368	10.518
۳	0.89	17.151	7.634	0.90	13.936	6.712
۴	0.84	20.800	12.601	0.35	35.116	19.243
۵	0.86	19.514	9.888	0.81	19.012	9.720
۶	0.91	15.613	7.227	0.90	13.621	6.419

بررسی نتایج ترکیبهای مختلف ورودی به مدل نشان می‌دهد که به جز ترکیب ۱ و ۴، در تمامی ترکیبها مدل توانسته است به خوبی دبی جریان را پیش‌بینی کند. در مجموع با توجه به شاخصهای آماری، ترکیب ۶ $\{ (H_t, H_{t-1}, H_{t-2}, Q_{t-1}, Q_{t-2}) \}$ با ضریب همبستگی ۰/۹۱، متوسط خطای میانگین ۷/۲۲۷ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۱۵/۶۱۳ (مترمکعب بر ثانیه) در مرحله آموزش و با ضریب همبستگی ۰/۹۰، متوسط خطای میانگین ۶/۴۱۹ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۱۳/۶۲۱ (مترمکعب بر ثانیه) در مرحله آزمون بهترین ترکیب و عملکرد قابل قبولی داشته است، به عبارتی نتایج قابل اطمینانی ارائه می‌کند. در شکل‌های (۴-۳۵) و (۴-۳۶) نتایج حاصل از اجرای ترکیب سوم در دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده شده است.



دبی جریان اندازه گیری شده (مترمکعب بر ثانیه)

شکل (۳۵-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۶ حالت دوم در مرحله آموزش



دبی جریان اندازه گیری شده (مترمکعب بر ثانیه)

شکل (۳۶-۴) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه گیری شده و پیش بینی شده ترکیب ۶ حالت دوم در مرحله آزمون

در جدول (۴-۳۴) مقادیر پارامترهای ثابت ترکیب برتر، ارائه شده است. همان‌طور که اشاره گردید، G1، G2 و G3 ژن‌های ۱، ۲ و ۳ می‌باشند.

جدول (۴-۳۴) مقادیر ثابت در بیان درختی ترکیب ۶ حالت دوم

G3C1	G3C0	G2C1	G2C0	G1C1	G1C0
-7.710022	-3.523285	-3.90329	-5.285309	-3.90329	-4.243255

همچنین ساختار ORF ژن‌های موردنظر به زبان Matlab به صورت زیر می‌باشد.

$$\left(\left(d(2) - d(1) \times d(4) \right) - \left(\left(\frac{d(3)}{-3.90329} \right) + d(4) \right) \right) / -4.243255$$

+

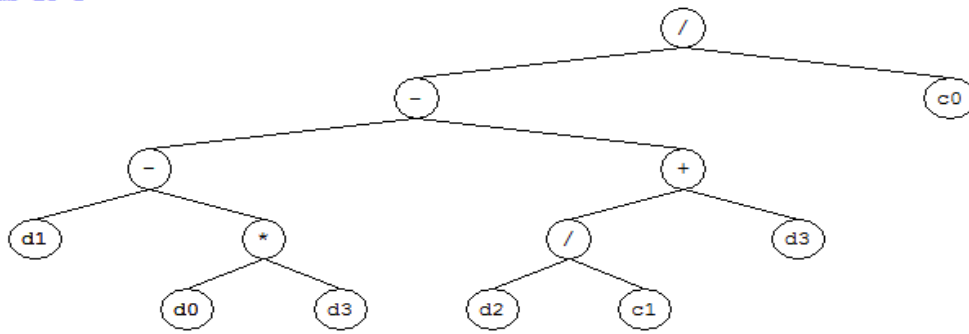
$$\sin(\cos(\tan^{-1}((d(5) \times d(1)) + (d(4)^3))) + d(2))$$

+

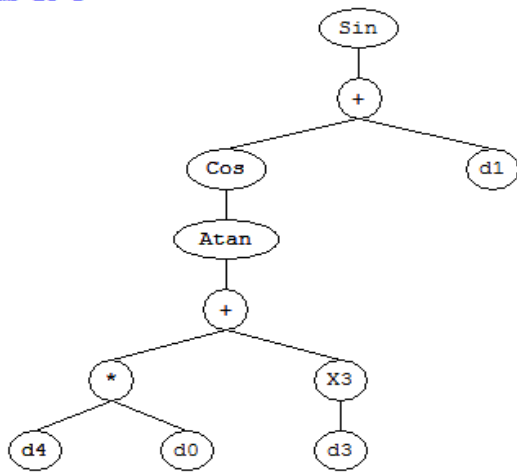
$$\sin(\cos(\exp(((d(4) \times -3.523285) + d(5))) + d(1))^2)$$

در ادامه بیان درختی رابطه فوق نشان داده شده است. در ساختار فوق، d_1 اشل، d_2 اشل با یک گام تأخیر زمانی، d_3 اشل با دو گام تأخیر زمانی، d_4 دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی و d_5 دبی جریان با دو گام تأخیر زمانی می‌باشد.

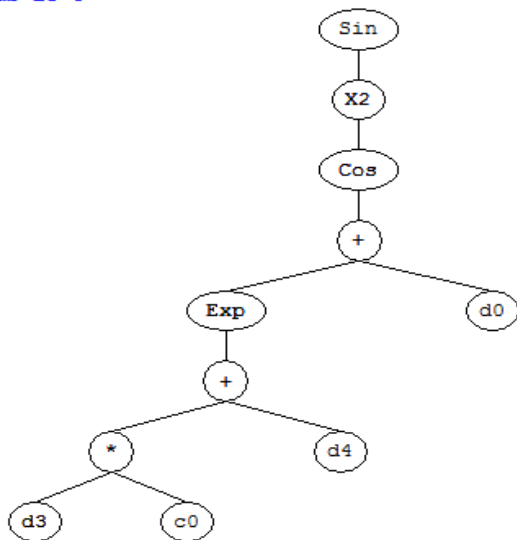
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



شکل (۴-۳۷) بیان درختی ژن‌های ۱، ۲ و ۳ برای ترکیب ۶ حالت دوم

۴-۳-۲-۳- جدول مقایسه‌ای ترکیب‌های برتر دو حالت استفاده‌شده در روش GEP برای پیش‌بینی دبی جریان

در جدول (۴-۳۵) مقایسه نتایج ترکیب‌های برتر در دو حالت ذکرشده ارائه گردیده است.

جدول (۴-۳۵) مقایسه نتایج ترکیب‌های برتر GEP در دو حالت ذکرشده

الگو	مرحله اجرا	MAE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	R ²
ترکیب ۶ حالت اول	آموزش	6.036	12.095	0.92
	آزمون	6.484	15.407	0.88
ترکیب ۶ حالت دوم	آموزش	7.227	15.613	0.91
	آزمون	6.419	13.621	0.90

بررسی نتایج جدول فوق نشان داد که ترکیب ۶ $\{H_t, H_{t-1}, H_{t-2}, Q_{t-1}, Q_{t-2}\}$ در حالت اول (حالتی که متغیرها بدون نرمال‌سازی استفاده شدند)، با ضریب همبستگی ۰/۹۲، متوسط خطای میانگین ۶/۰۳۶ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۱۲/۰۹۵ (مترمکعب بر ثانیه) در مرحله آموزش نسبت به ترکیبات دیگر عملکرد بهتری داشته ولی در مرحله آزمون ترکیب ۶ در حالت دوم (حالتی که متغیرها نرمال شدند) با ضریب همبستگی ۰/۹۰، متوسط خطای میانگین ۶/۴۱۹ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۱۳/۶۲۱ (مترمکعب بر ثانیه) عملکرد قابل قبولی را داراست. ضریب همبستگی ۰/۹۰، نشان‌دهنده توانایی قابل قبولی در برآورد رسوب معلق در این بخش می‌باشد و به عبارتی نتایج قابل اطمینانی در پیش‌بینی بار رسوب معلق ارائه می‌کند.

۳-۳-۴- روش ماری (MARS)

به منظور اجرای مدل MARS، از ۵ ترکیب ورودی که در جدول (۳۶-۴) ارائه شده است، استفاده گردید.

جدول (۳۶-۴) ترکیبات ورودی به مدل

الگو	ترکیبات
۱	$Q_t = f(H_t, Q_{t-1})$
۲	$Q_t = f(H_t, H_{t-1}, Q_{t-1})$
۳	$Q_t = f(H_t, H_{t-1}, H_{t-2})$
۴	$Q_t = f(H_t, Q_{t-1}, Q_{t-2})$
۵	$Q_t = f(H_t, H_{t-1}, H_{t-2}, Q_{t-1}, Q_{t-2})$

در جدول فوق همان طور که مشاهده می شود ترکیب اول از ارتفاع آب و دبی جریان تشکیل شده است. در ترکیب دوم اشل، اشل با یک گام تأخیر زمانی و دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی به عنوان ورودی به مدل معرفی گردید. در ترکیب سوم اشل و اشل با یک و دو گام تأخیر زمانی به عنوان ورودی مدل معرفی شدند. در ترکیب چهارم نیز اشل و دبی جریان با یک و دو گام تأخیر زمانی به مدل معرفی شدند. در ترکیب پنجم، پارامترها با یک و دو گام تأخیر زمانی به عنوان ورودی به مدل معرفی شده اند.

ترکیب های ذکر شده در ۲ حالت مختلف استفاده شد که به شرح زیر می باشد:

- ۱- حالت اول، حالتی که متغیرها بدون نرمال سازی به عنوان ورودی معرفی شدند.
- ۲- حالت دوم، حالتی که متغیرها به صورت نرمال مورد استفاده قرار گرفتند.

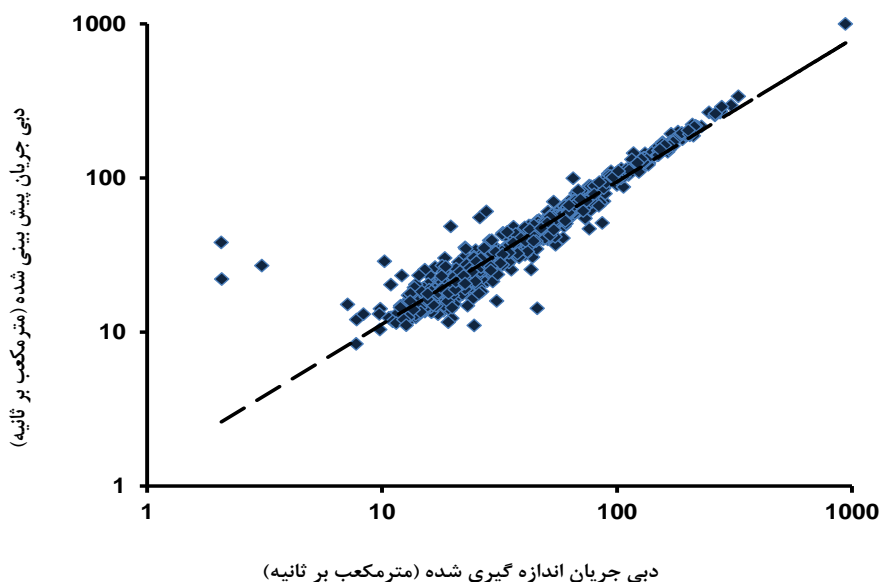
۳-۳-۴-۱- حالت اول ترکیبها

در جدول (۳۷-۴) ضرایب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای میانگین حاصل از ترکیب های ذکر شده در حالت اول (در حالت اول، متغیرها بدون نرمال سازی، استفاده شدند) در دو مرحله آموزش و آزمون، ارائه گردیده است.

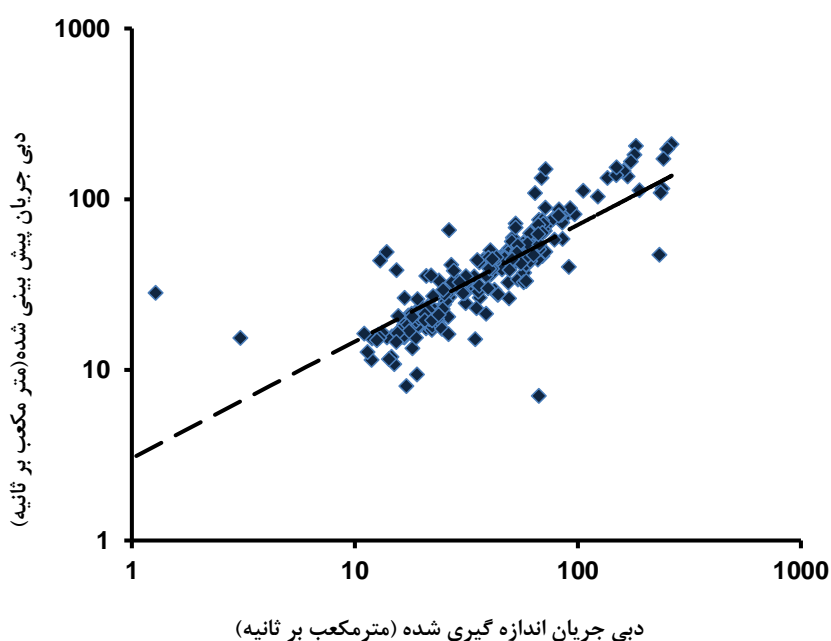
جدول (۴-۳۷) نتایج ترکیبات MARS حالت اول

الگو	آموزش			آزمون		
	MAE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	R ²	MAE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	R ²
۱	6.811	11.263	0.96	22.149	49.402	0.24
۲	4.336	7.343	0.99	10.397	21.168	0.72
۳	11.231	16.519	0.92	23.722	47.009	0.17
۴	7.401	11.539	0.96	17.067	38.145	0.37
۵	4.960	6.820	0.99	10.193	22.795	0.73

از مقایسه نتایج جدول فوق، مشخص گردید که ترکیب ۵ $\{H_t, H_{t-1}, H_{t-2}, Q_{t-1}, Q_{t-2}\}$ با ضریب همبستگی ۰/۹۹، متوسط خطای میانگین ۴/۹۶ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۶/۸۲ (مترمکعب بر ثانیه) در مرحله آموزش و با ضریب همبستگی ۰/۷۳، متوسط خطای میانگین ۱۰/۱۹۳ و جذر میانگین مربعات خطا ۲۲/۷۹۵ در مرحله آزمون از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد. در شکل‌های (۴-۳۸) و (۴-۳۹) نتایج حاصل از اجرای ترکیب پنجم در دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده شده است.



شکل (۴-۳۸) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۵ حالت اول در مرحله آموزش



شکل (۴-۳۹) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه گیری شده (مترمکعب بر ثانیه) و پیش‌بینی شده ترکیب ۵ حالت اول در مرحله آزمون

۴-۳-۲- حالت دوم ترکیبها

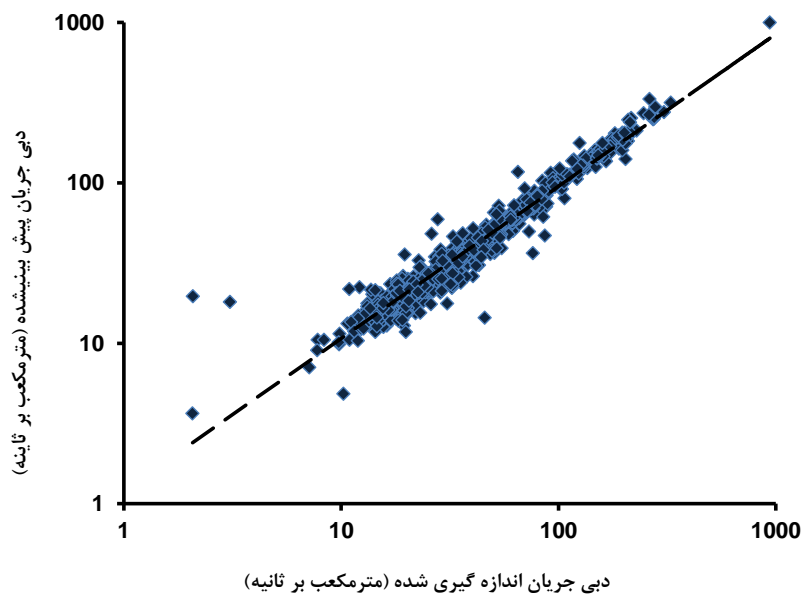
در این حالت، متغیرها به صورت نرمال شده به عنوان ورودی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. پارامترهای آماری در مراحل آموزش و آزمون در جدول (۴-۳۸) ارائه گردیده است.

جدول (۴-۳۸) نتایج ترکیبات MARS حالت دوم

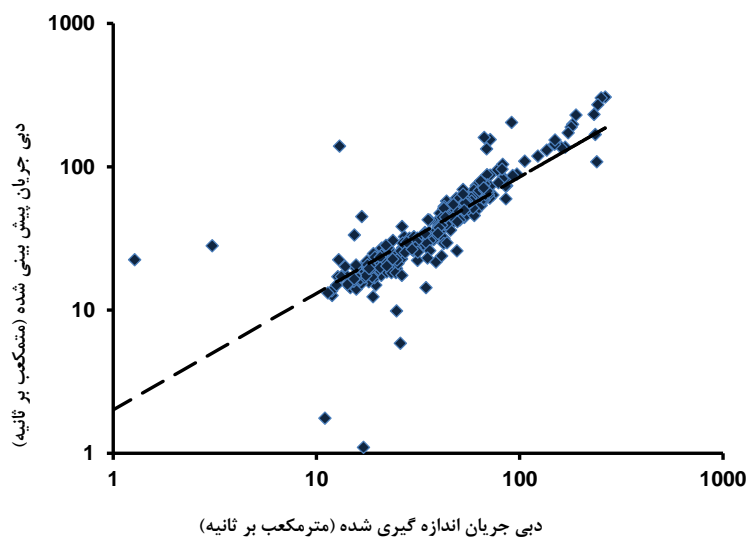
الگو	آموزش			آزمون		
	MAE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	R ²	MAE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	R ²
۱	8.196	14.589	0.94	6322551	103495973	0.00
۲	4.839	9.079	0.98	26.882	330.985	0.01
۳	11.402	18.826	0.90	21.208	35.081	0.36
۴	7.445	13.368	0.95	65575602	1073518259	0.00
۵	4.761	8.692	0.98	8.362	18.607	0.84

مقایسه نتایج جدول (۴-۳۸) نشان داد که ترکیب ۵ $\{H_t, H_{t-1}, H_{t-2}, Q_{t-1}, Q_{t-2}\}$ با ضریب همبستگی ۰/۹۸، متوسط خطای میانگین ۴/۷۶۱ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۸/۶۹۲ (مترمکعب بر ثانیه) در مرحله آموزش و با ضریب همبستگی ۰/۸۴، متوسط خطای میانگین

۸/۳۶۲ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۱۸/۶۰۷ (مترمکعب بر ثانیه) در مرحله آزمون بهترین ترکیب و عملکرد قابل قبولی داشته است، به عبارتی نتایج قابل اطمینانی ارائه می‌کند. در شکل‌های (۴-۴۰) و (۴-۴۱) نتایج حاصل از اجرای ترکیب پنجم در دو مرحله آموزش و آزمون نشان داده شده است.



شکل (۴-۴۰) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۵ حالت دوم در مرحله آموزش



شکل (۴-۴۱) نمودار رابطه بین دبی جریان اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده ترکیب ۵ حالت دوم در مرحله آزمون

۳-۳-۳-۴- مقایسه ترکیب‌های برتر دو حالت استفاده‌شده در روش MARS برای پیش‌بینی دبی

جریان

در جدول (۳۹-۴) مقایسه نتایج ترکیب‌های برتر در دو حالت ذکرشده ارائه شده است.

جدول (۳۹-۴) مقایسه نتایج ترکیب‌های برتر MARS در دو حالت ذکرشده

R^2	RMSE (m^3/s)	MAE (m^3/s)	مرحله اجرا	الگو
0.99	6.820	4.960	آموزش	ترکیب ۵ حالت اول
0.73	22.795	10.193	آزمون	
0.98	8.692	4.761	آموزش	ترکیب ۵ حالت دوم
0.84	18.607	8.362	آزمون	

بررسی نتایج جدول فوق نشان داد که ترکیب ۵ $\{H_t, H_{t-1}, H_{t-2}, Q_{t-1}, Q_{t-2}\}$ در حالت دوم (حالتی که متغیرها نرمال شدند) با ضریب همبستگی ۰/۹۸ و ۰/۸۴، متوسط خطای میانگین ۴/۷۶۱ و ۶/۴۱۹ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۸/۶۹۲ و ۱۳/۶۲۱ (مترمکعب بر ثانیه) به ترتیب در مرحله آموزش و آزمون عملکرد قابل قبولی را داراست. ضریب همبستگی ۰/۸۴، نشان‌دهنده توانایی قابل قبولی در برآورد رسوب معلق در این بخش می‌باشد و به عبارتی نتایج قابل اطمینانی در پیش‌بینی بار رسوب معلق ارائه می‌کند.

۳-۳-۳-۴- مقایسه ترکیبات برتر روش‌های انجام‌شده پژوهش در بخش دوم

در جدول (۴۰-۴) ترکیب‌های برتر روش‌های موردبررسی ارائه و روش برتر معرفی شده است.

جدول (۴۰-۴) مقایسه ترکیبات برتر روش‌های انجام‌شده در بخش دوم

آموزش			آزمون			روش‌ها
R^2	RMSE (m^3/s)	MAE (m^3/s)	R^2	RMSE (m^3/s)	MAE (m^3/s)	
0.85	17.56	9.114	0.87	14.603	8.148	رگرسیون خطی
0.90	13.621	6.419	0.91	15.613	7.227	برنامه‌ریزی بیان ژن
0.84	18.607	8.362	0.98	8.692	4.761	مارس

با توجه به جدول قبل و تجزیه تحلیل نتایج آن، مشخص شد که روش مارس در بخش آموزش با ضریب همبستگی ۰/۹۸، متوسط خطای میانگین ۴/۷۶۱ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۸/۶۹۲ (مترمکعب بر ثانیه) عملکرد بهتری داشته ولی روش برنامه‌ریزی ژن در قسمت آزمون با ضریب همبستگی ۰/۹۰، متوسط خطای میانگین ۶/۴۱۹ (مترمکعب بر ثانیه) و جذر میانگین مربعات خطا ۱۳/۶۲۱ (مترمکعب بر ثانیه) بهترین نتیجه را داده است. در جدول زیر روش‌ها باهم مقایسه شده‌اند

جدول (۴-۴۱) مقایسه روش مارس نسبت به روش رگرسیون خطی و برنامه‌ریزی بیان ژن در مرحله آموزش

روش‌ها	MAE	RMSE	R ²
رگرسیون خطی	۴۱/۵۱ درصد کاهش	۴۰/۴۷ درصد کاهش	۱۲/۶۴ درصد افزایش
برنامه‌ریزی بیان ژن	۳۴/۱۲ درصد کاهش	۴۲/۴۲ درصد کاهش	۷/۶۹ درصد افزایش

جدول (۴-۴۲) مقایسه روش برنامه‌ریزی بیان ژن نسبت به روش رگرسیون خطی و مارس در مرحله آزمون

روش‌ها	MAE	RMSE	R ²
رگرسیون خطی	۲۹/۵۶ درصد کاهش	۲۲/۴۳ درصد کاهش	۵/۸۸ درصد افزایش
مارس	۲۳/۲۳ درصد کاهش	۲۶/۸ درصد کاهش	۷/۶۹ درصد افزایش

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و

ارائه پیشنهادها

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش‌های منحنی سنج رسوب، فائو، رگرسیون خطی چند متغیره، برنامه‌ریزی بیان ژن و مارس برای برآورد بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری کره‌سنگ و از روش‌های رگرسیون خطی، برنامه‌ریزی بیان ژن و مارس برای برآورد و پیش‌بینی دبی جریان ایستگاه هیدرومتری کره-سنگ واقع بر رودخانه هراز آمل استفاده شد و نتایج حاصل با هم مقایسه شد. روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و مارس، به عنوان روش‌های تکاملی و نوین هوشمند در مسائل مهندسی آب استفاده شدند. لذا برای این منظور، اطلاعات مربوط به دبی جریان، ارتفاع سطح آب و دبی رسوب مربوط به سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۴۳ از سازمان آب منطقه‌ای مازندران جمع‌آوری شد. به دلیل در دسترس نبودن برخی از اطلاعات و نبود اندازه‌گیری در برخی از ماه‌ها، با صرف‌نظر از این اطلاعات و حذف اطلاعات مشکوک، ۱۰۶۶ سری داده مورد بررسی قرار گرفت. از بین این تعداد داده آماری، ۸۰ درصد آن برای بخش آموزش مدل‌ها و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای بخش آزمون استفاده شد. برای این تحقیق دو بخش در نظر گرفته شد که، پیش‌بینی دبی رسوب در بخش اول تعریف گردید. در بخش اول از اطلاعات دبی رسوب، دبی جریان و ارتفاع سطح آب و ترکیب این متغیرها با تأخیر زمانی به‌عنوان ترکیب‌های ورودی مدل استفاده شد. برای بخش اول تعداد ۱۶ ترکیب تعیین شد که در سه حالت مورد بررسی قرار گرفت. در حالت اول، اطلاعات بدون نرمال‌شدن مورد استفاده قرار گرفتند. در حالت دوم پارامترهای دبی رسوب و دبی جریان نرمال شدند. در حالت سوم هر سه پارامتر نرمال شدند. در بخش دوم تأثیر ارتفاع سطح آب در پیش‌بینی دبی جریان پرداخته شد. به منظور این امر، از اطلاعات دبی جریان و ارتفاع سطح آب و ترکیب آن‌ها با تأخیرهای زمانی مورد استفاده قرار گرفت. برای این بخش ۶ ترکیب تعیین گردید که در سه حالت ذکر شده مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت، پس از برآورد بار رسوب معلق و دبی جریان به کمک روش‌های مذکور در بخش‌ها، نتایج ارائه شد:

در بخش اول که از روش‌های منحنی سنج رسوب، فائو، رگرسیون خطی، برنامه‌ریزی بیان ژن و مارس برای برآورد دبی رسوب استفاده شد نتایج به این صورت بود.

۱- در روش منحنی سنج رسوب به ترتیب در مراحل آموزش و آزمون ضرایب همبستگی برابر با ۰/۶۲ و ۰/۴۹ به دست آمد. این نتایج نشان دهنده ناتوانی این روش در برآورد بار رسوب معلق می‌باشد. هم‌چنین خطاهای بالای این روش برابر $RMSE=55719/4$ (ton/day) و $RMSE=18116/4$ (ton/day) دلیل دیگری مبنی بر ناتوانی این روش در پیش‌بینی بار رسوب معلق با دقت بالا و خطای کم است.

۲- روش فائو نیز با ضرایب همبستگی ۰/۴۳ و ۰/۵۲ و خطای بالای $RMSE=67385/1$ (ton/day) و $RMSE=10517/6$ (ton/day) به ترتیب در مرحله آموزش و آزمون بیانگر ناکارآمدی این روش برای پیش‌بینی بار معلق رسوب می‌باشد.

۳- در روش رگرسیون که به کمک نرم‌افزار SPSS انجام شد در مرحله آموزش با ضریب همبستگی ۰/۸۲ و خطای $RMSE=33133/7$ (ton/day) و در مرحله آموزش با ضریب همبستگی ۰/۷۱ و خطای $RMSE=7850/8$ (ton/day) تا حدودی عملکرد قابل قبولی ارائه کرده است.

۴- روش برنامه‌ریزی بیان ژن با ضرایب همبستگی ۰/۸۳ و ۰/۷۶ به ترتیب در مرحله آموزش و آزمون نشان داد که روش قابل اعتمادی برای پیش‌بینی بار معلق رسوب می‌باشد. خطاها برابر $RMSE=31394$ (ton/day) و $RMSE=6748/4$ (ton/day) به ترتیب در مراحل آموزش و آزمون محاسبه شد و نشان‌دهنده عملکرد خوب این روش در برآورد رسوب معلق می‌باشد.

۵- روش مارس نتایج به این صورت به دست آمد. در مرحله آموزش ضریب همبستگی ۰/۸۴ و خطای محاسبه شده برابر $RMSE=29778/8$ (ton/day) و ضریب همبستگی ۰/۷۰ و خطایی برابر $RMSE=7164/4$ (ton/day)، نشان داد که نتایج قابل قبول و قابل اطمینانی ارائه داده

است. با توجه به نتایج به دست آمده روش مارس، روشی قابل اعتماد برای برآورد رسوب معلق است.

در بخش دوم که از روش‌های رگرسیون خطی، برنامه‌ریزی بیان ژن و مارس برای برآورد دبی جریان استفاده شد نتایج به این صورت بود.

۱- در روش رگرسیون خطی چند متغیره ضریب همبستگی ۰/۸۷ و ۰/۸۵ به ترتیب برای مراحل آموزش و آزمون به دست آمد. همچنین خطاهای بالای این روش برابر با (m^3/s) $RMSE=14/603$ برای مرحله آموزش و $RMSE=17/56$ (m^3/s) برای مرحله آزمون، دلایل ضعف این روش در پیش‌بینی دبی جریان می‌باشد.

۲- در روش برنامه‌ریزی بیان ژن به ترتیب در مراحل آموزش و آزمون ضرایب همبستگی برابر با ۰/۹۱ و ۰/۹۰ به دست آمد. این نشان‌دهنده توانایی این روش در برآورد دبی جریان است. خطاهای مربوط به مراحل آموزش و آزمون نیز معادل با $RMSE=12/613$ (m^3/s) و $RMSE=13/621$ نشان داد که نتایج قابل اطمینانی برای پیش‌بینی دبی جریان ارائه می‌دهد.

۳- در روش مارس به ترتیب در بخش‌های آموزش و آزمون ضرایب همبستگی برابر با ۰/۹۸ و ۰/۸۹ به دست آمد. خطاهای مربوط به مراحل آموزش و آزمون نیز برابر با (m^3/s) $RMSE=8/692$ و $RMSE=16/607$ (m^3/s) محاسبه شد. نتایج نشان داد که عملکرد این روش خوب و قابل اطمینان است.

بررسی و تحلیل نتایج با استفاده از روش‌های ذکر شده در بخش‌های اول و دوم نشان داد که وقتی اطلاعات مورد استفاده به حالت نرمال شده به عنوان ورودی به مدل معرفی شوند، نتایج بهتر شده و مدل بهتر قادر به پیش‌بینی و برآورد رسوب معلق و دبی جریان رودخانه خواهد بود. همچنین این نتیجه به دست آمد که وقتی متغیرها به همراه تاخیر زمانی به مدل معرفی می‌شوند، مدل کارایی

بهتری داشته است. روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و مارس که به‌عنوان روش‌های هوشمند و نوین مورد استفاده قرار گرفتند، عملکرد راضی‌کننده و قابل اطمینانی در برآورد و پیش‌بینی داشته‌اند.

۵-۲- پیشنهادات

به‌منظور افزایش دقت در تعیین بار رسوب و دبی جریان پیشنهاد می‌گردد:

۱- روش‌های هوشمند مانند برنامه‌ریزی بیان ژن، سیستم استنتاجی تطبیقی - عصبی فازی، شبکه عصبی مصنوعی، دیگر الگوریتم‌های تکاملی و روش نوین و جدید مارس در برآورد بار رسوب معلق و دبی جریان به‌کار گرفته شوند.

۲- در برآورد رسوب معلق، می‌توان علاوه بر دبی جریان از ارتفاع سطح آب نیز استفاده کرد. این امر سبب استفاده دو پارامتر هیدرولیکی در پیش‌بینی می‌شود که خود موجب افزایش دقت برآورد رابطه خواهد گردید. همچنین می‌توان از تأخیر زمانی پارامترها در روابط استفاده کرد. علاوه بر این پیشنهاد می‌شود که از پارامترهای هیدرولوژیکی مانند ارتفاع باران، دما و سرعت باد نیز در پیش‌بینی بار رسوب معلق به‌کار گرفته شود.

منابع

ابراهیمی محمدی ش. و وفاخواه م.، (۱۳۸۹) "مقایسه کارایی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون چند متغیره و سنجه‌رسوب در برآورد بار معلق رودخانه هراز" ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری و چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب، تهران.

ادیب آ.، تقوی فر ا. و واقفی م.، (۱۳۹۳) "بررسی اثرات جزر و مد دریایی خلیج فارس بر روی منحنی اشل - دبی در رودخانه کارون" **مجله علوم و فنون دریایی**، دوره ۱۳، شماره ۱.

اقبال پ.، دانشفراز ر. و ثاقبیان س. م.، (۱۳۹۲) "شبیه‌سازی روند توسعه زمانی ابعاد حفره آبستنگی اطراف آبشکن بالدار با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژنی" **نشریه دانش آب و خاک**، جلد ۲۳، شماره ۱، صص ۱۷۷-۱۸۸.

باغبان پور ش. و کاشفی پور س. م.، (۱۳۹۱) "مدل‌سازی عددی انتقال رسوب معلق غیر چسبنده در رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه کرخه)" **مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی**، علوم آب و خاک، سال ۱۶، شماره ۶۱، صص ۴۵-۵۷.

البرزی م.، (۱۳۸۸) "الگوریتم ژنتیک" چاپ اول، انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران، صص ۱۳، ۱۴، ۲۷.

بهرامی یاراحمدی م. و شفافی بجستان م.، (۱۳۹۴) "بررسی تغییرات طول مؤثر صفحات مثلثی شکل بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در قوس ۹۰ درجه" **نشریه مهندسی عمران فردوسی**، سال بیست و هفتم، شماره یک، صص ۱۰۰-۸۷.

تلوری ع.، (۱۳۸۱) "رابطه رسوبدهی معلق با برخی از ویژگی‌های آبخیز در سر شاخه‌های کرخه و دز در استان لرستان" **پژوهش و سازندگی**، شماره ۵۶ و ۵۷، صص ۶۱-۵۶.

حسن‌زاده زردخونی م.، صدقی اصل م. و پرویزی م.، (۱۳۹۴) "ارزیابی روش‌های هیدرولوژیکی برآورد بار معلق در رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه چم‌سیاه)" **مجله پژوهش آب ایران**، جلد ۹، شماره ۱، پیاپی ۱۶، صص ۴۸-۴۱.

حسین‌زاده م.، قادری ک. و احمدی م. م.، (۱۳۹۵) "مدل‌سازی رابطه دبی - اشل در رودخانه با استفاده از روش کنترل گروهی داده‌ها (GMDH) (مطالعه موردی: رودخانه اسکویلیکیل)" **نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک**، جلد بیست و سوم، شماره دوم، صص ۲۸۹-۲۷۹.

حیدری خ.، منصوری ع. و رزم‌خواه ا.، (۱۳۹۱) "ارزیابی برآورد رسوب بار معلق حوضه آبریز کرخه با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی" دومین همایش ملی عمران و توسعه پایدار، مشهد.

خلج م.، (۱۳۹۰) **پایان‌نامه ارشد** "روندیابی سیلاب رودخانه با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک و موج دینامیکی دانشکده" کشاورزی، دانشگاه رازی کرمانشاه.

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، صص ۳۵-۲۸.

- روشنگر ک.، اعلمی م.ت. میرحیدریان ش.، (۱۳۹۳) "بررسی عملکرد و کارائی روش برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد عمق آبستگي پایه‌های پل در بسترهای با خاک چسبنده و غیر چسبنده" **نشریه عمران و محیط زیست**، جلد ۴۴، شماره ۲، پیاپی ۷۵.
- سپهانی ه. و ملکیان آ.، (۱۳۹۰) "برآورد رسوب معلق رودخانه‌ای با استفاده از روش‌های مختلف" **هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری**، اصفهان.
- سلطانی ع.، علیانی ا. و قربانی م.ع.، (۱۳۸۹) "مدلسازی رابطه دبی- اشل در رودخانه‌ها با استفاده از سیستم‌های هوشمند" **مجله دانش آب و خاک**، جلد ۲۰/۱، شماره ۴، صص ۳۰-۱۶.
- شیخ رضازاده نیکو ن.، منعم م.ج. و ضیائی ع.ن.، (۱۳۹۵) "ارائه یک معادله دبی- اشل ساده برای سرریزهای لولایی با فشردگی‌های جانبی مختلف" **نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)**، جلد ۳۰، شماره ۱، صص ۶۲-۵۲.
- شیخعلی‌پور ز.، حسن‌پور ف. و عظیمی و.، (۱۳۹۴) "مقایسه روش‌های هوش مصنوعی در برآورد بار معلق رسوب (مطالعه موردی: رودخانه سیستان)" **نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک**، جلد بیست و دوم، شماره دوم، صص ۴۱-۶۰.
- صادقی س.ح.، (۱۳۸۴) "تهیه معادلات سنج رسوب در شاخه‌های بالارونده و پایین‌رونده آبنگار با استفاده از مفهوم رگرسیون" **تحقیقات منابع آب ایران**، سال ۱، شماره ۱، صص ۱۰۳-۱۰۱.
- صلوی تبار ع.، بندری ر.، حسنی خ. و احتیاط م.، (۱۳۹۰) "شبیه‌سازی تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه هراز" **دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران**، زنجان.
- صمدی‌بروجنی ح.، زمانیان م. و حسین‌پور ف.، (۱۳۹۲) "برآورد رسوب‌دهی سالانه رودخانه‌ها با استفاده از روش "نسبت‌ها" **فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب**، سال سوم، شماره یازدهم، صص ۴۵-۳۵.
- ظهیری ع.، ماکنالی‌زاده ه.، دهان‌زاده ب. و طرفی ص.، (۱۳۸۸) "برآورد حجم رسوب معلق ورودی به مخزن سد کرخه" **هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران**، شیراز.
- عرب خدری م.، (۱۳۸۴) "بررسی رسوبدهی معلق حوزه‌های آبخیز ایران" **تحقیقات منابع آب ایران**، جلد ۱، شماره ۲، صص ۶۰-۵۱.
- عرب خدری 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**، سال یازدهم، شماره سوم، صص ۴۲-۳۳.
- عرب‌خدری م.، میرزایی م.ر.، نیک‌کامی د. و شادفر ص.، (۱۳۹۲) "اثر تفکیک دوره‌های برفی و بارانی در میزان صحت برآورد رسوب‌دهی معلق در حوزه گرگانود" **نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران**، سال هفتم، شماره ۲۰، صص ۶۴-۵۵.
- غفاری گ.، کریمی‌زاده ک. و طباطبایی‌زاده م.، (۱۳۸۸) "تعیین مناسب‌ترین روش جهت برآورد رسوب معلق در ایستگاه‌های بالادست حوضه سد لتیان و طالقان" **هشتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی رودخانه**، اهواز.

غلامی و، مشکلی ع، هادیان م.ع. و امینی س، (۱۳۸۴) " بررسی تأثیر استقرار پوشش گیاهی در کناره‌های بستر رودخانه در فرسایش کناری رودخانه‌ای (مطالعه موردی: رودخانه هراز) " سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، تهران.

کاویان ع، گلشن م، روحانی ح. و اسمعیلی عوری ا، (۱۳۹۴) " شبیه‌سازی رواناب و بار رسوب حوضه آبخیز رودخانه هراز مازندران با بهره‌گیری از الگوی SWAT " پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۷، شماره ۲، صص ۲۱۱-۱۹۷.

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

کریمی دمنه ر، (۱۳۹۳) " پایان‌نامه ارشد " پیش‌بینی بار رسوب معلق سد کرخه به کمک برنامه‌ریزی بیان ژن " دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود.

کیاء ع. و عمادی ع، (۱۳۹۲) " مقایسه روش‌های مختلف رگرسیون آماری در برآورد بار رسوب معلق درازمدت سالانه (مطالعه موردی: بابل‌رود) " پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، سال چارم، شماره ۸، صص ۲۷-۱۵.

ماکنالی‌زاده ه، اسروش م، هدایت ن. و زمان‌زاده م، (۱۳۸۹) " تحلیلی بر روند رسوبگذاری و میزان آورد رسوب رودخانه‌ها به مخازن سدها بر اساس روش‌های FAO و USBR (مطالعه موردی: سد مخزنی کرخه در شمال غربی خوزستان) " دومین کنفرانس سراسری مدیریت جامعه منابع آب، کرمان.

ماکنالی‌زاده ه، طرفی ع، طرفی ص. و اسروش م، (۱۳۸۹) " بررسی آورد رسوب کل سرشاخه‌های اصلی رودخانه کرخه به سد مخزنی کرخه بر اساس روش‌های FAO و USBR " نخستین کنفرانس سراسری پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، کرمانشاه.

محمدی ص. و قبادیان ر، (۱۳۹۳) " مدل‌سازی عددی منحنی سنجح حلقه‌ای در کانال‌های منظم و نامنظم، مطالعه موردی: رودخانه قره‌سو " فصلنامه بین‌المللی پژوهشی تحلیلی منابع آب و توسعه، سال دوم، شماره ۴، پیاپی ۷، صص ۱۰۳-۹۴.

مطیع قادر ح، لطفی ش. و سیداسفهلان م. م، (۱۳۸۹) " مروری بر برخی از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند " چاپ اول، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی شبستر، تبریز، صص ۱۷ و ۱۹.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، (۱۳۸۶) " راهنمای محاسبه بار رسوب معلق و بستر رودخانه " نشریه شماره ۵۹۰.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، (۱۳۸۶) " راهنمای مطالعات فرسایش و رسوب در ساماندهی رودخانه‌ها " نشریه شماره ۳۸۳.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، (۱۳۹۱) " راهنمای مطالعات رسوب‌گذاری و رسوب‌زدایی مخازن سدها " نشریه شماره ۵۸۹.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، (۱۳۹۱) " راهنمای روش‌های مهار رسوب در رودخانه‌ها " نشریه شماره ۵۹۸.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، (۱۳۹۱) "راهنمای کاربرد مدل‌های ریاضی و فیزیکی در مطالعات مهندسی و ساماندهی رودخانه" **نشریه شماره ۵۸۴**.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، (۱۳۹۱) "راهنمای مطالعات رودخانه‌های مخروط‌افکنه‌ای" **نشریه شماره ۵۹۳**.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، (۱۳۹۱) "راهنمای مطالعات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها" **نشریه شماره ۵۹۲**.

ملکی پ.، کتابداری م.ج.، صمدی بروجنی ح. و ملکی د.، (۱۳۹۴) "ارزیابی روش‌های محاسبه منحنی دبی اشل در رودخانه‌های با فرم بستر ریبیل" **نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک**، جلد ۲۹، شماره ۴، صص ۸۱۹-۸۱۰.

نصرآبادی م.، ریاحی ص. و صمدی بروجنی ح.، (۱۳۹۳) "ارزیابی معادلات توزیع غلظت رسوبات معلق در کانال‌های باز" **مجله پژوهش آب ایران**، سال هشتم، شماره چهاردهم، صص ۱۸۵-۱۷۵.

نظام خیایوی خ. و نظام خیایوی س.، (۱۳۸۹) "استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد بار معلق رسوب رودخانه‌ها مطالعه موردی: رودخانه خیایوچای واقع در استان اردبیل" **نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران**، تهران.

نظام خیایوی خ.، نظام خیایوی س. و نظام خیایوی ک.، (۱۳۸۹) "استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) در برآورد بار معلق رسوب رودخانه‌ها مطالعه موردی: رودخانه قره‌سو واقع در استان اردبیل" **نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران**، تهران.

نعیمی ر.، فردوست ف. و قربانی ه.، (۱۳۸۹) "رفتار ژئوشیمیایی عناصر (V، Ni و Ba) را در رسوبات سطحی رودخانه هراز (نورود)" **چهارمین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست**، تهران.

وروانی ج. و خلیفی سیگارودی ش.، (۱۳۸۶) "بررسی میزان خطای منحنی‌های سنج رسوب برای برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی در رودخانه قره چای" **یافته‌های نوین کشاورزی**، سال اول، شماره ۳، صص ۲۱۴-۲۰۱.

وزارت نیرو، (۱۳۸۱) "اندازه‌گیری و بررسی خطاها در نمونه‌برداری بار معلق و بار بستر" **نشریه شماره ۱۴۰-ن**.

وزارت نیرو، (۱۳۸۳) "راهنمای مهار فرسایش و حفاظت رودخانه‌ها" **نشریه شماره ۱۴۹-ن**.

وزارت نیرو، (۱۳۸۴) "راهنمای روش‌های رسوب‌گیری در آبگیرها" **نشریه شماره ۱۴۴-ن**.

وهاب‌زاده ق.، روشن ح.، سلیمانی ک. و مرعشی ا.، (۱۳۹۱) "انتخاب مدل بهینه برآورد بار رسوبی معلق رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه هراز، استان مازندران)" **نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه**، اهواز.

هاشمی س.ع. و عرب‌خداری م.، (۱۳۸۹) "رسوب‌سنجی مخازن سدهای کوچک به منظور ارزیابی مدل MPSIAC در استان سمنان" **مجله مهندسی و مدیریت آبخیز**، جلد ۲، شماره ۱، صص ۳۴-۲۵.

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

Azamathulla H.Md. (2013) "A Review on Application of Soft Computing Methods in Water Resources Engineering" **Metaheuristics in Water, Geotechnical and Transport Engineering**, Chapter 2, pp 27-39.

- Azamathulla H.Md. and Haque A. A. M., (2012) "Prediction of scour depth t culvert outlets using gene-expression programming" **International Journal of Innovative Computing, Information and Control**, 8, 7(B), pp 5045-5054.
- 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, pp 715-729.
- Azamathulla H.Md., Ghani A. Ab., 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, pp 2901-2916.
- Bahadur Singh V., Ramanathan AL., Pottakkal J. G. and Kumar M., (2014) "Seasonal variation of the solute and suspended sediment load in Gangotri glacier meltwater, central Himalaya, India" **Journal of Asian Earth Sciences**, 79, pp 224-234.
- Bali A. and Mahdinejad Noori M., (2013) "Seismic Data Forecasting: A Sequence Prediction or a Sequence Recognition Tas" *International Journal of Engineering*, 26 (2), pp 137-142.
- Danandeh Mehr A., Kahya E. and Olyaie E., (2013) "Streamflow prediction using linear genetic programming in comparison with a neuro-wavelet technique" **Journal of Hydrology**, 505, pp 240-249.
- Emamgolizadeh s., Bateni S. M., Shahsavani D., Ashrafi T. and Ghorban H., (2015) "Estimation of soil cation exchange capacity using Genetic Expression Programming (GEP) and Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS)" *Journal of Hydrology*, 529 (3), pp 1590-1600.
- Ferreira C., (2001, a) "Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems" **Complex Systems**, 13(2), pp 87-129.
- Ferreira C., (2001, b) "Gene Expression Programming in Problem Solving" **WSC6 tutorial**, Chile.
- Ferreira C., (2004) "Gene Expression Programming And The Evolution Of Computer Programs" *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*, pp 82-103.
- Ferreira C., (2006) "Automatically Defined Functions in Gene Expression Programming" **Genetic Systems Programming: Theory and Experiences**, 13, pp 21-56.
- Garg V. and Jothiprakash V., (2013) "Evaluation of reservoir sedimentation using data driven techniques" **Applied Soft Computing**, 13, pp 3567-3581.
- Güven A. and Kisi O., (2011) "Estimation of Suspended Sediment Yield in Natural Rivers Using Machine-coded Linear Genetic Programming" **Water Resour Manage**, 25, pp 691-704.
- Güven A. and Talu N. E., (2010) "Gene Expression Programming for Estimating Suspended Sediment Yield in Middle Euphrates Basin, Turkey" **Clean – Soil, Air, Water**, 38 (12), pp 1159-1168.
- Haddadchi A., Movahedi N., Vahidi E., Omid M. H. and Dehghani A. A., (2013) "Evaluation of suspended load transport rate using transport formulas and artificial neural network models (Case study: Chelchay Catchment)" **Journal of Hydrodynamics**, 25(3), pp459-470.
- Haghighi A. and Zahdeh Asl A., (2014) "Uncertainty analysis of water supply networks using the fuzzy set theory and NSGA-II" **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 32, pp 270-282.
- Harrington S. T. and Harrington J. r., (2013) "An assessment of the suspended sediment rating curve approach for load estimation on the Rivers Bandon and Owenabue, Ireland" **Geomorphology**, 185, pp 27-38.
- Hashami M. Z. and Shamseldin A. Y., (2014) "Use of Gene Expression Programming in regionalization of flow duration curve" **Advances in Water Resources**, 68, pp 1-12.

Hashmi M. Z., Shamseldin A.Y. and Melville B. W., (2011) "Statistical downscaling of watershed precipitation using Gene Expression Programming (GEP)" **Environmental Modelling & Software**, 26, pp 1639-1646.

<http://www.tabnakmazani.ir/fa/news/112736>.

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, pp 50-62.

Kisi O., Hosseinzadeh Dailr A., Cimen M. and Shiri J., (2012) "Suspended sediment modeling using genetic programming and soft computing techniques" **Journal of Hydrology**, 450-451, pp 48-58.

Kisi O., Shiri J. and Tombul M., (2013) "Modeling rainfall-runoff process using soft computing techniques" **Computers & Geosciences**, 51, pp 108-117.

Kumar B., Jba A., Deshpande V. and Sreenivasulu G., (2014) "Regression model for sediment transport problems using multi-gene symbolic genetic programming" **Computers and Electronica in Agriculture**, 103, pp 82-90.

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), pp 375-384.

Marti P., Shiri J., Duran-Ros M., Arbat G., de Cartagena F.R. and Puig-Bargués J., (2013) "Artificial neural networks vs. Gene Expression Programming for estimating outlet dissolved oxygen in micro-irrigation sand filters fed with effluents" **Computers and Electronics in Agriculture**, 99, pp 176-185.

Mohamed Moussa Y.A, (2013) "Modeling of local scour depth downstream hydraulic structures in trapezoidal channel using GEP and ANNs" **Ain Shams Engineering Journal**, 4, pp 717-722.

Moharana S. and Khatua K.K., (2014) "Prediction of roughness coefficient of a meandering open channel flow using Neuro-Fuzzy Inference System" **Measurement**, 51, pp 112-123.

Nastos P.T., Paliatsos A.G., Koukouletsos K.V., Larissi L.K. and Moustiris K.P., (2014) "Artificial neural networks modeling for forecasting the maximum daily total precipitation at Athens, Greece" **Atmospheric Research**, 144, pp 141-150.

Nourai v., Hosseini Baghanam A., Adamowski J. and Kisi O., (2014) "Applications of hybrid Wavelet-Artificial Intelligence models in hydrology: A review" **Journal of Hydrology**, 1-94.

Nourani V. and Komasi M., (2013) "A geomorphology-based ANFIS model for multi-station modeling of rainfall-runoff process" **Journal of Hydrology**, 490, pp 41-55.

Palmieri A., Shah F., W. Annandale G. and Danier A., (2003) "Reservoir Conservation" Vol. 1, **The Rescon Approach**, P.9.

Rossi L., Che`vre N., Fankhauser R., Margot J., Curdy R., Babut M. and Barry D. A., (2013) "Sediment contamination assessment in urban areas based on total suspended solids" **water research**, 47, 339-350.

Roushangar K., Akhgar S., Salmasi F. and Shiri J., (2013) "Modeling Energy Dissipation over Stepped Spillways using Machine Learning Approaches" **Journal of Hydrology**, 1-36.

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, pp 122-114.

Shamaei E. and Kaedi M., (2016) "Suspended sediment concentration estimation by stacking the genetic programming and neuro-fuzzy predictions" **Applied Soft Computing**, 45, 187-195.

Shiri J., Ashraf Sadraddini A., Nazemi A.H., Kisi O., Landaras C., Fakheri Fard A. and Marti P., (2014) "Generalizability of Gene Expression Programming-based approaches for estimating daily reference evapotranspiration in coastal stations of Iran" **Journal of Hydrology**, 508, pp 1-11.

Water Research Institute, (2000) "Sedimentation in the Reservoir of Large Dams in Iran" **Ministry of Energy, P.6.**

Wilson W. S., (2008) "Classifier conditions using gene expression programming" **IlliGAL report**, 4998, pp 206-217.

Zakaria N.A., Azamathulla H.Md., Chang C.K. and Ghani A. Ab., (2010) "Gene expression programming for total bed material load estimation a case study" **Science of the Total Environment**, 408, pp 5078-5085.

Use of Gene expression Programming (GEP) and Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) to model stage– discharge and suspended sediment load of Haraz River

Abstract

Determining the load of suspended sediment in rivers is of most important factor in water engineering, hydraulics, and environmental; so, it has a strong effect on the design and management of hydraulic structures. The loss of agricultural land, filling reservoirs, and irrigation canals are the problems resulting from erosion and sedimentation. Continual measurement of flow discharge is difficult and time-consuming. It is more difficult even in flooding. Hence, by establishing stage-discharge relation, flow discharge of river can be estimated. So far, much attempt has been made to predict the suspended sediment load accurately, most of which were performed through establishing the relationship between sediment discharge and flow discharge to estimate sediment discharge. However, these regression conventional methods including sediment rating curve and FAO lack certainty. Therefore, many researchers have turned to intelligent methods such as artificial neural network, neuro fuzzy-comparative inference system, and evolutionary algorithms. In the present study, to predict suspended sediment discharge and flow discharge of Kore Sang's hydrometric station in Amol located on Haraz River, gene expression programming (GEP) and MARS methods were developed, and the obtained results were compared with that of sediment rating curve, FAO, and linear regression methods. For models input, flow discharge, water level, and station's sediment discharge data related to 1964-2013 were collected and examined. This study was conducted in two parts: In the first part, the data for flow discharge, water level, and sediment discharge was introduced as input into the model to predict sediment discharge. In the second part, the data for flow discharge and water level was introduced as input into the model, and a relationship has been established between flow discharge and water level. Comparing the results obtained and examining statistical parameters, including correlation coefficient (R^2), root mean square error (RMSE), and mean average error (MAE) revealed that comparing other methods, GEP and MARS ones had a significant advantage in predicting. The study results also showed that MARS method had better performance in the first and second part of training phase, and GEP method had better performance in the last part of testing phase.

Keywords: stage-discharge, suspended sediment load, Kore Sang's hydrometric station in Amol, Haraz River, gene expression programming (GEP), MARS.



**Faculty of Agricultural
M.Sc. Thesis in Water Structures Engineering**

**Use of Gene expression Programming (GEP) and
(MARS) to model Multivariate Adaptive Regression Splines
stage – discharge and suspended sediment load of Haraz
River**

By: Alireza Ranjbar

Supervisors:

Dr. Samad Emamgholizadeh

Advisor:

Razieh Karimi demne

January 2017