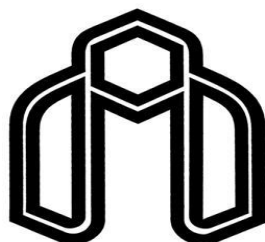


سورة الفجر



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه های آبی

شبیه سازی رواناب و رسوب با استفاده از مدل WetSpa

نگارنده: رقیه جعفرپور

استاد راهنما

دکتر صمد امامقلی زاده

استاد مشاور

دکتر حسین رحمتی

بهمن ۱۳۹۸

شماره: ۱۰۴  
تاریخ: ۱۳۹۹ / ۲ / ۷

باسمه تعالی



**فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد**

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم رقیه جعفرپور با شماره دانشجویی ۹۴۰۴۹۵۴ رشته مهندسی کشاورزی گرایش سازه های آبی تحت عنوان شبیه سازی رواناب و رسوب با استفاده از مدل wetspa که در تاریخ ۱۳۹۸/۱۱/۰۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	<input type="checkbox"/> ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۷/۹۹
<input checked="" type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	<input type="checkbox"/> د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
<input type="checkbox"/> ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: <input type="checkbox"/> عملی <input type="checkbox"/> نظری	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر صمد امامقلی زاده	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	-	-	-
۳- استاد مشاور	دکتر حسین رحمتی	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر زهرا گنجی نوروزی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر سید حسین حسینی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر روزبه مؤذن زاده	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمدرضا عامرمان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

## تقدیر و تشکر

خداوند سبحان را سپاسگذارم که به بنده حقیر توفیق انجام و اتمام پژوهش حاضر را عنایت فرمود. از پدر و مادر عزیز و مهربانم به خاطر زحماتی که در طول زندگی به‌مواره برای پیروزی و شادکامی من به‌جان خریدند، تشکر می‌کنم. از همسر عزیزم به خاطر همکاری با و دلگرمی‌هایش تشکر می‌کنم.

بر خود واجب می‌دانم از استاد فرزانه جناب آقای دکتر صد اما علی زاده که به عنوان استاد راهنما در مراحل مختلف این پایان نامه به‌مواره با سه صدر و کثاده- رویی در کنار من بودند و در طول مدت تحصیل از راهنمایی‌های اخلاقی و علمی ایشان بهره‌جسته‌ام تشکر و قدردانی نمایم.

از جناب آقای دکتر حسین رحمتی به عنوان استاد مشاور مسئولیت‌سکنی را قبول زحمت فرمودند و مطمئن‌بدون راهنمایی‌های ایشان، انجام بخش مهمی از این رساله میسر نمی‌شد.

از اساتید گرامیه، جناب آقای دکتر سید حسین حسینی و دکتر روزه مؤذن زاده که زحمت داور می و تصحیح این پایان نامه را بر عهده داشتند نهایت تشکر را دارم.

از نماینده محترم تحصیلات تکمیلی سرکار خانم دکتر زهره کنجی بخاطر اینکه زحمت اداره جلد را تقبل نمودند کمال تشکر را دارم.

رقیه جعفرپور

بهمن ۱۳۹۸

# تعمدنامه

اینجانب رقیه جعفرپور دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه شبیه‌سازی رواناب و رسوب با استفاده از مدل WetSpa تحت راهنمایی دکتر صمد امامقلی‌زاده متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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 می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

پیش‌بینی دقیق جریان در رودخانه‌ها یکی از مهم‌ترین ارکان در مدیریت منابع آب‌های سطحی به‌ویژه اتخاذ تدابیر مناسب در مواقع سیلاب و بروز خشک‌سالی‌ها می‌باشد. با توسعه کامپیوترها و قابلیت‌های محاسباتی و تصمیم‌گیری منطقی آنها، محققین روش‌های جدیدی برای حل دقیق‌تر و بهینه‌تر مسائل و پدیده‌های مختلف توسعه داده‌اند. در پژوهش حاضر، به‌منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه آبریز بار اریه از مدل‌های هیدرولوژیکی WetSpa، HEC-HMS و مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) استفاده گردید. در مدل WetSpa با استفاده از داده‌های هیدرومتری، هواشناسی و همچنین اطلاعات سه نقشه اصلی مدل، فرآیندهای هیدرولوژیک از جمله رواناب شبیه‌سازی گردید. فرآیند شبیه‌سازی مدل HEC-HMS با استفاده از شماره منحنی SCS جهت محاسبه تلفات و روش هیدروگراف واحد SCS جهت برآورد میزان رواناب صورت گرفته است. همچنین برای اجرای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) از داده‌های هواشناسی و آب‌سنجی در قالب ۶ ترکیب پیشنهادی استفاده شد. مقایسه نتایج مدل‌ها نشان داد، مدل HEC-HMS توانایی خوبی در برآورد رواناب منطقه مورد نظر نداشته است و روش برنامه‌ریزی بیان ژن با بیشترین مقدار ضریب همبستگی (R) ۰/۹ و ۰/۹۵ و کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۰/۴۵ و ۰/۳۲ مترمکعب بر ثانیه، به‌ترتیب برای دوره آموزش و آزمون نسبت به مدل WetSpa برتری دارد. همچنین برای شبیه‌سازی رسوب معلق از روش برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده گردید، نتایج نشان داد این روش با ضریب همبستگی ۰/۹۱۸ و ۰/۰۰۲، ریشه میانگین مربعات خطا ۱۳۷۲/۰۵ و ۱۴۴۰۰ تن بر روز، به‌ترتیب در مرحله آموزش و آزمون عملکرد مناسبی در برآورد رسوب منطقه مورد نظر ندارد.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی بیان ژن، حوضه آبریز بار اریه، شبیه‌سازی رواناب، رسوب، HEC-HMS، WetSpa

## فصل اول:

مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- ضرورت انجام تحقیق.....	۳
۱-۳- اهداف.....	۴
۱-۴- معرفی مدل‌ها.....	۴
۱-۵- سازماندهی پایان‌نامه.....	۶
فصل دوم: کلیات و مروری بر تحقیقات پیشین.....	۷
۱-۲- مقدمه.....	۸
۱-۱-۲- مدل.....	۸
۲-۱-۲- مدل‌سازی.....	۸
۱-۲-۳- شبیه‌سازی.....	۹
۲-۲- پیشینه مطالعات مدل WetSpa.....	۹
۳-۲- پیشینه مطالعات مدل HEC-HMS.....	۲۲
۴-۲- پیشینه مطالعات برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP).....	۲۶
فصل سوم: مواد و روش‌ها.....	۳۱
۱-۳- مقدمه.....	۳۲
۲-۳- معرفی منطقه مورد مطالعه.....	۳۲
۱-۲-۳- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی.....	۳۲
۲-۲-۳- مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز بار اریه.....	۳۳

۳-۲-۳- پوشش گیاهی منطقه مطالعاتی.....	۳۳
۳-۲-۴- مشخصات خاک‌شناسی منطقه مطالعاتی.....	۳۴
۳-۲-۵- مشخصات ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی.....	۳۵
۳-۲-۶- وضعیت هواشناسی حوضه بار اریه.....	۳۶
۳-۳- روش تحقیق.....	۳۶
۳-۴- داده‌های مورد نیاز.....	۳۶
۳-۵- تشریح مدل WetSpa.....	۳۶
۳-۵-۱- ورودی مدل WetSpa.....	۳۷
۳-۵-۲- معادلات مدل WetSpa.....	۳۸
۳-۵-۲-۱- بیلان آب در ناحیه ریشه.....	۳۸
۳-۵-۲-۲- رواناب سطحی.....	۳۸
۳-۵-۲-۳- جریان زیرسطحی.....	۳۹
۳-۵-۲-۴- جریان سطحی و جریان آبراهه.....	۴۰
۳-۵-۳- فرآیند شبیه‌سازی مدل.....	۴۱
۳-۵-۴- پارامترهای مدل WetSpa.....	۴۲
۳-۵-۵- واسنجی و اعتبارسنجی مدل WetSpa.....	۴۳
۳-۵-۵-۱- واسنجی مدل.....	۴۴
۳-۵-۵-۲- اعتبارسنجی مدل.....	۴۴
۳-۵-۶- معرفی معیارهای کارایی و ارزیابی مدل.....	۴۴
۳-۵-۶-۱- آریبی مدل.....	۴۵
۳-۵-۶-۲- معیار کارایی ناش- ساتکلیف.....	۴۵



۴۶.....	۳-۶-۵-۳- معیار کارایی ناش - ساتکلیف لگاریتمی برای ارزیابی جریان های کم
۴۶.....	۳-۶-۴-۵- معیار کارایی ناش - ساتکلیف برای ارزیابی جریان های بالا
۴۷.....	۳-۶-۵-۵- شاخص کارایی یا معیار جمعی
۴۸ .....	۳-۶-۶-۵- معیار میانگین قدرمطلق خطا یا میانگین خطای مطلق (MAE)
۴۸.....	۳-۶-۷-۵- معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)
۴۹.....	۳-۶-۸-۵- معیار ضریب همبستگی (R)
۵۰.....	۳-۶-۶-۵- تشریح مدل HEC-HMS
۵۰.....	۳-۶-۱-۵- مدل حوضه
۵۰.....	۳-۶-۱-۱- تلفات حوضه
۵۲.....	۳-۶-۲-۱-۵- مدل انتقال
۵۳.....	۳-۶-۳-۱-۵- آب پایه
۵۳.....	۳-۶-۲-۵- مدل هواشناسی حوضه
۵۳.....	۳-۶-۳-۵- شاخص کنترلی
۵۳.....	۳-۶-۴-۵- واسنجی مدل و اعتبارسنجی مدل
۵۴.....	۳-۶-۵-۵- ارزیابی صحت داده ها
۵۴.....	۳-۶-۷-۵- تشریح مدل برنامه ریزی بیان ژن (GEP)
۵۵.....	۳-۶-۱-۷-۵- ساختار مدل برنامه ریزی بیان ژن
۵۶.....	۳-۶-۲-۷-۵- ورودی های مدل برنامه ریزی بیان ژن
۵۷.....	۳-۶-۳-۷-۵- شاخص های تعیین دقت روش برنامه ریزی بیان ژن
۵۹.....	فصل چهارم: بحث و نتایج
۶۰.....	۴-۱- مقدمه

۶۰.....	۲-۴- مدل WetSpa
۶۰.....	۱-۲-۴- نتایج حاصل از آماده‌سازی نقشه‌های مقدماتی
۶۰.....	۱-۱-۲-۴- نقشه‌های پارامترهای توزیع-مکانی حوضه مستخرج از نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM)
۶۳.....	۲-۱-۲-۴- نقشه‌های پارامترهای توزیعی-مکانی حوضه مستخرج از نقشه کاربری اراضی
۶۶.....	۳-۱-۲-۴- نقشه‌های پارامترهای توزیعی-مکانی حوضه مستخرج از نقشه بافت خاک
۷۰.....	۴-۱-۲-۴- نقشه‌های پارامترهای توزیعی- مکانی ضریب رواناب پتانسیل و ظرفیت ذخیره چالابی
۷۲.....	۵-۱-۲-۴- نقشه توزیعی- مکانی پارامترهای روندیابی جریان
۷۴.....	۲-۲-۴- نتایج شبیه‌سازی هیدروگراف جریان حوضه
۷۷.....	۳-۲-۴- نتایج حاصل از مقایسه هیدروگراف‌های دوره واسنجی و اعتبارسنجی
۷۹.....	۴-۲-۴- نتایج حاصل از معیارهای کارایی مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی
۸۳.....	۳-۴- نتایج حاصل از مدل HEC-HMS
۸۳.....	۱-۳-۴- نتایج حاصل از مقایسه هیدروگراف‌های دوره واسنجی و اعتبارسنجی
۸۳.....	۲-۳-۴- نتایج کارایی مدل HEC-HMS
۸۴.....	۴-۴- نتایج حاصل از روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)
۸۷.....	۱-۴-۴- نتایج نمایه کارایی مدل برای دوره آموزش و آزمون
۸۹.....	۲-۴-۴- نتایج گرافیکی مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در مرحله آموزش
۹۰.....	۳-۴-۴- نتایج گرافیکی برنامه‌ریزی بیان ژن در مرحله آزمون
۹۱.....	۴-۴-۴- ساختار درختی مدل
۹۳.....	۵-۴- مقایسه گرافیکی نتایج اجرای سه مدل WetSpa، HEC-HMS و GEP
۹۵.....	۶-۴- نتایج کارایی سه مدل مورد استفاده در تحقیق
۹۶.....	۷-۴- شبیه‌سازی رسوب با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن

فصل پنجم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات..... ۹۹

۵-۱- مقدمه..... ۱۰۰

۵-۲- نتیجه گیری..... ۱۰۰

۵-۳- پیشنهادات..... ۱۰۱

۳-۱- موقعیت مکانی حوضه آبریز بار اریه در نیشابور و ایران.....	۳۲
۳-۲- نقشه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) حوضه آبریز بار اریه.....	۳۳
۳-۳- نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز بار اریه .....	۳۴
۳-۴- نقشه بافت خاک حوضه آبریز بار اریه.....	۳۵
۳-۵- ساختار کلی مدل WetSpa.....	۳۷
۴-۱- نقشه شیب حوضه بار اریه.....	۶۱
۴-۲- نقشه تعیین مرز حوضه بار اریه.....	۶۱
۴-۳- نقشه توزیع زیر حوضه‌های آبریز حوضه بار اریه.....	۶۲
۴-۴- نقشه عمق ریشه در حوضه بار اریه.....	۶۳
۴-۵- نقشه حداکثر شاخص سطح برگ.....	۶۴
۴-۶- نقشه حداقل شاخص سطح برگ.....	۶۴
۴-۷- نقشه حداکثر ظرفیت نفوذ خاک حوضه بار اریه.....	۶۵
۴-۸- نقشه حداقل ظرفیت نفوذ خاک حوضه بار اریه.....	۶۵
۴-۹- نقشه ظرفیت زراعی خاک حوضه بار اریه.....	۶۶
۴-۱۰- نقشه هدایت هیدرولیکی در حوضه بار اریه.....	۶۷
۴-۱۱- نقشه رطوبت باقیمانده خاک حوضه بار اریه.....	۶۸
۴-۱۲- نقشه تخلخل خاک حوضه بار اریه.....	۶۸
۴-۱۳- نقشه توزیع منافذ خاک حوضه بار اریه.....	۶۹
۴-۱۴- نقشه توزیع رطوبت اولیه خاک حوضه بار اریه.....	۷۰
۴-۱۵- نقشه ضریب رواناب پتانسیل حوضه بار اریه.....	۷۱

۱۶-۴	نقشه ظرفیت ذخیره چالابی حوضه بار اریه.....	۷۱
۱۷-۴	نقشه زمان تمرکز جریان.....	۷۲
۱۸-۴	نقشه زمان تمرکز جریان در خروجی زیرحوضه‌ها.....	۷۳
۱۹-۴	نقشه انحراف معیار زمان پیمایش جریان تا خروجی آبریز.....	۷۳
۲۰-۴	نقشه انحراف معیار زمان پیمایش جریان تا خروجی زیرحوضه‌های آبریز حوضه بار اریه.....	۷۴
۲۱-۴	مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده قبل از واسنجی در مدل WetSpa.....	۷۵
۲۲-۴	مقایسه هیدروگراف روزانه شبیه‌سازی و مشاهداتی در دوره واسنجی مدل WetSpa.....	۷۷
۲۳-۴	مقایسه هیدروگراف روزانه شبیه‌سازی و مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی مدل WetSpa.....	۷۸
۲۴-۴	نمودار نقطه‌ای برآورد رواناب در دوره واسنجی مدل WetSpa.....	۷۸
۲۵-۴	نمودار نقطه‌ای برآورد رواناب در دوره اعتبارسنجی مدل WetSpa.....	۷۹
۲۶-۴	مقایسه هیدروگراف روزانه شبیه‌سازی و مشاهداتی در دوره واسنجی مدل HEC-HMS.....	۸۲
۲۷-۴	مقایسه هیدروگراف روزانه شبیه‌سازی و مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی مدل HEC-HMS.....	۸۲
۲۸-۴	مقایسه هیدروگراف دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در مرحله آموزش.....	۸۹
۲۹-۴	نمودار نقطه‌ای ترکیب پنجم روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در مرحله آموزش.....	۸۹
۳۰-۴	مقایسه هیدروگراف دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در مرحله آزمون.....	۹۰
۳۱-۴	نمودار نقطه‌ای ترکیب ۵ به روش برنامه‌ریزی بیان ژن در مرحله آزمون.....	۹۰
۳۲-۴	بیان درختی ژن‌های ۱، ۲، ۳ توسط مدل GEP در پیش‌بینی رواناب.....	۹۱
۳۳-۴	نتایج برآورد رواناب مدل‌های WetSpa، HEC-HMS و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در دوره واسنجی.....	۹۳

۴-۳۴- نتایج برآورد رواناب مدل‌های WetSpa، HEC-HMS و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در دوره  
اعتبارسنجی.....۹۳

فهرست جداول	صفحه
۳-۱- طبقه‌بندی کارایی مدل برای تعیین درجه تطابق.....	۴۸
۴-۱- مقادیر پارامترهای عمومی مدل WetSpa.....	۷۶
۴-۲- مقادیر معیارهای کارایی مدل در دو مرحله واسنجی (۱۳۹۰/۷/۱ تا ۱۳۹۴/۶/۳۱) و اعتبارسنجی (۱۳۹۴/۷/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱).....	۷۹
۴-۳- مقادیر معیارهای کارایی مدل HEC-HMS.....	۸۳
۴-۴- ترکیب پارامترهای ورودی مدل برنامه‌ریزی بیان ژن.....	۸۵
۴-۵- عملگرهای ریاضی مورد استفاده در برنامه‌ریزی بیان ژن.....	۸۵
۴-۶- مقادیر پارامترهای برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در پیش‌بینی رواناب.....	۸۶
۴-۷- پارامترهای آماری دقت مدل‌های حاصله از برنامه‌ریزی بیان ژن.....	۸۸
۴-۸- مقادیر ثابت در بیان درختی مدل GEP برای پیش‌بینی میزان رواناب.....	۹۲
۴-۹- نتایج مدل‌های WetSpa، HEC-HMS و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP).....	۹۵
۴-۱۰- ترکیب پارامترهای ورودی مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد رسوب معلق.....	۹۶
۴-۱۱- پارامترهای آماری دقت مدل‌های حاصله از برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد رسوب معلق.....	۹۷





# فصل اول

## مقدمه

با توجه به اهمیت و حساسیت امر مهار آب‌های سطحی و زیرسطحی خصوصا در کشور ما که مسئله کمبود آب در پهنه وسیعی از کشور وجود دارد، نیاز به مدل کردن رفتار رودها و شریان‌های آبی جهت برنامه‌ریزی‌های بلندمدت، استفاده بیشتر و بهتر از پتانسیل‌های آنها عمیقا احساس می‌شود، بنابراین لازمه توسعه برنامه‌های مهار آب‌های سطحی دستیابی دقیق به رفتارهای جریان و میزان رسوبات آن می‌باشد (شریفی، ۱۳۸۴). همچنین بهره برداری غیر اصولی از اراضی، بدون درنظر گرفتن قابلیت آن‌ها ظرفیت نگهداری خاک را کاهش و در نتیجه باعث افزایش رواناب سطحی و به دنبال آن فرسایش خاک را به همراه داشته است، که خسارت ناشی از رواناب موجب کاهش میزان آب‌های تحت الارضی، فقیرشدن خاک، ایجاد اختلال در امر کشاورزی، پر شدن سدها و کانال‌ها، جریان سیلاب‌های مخرب و تخریب مزارع و آبادی‌ها، ایجاد اختلال در اشتغال مردم و در نهایت فقر در جهات مختلف می‌گردد (بهرامی، ۱۳۸۸). دلایل متعددی برای پاسخ به این سوال وجود دارد که چرا باید فرآیندهای هیدرولوژیکی را مدل‌سازی کرد؟ پاسخ اصلی این سوال، محدودیت روش‌های اندازه‌گیری در هیدرولوژی می‌باشد. در حقیقت فرد قادر به اندازه‌گیری هر چیزی که راجع به سیستم‌های هیدرولوژیکی، می‌خواهد بداند را ندارد، زیرا فقط تعداد محدودی از روش‌های اندازه‌گیری و همچنین دامنه محدودی از اعداد را در اختیار دارد. بنابراین به روشی احتیاج است تا به وسیله آن بتوان آمار موجود را برای حوضه‌های بدون آمار و یا مکان‌هایی که اندازه‌گیری آنها امکان‌پذیر نیست تعمیم داد و به تغییرات هیدرولوژیکی آینده دست پیدا کرد و این یک روش موثر برای تولید علم می‌باشد (بون، ۲۰۰۰). لذا درک و پیش‌بینی فرآیندهای تولید رواناب و انتقال آن به نقطه خروجی حوضه آبریز، یکی از اساسی‌ترین مباحث علم هیدرولوژی محسوب می‌شود.

براساس طبقه‌بندی ابوت و رفسگارد (۱۹۹۶)، انواع مدل‌ها به دو گروه قطعی و تصادفی تقسیم‌بندی می‌شوند، مدل‌های قطعی خود به سه دسته از لحاظ پیچیدگی تقسیم می‌شوند که شامل مدل‌های فیزیکی، مفهومی و داده محور می‌باشند. همچنین مدل‌های هیدرولوژیکی را می‌توان به‌منظور بررسی و مدیریت منابع آب، برآورد جریان رودخانه، پیش‌بینی سیل و طراحی عملیات مهندسی به دو گروه مدل‌های یکپارچه و توزیعی طبقه‌بندی کرد (بون، ۲۰۰۰). در مدل‌های یکپارچه، توزیع مکانی در متغیرهای ورودی و مشخصات پارامترها و عملکرد فرآیندهای فیزیکی در داده‌های ورودی در نظر گرفته نمی‌شود ولی در مدل‌های توزیعی، تنوع مکانی برای هر یک از متغیرهای ورودی بدون توجه به شکل یا ترکیب هندسی نقاط شبکه، برآورد می‌گردد (تلوری، ۱۳۷۵). انتخاب مدل مناسب با توجه به قابلیت و محدودیت مدل‌های هیدرولوژیکی حوضه مورد مطالعه و با توجه به مؤلفه‌هایی مانند توزیعی یا یکپارچه بودن، فیزیکی یا تجربی بودن، ساختار ساده یا پیچیده بودن صورت می‌پذیرد.

## ۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

مطالعه فرآیندهای طبیعی مرتبط با آب از نیازهای ضروری کشور ایران است. در این راستا داشتن اطلاعات از رواناب و شرایط هیدرولوژیک ضروری می‌باشد. با توجه به این که در کشور ما بیشتر حوضه‌ها فاقد آمار بلند مدت هستند استفاده از مدل برای شبیه‌سازی رواناب ضروری است (مشاری، ۱۳۹۶). مدل‌های بارش-رواناب برای انجام ارزیابی‌های مختلف منابع آب براساس تغییرات فعلی و آینده در حوضه‌های آبریز و همچنین در پیش‌بینی سیل مورد استفاده قرار می‌گیرد (عزیزی، ۲۰۱۸). انتقال بارش به رواناب یک فرآیند بسیار پیچیده‌ای است که درک و نشان دادن کامل آن می‌تواند مشکل باشد (هسو و همکاران، ۱۹۹۵). فرآیند بارش-رواناب جزء مهم‌ترین فرآیندهای هیدرولوژیکی است و مدل‌سازی دقیق آن برای مدیریت منابع آب و کاهش سیل حیاتی است (نورانی، ۲۰۱۷). جدید بودن بیشتر ایستگاه‌های هیدرومتری، نواقص موجود در آمار اکثر این ایستگاه‌ها، قرارگرفتن بیشتر رودها در مناطق خشک، وضعیت بحرانی برداشت آب‌های زیرزمینی و لزوم توجه بیشتر به آب‌های سطحی دلایلی می‌باشند

که مقوله مدل‌سازی، پیش‌بینی و تولید نقشه‌های تغییرات مکانی- زمانی مؤلفه‌های بیلان آبی در حوضه‌های آبریز کشورمان مورد توجه بیشتری واقع گردند. در سال‌های اخیر شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی با مدل توزیعی- مکانی و فن GIS بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. این نوع مدل‌ها توانایی پیش‌بینی سیل، تأثیرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر سیلاب‌های احتمالی در مدیریت حوضه‌های آبریز را دارند. با توجه به اهمیت موضوع در این تحقیق به پیش‌بینی رواناب حوضه بار اریه پرداخته شد.

### ۱-۳- اهداف

هدف از انجام این تحقیق عبارت از:

الف) شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه بار اریه

ب) مقایسه کارایی مدل‌های WetSpa<sup>۱</sup> و HEC-HMS<sup>۲</sup> و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)<sup>۳</sup>

ج) انتخاب مدل شبیه‌سازی بارش-رواناب برتر به لحاظ کارایی در منطقه مورد مطالعه

د) شبیه‌سازی رسوب حوضه بار اریه با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن

### ۱-۴- معرفی مدل‌ها

با گذشت زمان و افزایش جمعیت و تغییرات کاربری اراضی، برنامه‌ریزی برای مدیریت جامع حوضه از اهمیت بیشتری برخوردار می‌گردد. مشکل اساسی برای برنامه‌ریزی در این مورد، کمبود ایستگاه هیدرومتری می‌باشد. برای حل این مشکل می‌توان براساس ویژگی‌های طبیعی حوضه میزان رواناب آن را برآورد کرد که در این میان

---

<sup>۱</sup> Water and Energy Transfer between Soil, Plant and Atmosphere

<sup>۲</sup> Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modelling System

<sup>۳</sup> Gene Expression Programming

مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی با استفاده از تکنیک GIS برای برآورد رواناب و تصمیم‌گیری در حوضه، کاربردی است (صفری، ۲۰۱۲). همچنین در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های هوشمند مانند شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج تطبیقی-عصبی فازی، الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی ژنتیک و برنامه‌ریزی بیان ژن مورد توجه محققین قرار گرفته است. به لحاظ تفاوت در ماهیت زمانی داده‌های ورودی، مدل‌های بارش-رواناب را می‌توان به دو دسته کلی مدل‌های رخداد محور<sup>۱</sup> و پیوسته<sup>۲</sup> دسته‌بندی نمود. دسته اول تنها برای شبیه‌سازی رخداد‌های کوتاه‌مدت مانند سیلاب کاربرد دارند که از آن‌ها می‌توان برای طراحی سرریز سدها، سدهای کنترل سیلاب، پل‌ها، خسارات سیل و ... استفاده نمود. این مدل‌ها در مقیاس زمانی ساعتی قابل اجرا می‌باشند اما مدل‌های پیوسته در گام‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه قابل استفاده می‌باشند. از مدل‌های پیوسته می‌توان برای برآورد آبدی دراز مدت یک رودخانه، برآورد حجم جریان‌ات ورودی به مخازن سدها، مطالعات منابع آب، پایش دوره‌های خشکسالی، مطالعات تغییر اقلیم و ... استفاده نمود (یعقوبی، ۱۳۹۳). یکی از این مدل‌ها، مدل هیدرولوژیک مبتنی بر فیزیک و کاملاً توزیعی، WetSpa می‌باشد که توانایی شبیه‌سازی بیلان آبی، پیش‌بینی سیلاب، شبیه‌سازی فرسایش خاک و انتقال رسوب را داراست. همچنین مدل هیدرولوژیکی یکپارچه HEC-HMS با وجود نیاز به اطلاعات اندک، در عین حال توانایی بالایی در برآورد بارش-رواناب در بیشتر حوضه‌های ایران داشته است. این مدل‌ها می‌توانند پاسخ‌های هیدرولوژیکی حوضه اعم از مدل‌های بارش-رواناب تجربی و مفهومی را برآورد کنند، به‌دلیل اینکه به آسانی قادر به تعیین شرایط آب و هوایی جدید، انواع کاربری اراضی و پوشش زمین<sup>۳</sup> تحت شرایط داده‌های پراکنده می‌باشد و در مناطق معتدل و گرمسیر و سرد با موفقیت آزموده شده‌اند.

---

<sup>۱</sup> Event based

<sup>۲</sup> Continuous

<sup>۳</sup> LULC: Land Use and Land Cover

همچنین روش‌های هوشمند متعددی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم‌های فازی و نروفازی، الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی ژنتیک و معادلات دیفرانسیل تصادفی برای مدل‌سازی بارش-رواناب توسعه یافته است. در تحقیق حاضر از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa، مدل هیدرولوژیکی یکپارچه HEC-HMS و روش هوشمند برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) برای مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب حوضه آبریز بار اریه استفاده شده است.

## ۱-۵- سازماندهی پایان‌نامه

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

فصل اول: مقدمه

فصل دوم: کلیات و مروری بر تحقیقات پیشین

فصل سوم: مواد و روش‌ها

فصل چهارم: بحث و نتایج

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

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

## فصل دوم

### کلیات و مروری بر تحقیقات پیشین

## ۲-۱- مقدمه

در زمینه شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف از جمله رواناب اگرچه استفاده از مدل‌های توزیعی با در نظر گرفتن فرآیندهای حاکم بر پدیده‌های مورد مطالعه برای حوضه‌ها مناسب می‌باشد ولی با توجه به پیچیدگی‌های حاکم بر حوضه، واسنجی این‌گونه مدل‌ها امری دشوار و زمان‌بر است لذا اگر تنها هدف، شبیه‌سازی رواناب باشد، روش‌های هوشمند با قابلیت بالا در مدل‌سازی مسائل غیرخطی می‌توانند جایگزین مناسبی برای مدل‌های نیمه توزیعی و توزیعی باشند، اما اگر علاوه بر شبیه‌سازی رواناب به دنبال شبیه‌سازی سایر اجزای چرخه هیدرولوژیک حوضه، مانند مؤلفه‌های بیلان آب، جریان زیرسطحی، جریان سطحی و جریان زیرزمینی باشیم استفاده از مدل‌های توزیعی و نیمه توزیعی اجتناب ناپذیر است. در این فصل با توجه به مطالعات انجام گرفته و منابع موجود به تشریح مفاهیم مورد بحث، اعم از مدل، مدل‌سازی و شبیه‌سازی پرداخته شده و در ادامه مروری بر تحقیقات محققان پیشین ارائه شده است.

## ۲-۱-۱- مدل

مدل‌های هیدرولوژی نمایش ساده شده‌ای از سامانه هیدرولوژی واقعی می‌باشند، که به مطالعه کارکرد حوضه در واکنش به ورودی‌های گوناگون و فهم بهتر از فرآیندهای هیدرولوژی کمک می‌نمایند. با توجه به تنوع مدل‌های بارش-رواناب در دسترس، انتخاب یک مدل مناسب برای حوضه به‌منظور بهره‌وری و مدیریت منابع آب ضروری می‌باشد (زینی‌وند، ۲۰۱۵).

## ۲-۱-۲- مدل‌سازی

فرآیند ایجاد مدل، مدل‌سازی نامیده می‌شود، به منظور مدل‌سازی یک سیستم درک مفهوم سیستم و مرز سیستم، شناخت کامل تمام اجزا سیستم، عملکرد و روابط آنها با یکدیگر ضروری است.



## ۲-۱-۳- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی عبارت از کاربرد و انجام آزمایش‌هایی با مدل طراحی شده از روی سیستم واقعی با هدف پی‌بردن به رفتار سیستم، یا ارزیابی استراژی‌های گوناگون برای عملیات سیستم می‌باشد.

## ۲-۲- پیشینه مطالعات مدل WetSpa

اکبری و همکاران (۱۳۹۱) با معرفی روش‌های شبیه‌سازی فرسایش و رسوب در مدل‌های SWAT<sup>۱</sup> و WetSpa بیان کردند که یکی از جنبه‌های مهم در مدل‌ها پارامترهای ورودی آن‌ها می‌باشد، مدل SWAT در زمینه فرسایش و رسوب نیاز به ده‌ها پارامتر دارد که دقت شبیه‌سازی بالا بوده ولی اجرا و واسنجی این مدل در نقاط مختلف نیاز به زمان زیادی خواهد داشت. با توجه به دقت و قابلیت‌های مدل WetSpa و سهولت استفاده از آن در مقایسه با مدل SWAT می‌توان انتظار داشت که استفاده از این مدل به سرعت گسترش یابد.

متکان و همکاران (۱۳۹۱) ابتدا جریان روزانه رودخانه حوضه مرک کرمانشاه را با استفاده از مدل WetSpa در محیط GIS و با شرایط کاربری اراضی فعلی شبیه‌سازی کردند و بعد از کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل به تحلیل تأثیرات تغییر کاربری بر روی جریان به‌ویژه دبی پیک جریان پرداخته شد. نتایج حاصل از مدل دقتی معادل ۷۷ درصد براساس ضریب ناش- ساتکلیف نشان می‌دهد. همچنین شبیه‌سازی جریان رودخانه تحت سناریو تغییر کاربری نشان داد که هیدروگراف جریان با تاخیر به اوج خود می‌رسد و در مقایسه با هیدروگراف کاربری فعلی دیرتر فروکش می‌کند. افزون بر این‌ها دبی اوج هیدروگراف نیز بعد از تغییر کاربری پایین‌تر آمده است.

---

<sup>۱</sup> Soil and Water Assessment Tool

دهقانی جبارلو و همکاران (۱۳۹۴) ضریب رواناب پتانسیل و ظرفیت ذخیره چالابی حوضه آبریز نازلوچای را با مدل WetSpa پهنه‌بندی کردند. از مقایسه نقشه شیب و نقشه ضریب رواناب پتانسیل مشاهده شد در قسمت‌هایی از حوضه که شیب بیشتر است، ضریب رواناب پتانسیل نیز مقدار بیشتری را به خود اختصاص داده است در حالی که ظرفیت ذخیره چالابی در نواحی شیب‌دار کمتر است و بین نقشه‌های ضریب رواناب پتانسیل و ظرفیت ذخیره چالابی رابطه معکوس برقرار است.

آذین‌مهر و همکاران (۱۳۹۴) هیدروگراف جریان حوضه رودخانه دینور کرخه را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی WetSpa پیش‌بینی کردند. نتایج شبیه‌سازی حاکی از تطابق خوب بین هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌ای است، به‌طوری که مدل قادر است هیدروگراف‌های روزانه را با دقت خوب براساس معیار ناش-ساتکلیف ۰/۶۶-پیش-بینی نماید.

آذین‌مهر و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیقی به بررسی آنالیز حساسیت و عدم قطعیت مدل WetSpa در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان با استفاده از PEST پرداختند. نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد پارامتر  $K_g$ ، مربوط به ضریب افت آب زیرزمینی که این ضریب منعکس کننده وضعیت ذخیره زیر حوضه است، بیشترین حساسیت را دارا می‌باشد.

الماسی و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیقی به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب سطحی در حوضه آبریز بازفت واقع در شمال غرب استان چهارمحال بختیاری با استفاده از مدل WetSpa پرداختند که نتایج با ضریب ناش-ساتکلیف ۰/۶۳ و ۰/۶۵ به‌ترتیب در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی نشان‌دهنده کارایی مدل برای شبیه‌سازی رواناب در گام زمانی روزانه می‌باشد.

خالقی و همکاران (۱۳۹۵) کارایی مدل WetSpa در شبیه‌سازی رواناب روزانه، تحلیل حساسیت پارامترهای مدل و تأثیر آن بر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی حوضه آبریز رودخانه خرم‌آباد در استان لرستان مورد بررسی قرار دادند. نتایج

نشان داد پارامتر Krun (توان رواناب سطحی) به عنوان حساس ترین پارامتر شناخته شد. ارزیابی کارایی مدل با استفاده از شاخص های آماری از جمله ناش- ساتکلیف (برای مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۶۶) نشان داد که این مدل قابلیت بالایی در شبیه سازی رواناب روزانه دارد.

دهقانی و همکاران (۱۳۹۶) اثرات تغییر اقلیم بر رواناب را با استفاده از مدل WetSpa در حوضه آبریز بازفت صمصامی واقع در چهارمحال بختیاری ارزیابی کردند. سپس مقادیر دما و بارش برای دوره ی آتی براساس سه سناریو تغییر اقلیم با خروجی های مدل چرخش عمومی جو HadCM3<sup>۱</sup> با استفاده از مدل LARS\_WG<sup>۲</sup> ریز مقیاس شدند. سپس به منظور شبیه سازی رواناب حوضه، داده ها به مدل WetSpa معرفی شدند. نتایج نشان داد، مدل WetSpa با معیار ناش- ساتکلیف ۰/۶۵ و ۰/۶۳ به ترتیب در دوره واسنجی و اعتبارسنجی، به خوبی قادر به شبیه سازی الگوی تغییرات رواناب منطقه مطالعه بوده است.

مشاری و همکاران (۱۳۹۶) قابلیت مدل هیدرولوژیک پیوسته WetSpa در شبیه سازی جریان های بیشینه با گام زمانی کوتاه مدت در حوضه آبریز زشک واقع در مشهد را بررسی کردند. نتایج شبیه سازی تطابق خوبی بین دبی شبیه سازی شده با دبی اندازه گیری شده نشان داد. علاوه بر این نتایج مدل برای جریان های سیلابی مطلوب بوده ولی در شبیه سازی جریان های کمینه نتایج مناسب نبوده است.

فروتن و همکاران (۱۳۹۶) به شبیه سازی اثرات سناریوهای بهینه توسعه مناطق مسکونی بر هیدروگراف جریان و غلظت رسوب در حوضه آبریز زیارت پرداختند. پس از مدل سازی با مدل WetSpa، تناسب زمین برای توسعه مناطق مسکونی با روش TOPSIS<sup>۳</sup> و GIS به منظور بررسی اثرات سناریو بهینه توسعه مناطق مسکونی بر هیدروگراف

<sup>۱</sup> Hadley center Coupled Model version 3

<sup>۲</sup> Long Ashton Research Station Weather Generator

<sup>۳</sup> Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

جریان و غلظت رسوب، مدل با نقشه کاربری سه سناریو اجرا شد. نتایج ارزیابی مدل، صحت شبیه‌سازی دبی جریان و دبی رسوب را براساس معیار ناش- ساتکلیف به ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۶۳ در دوره واسنجی نشان می‌دهد.

پژوهش و همکاران (۱۳۹۷) جریان رواناب و رسوب در حوضه آبریز آج واقع در چهارمحال بختیاری را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی- مکانی WetSpa شبیه‌سازی کردند. در این راستا، از داده‌های روزانه بارش، دما، تبخیر- تعرق و دبی با دوره آماری ۱۳۶۲-۱۳۶۷ استفاده گردید. نتایج مدل براساس معیار ناش- ساتکلیف دقت ۰/۵۷ و ۰/۶۱ در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی در شبیه‌سازی رواناب، کارایی قابل قبول مدل را در این حوضه نشان می‌دهد.

عباس‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) اثر تغییر کاربری زمین را بر شرایط آب‌شناسی حوضه آبریز فیروزکوه با استفاده از مدل توزیعی Wetspa ارزیابی کردند. نقشه‌های کاربری زمین برای سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۹۲ با استفاده از روش ترکیبی و تصاویر ماهواره‌ای لندست تهیه شد. مدل‌سازی رواناب در مقیاس روزانه برای ۸ سال انجام شد. نتایج نشان داد که بر اثر تغییر در کاربری زمین (تبدیل زمین‌های طبیعی به مناطق مسکونی و کشاورزی) رواناب کل و رواناب سطحی افزایش یافته است

جاویدان و همکاران (۱۳۹۷) به ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی تحت سناریوهای جنگل‌زدایی و افزایش مناطق مسکونی و ترکیب این دو سناریو بر روی مؤلفه‌های بیلان آبی حوضه زیارت، با استفاده از مدل WetSpa پرداختند. نتایج نشان داد بین هیدروگراف‌های سیل شبیه‌سازی شده و مشاهداتی انطباق خوبی وجود داشته است. همچنین مقادیر جریان‌های سطحی، زیرسطحی، آب زیرزمینی و رواناب کل در سناریوهای اعمال شده افزایش یافته است. همچنین کاهش زبری سطح زمین و میزان تاج پوشش، منجر به کاهش میزان تبخیر و تلفات برگابی در حوضه مطالعاتی گردیده است.

قلخانی و همکاران (۱۳۹۷) مدل هیدرولوژیکی WetSpa را با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه‌ی NSGA-II و PSO واسنجی کردند. این پژوهش قابلیت الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و جامعه ذرات را در واسنجی مدل WetSpa به‌منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه کارون بزرگ ارائه می‌نماید. نتایج نشان دادند که هر دو الگوریتم NSGA-II و PSO به‌ترتیب با ضریب تبیین ۰/۶۹ و ۰/۷۱ عملکردهای مناسبی را در واسنجی مدل داشته‌اند.

ونگ و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۹۶) برای اولین بار مدل توزیعی WetSpa را برای پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر در حوضه آبریز توسعه دادند. مدل در آبریز ترک‌لپ-مولن‌بیک در بلژیک مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل قابلیت خوبی در پیش‌بینی رواناب دارد و ترکیب مدل‌سازی رواناب سطحی و آب زیرزمینی، شبیه‌سازی واقعی‌تری از آب‌پایه را ارائه می‌دهد.

گبرمسکل و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۲) در مقاله‌ای تحت عنوان برآورد سیلاب با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل WetSpa، جریان رودخانه حوضه آلتزیت واقع در لوکزامبورگ را شبیه‌سازی کردند، پوشش غالب منطقه جنگل با اختصاص ۳۳/۷٪ می‌باشد. با مقایسه دبی ثبت و مشاهده شده برای ۲۰ سیلاب متفاوت مشخص شد که مدل، توانایی شبیه‌سازی جریان رودخانه مخصوصاً جریان بالا را دارد.

لیو و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۴) در حوضه آبریز لوکزامبورگ<sup>۴</sup> از مدل WetSpa به‌منظور پیش‌بینی رواناب در کاربری‌های مختلف استفاده کردند. مدل رواناب مستقیم را با دقت ۰/۸۳ براساس معیار ارزیابی ناش-ساتکلیف برآورد کرد. با در نظر گرفتن سه سناریوی مختلف، گسترش اراضی شهری، جنگل‌زدایی و جنگل‌کاری مشخص شد که گسترش

---

<sup>1</sup> Wang et al.

<sup>2</sup> Gebremeskel et al.

<sup>3</sup> Liu et al.

<sup>4</sup> Luxembourg

اراضی شهری و جنگل‌زدایی اثر زیادی در افزایش دبی اوج، حجم سیلاب و زمان اوج سیلاب دارند. رواناب مستقیم ناشی از رخدادهای سیلابی در نواحی شهری در مقایسه با رواناب کاربری‌های دیگر چشمگیرتر بود.

بهرمند و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از مدل WetSpa اقدام به شبیه‌سازی جریان حوضه هورناد واقع در اسلواکی نمودند. نتایج آماری و مخصوصاً ضریب ناش- ساتکلیف ۷۵-۸۵ درصد نشان داد انطباق خوب بین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در زیرحوضه‌های اصلی و خروجی حوضه وجود دارد.

نورمحمد و همکاران (۲۰۰۶) توانایی مدل WetSpa در شبیه‌سازی حوضه سورینم<sup>۱</sup> را مورد بررسی قرار دادند، نتایج تحقیق آنها نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی بود. همچنین آن‌ها با انجام آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای ورودی به این نکته پی بردند که پارامترهای  $K_i$  فاکتور جریان زیرسطحی،  $K_g$  ضریب افت آب زیرزمینی،  $K_{ss}$  رطوبت اولیه خاک و  $K_{ep}$  ضریب اصلاحی تبخیر و تعرق پتانسیل، بیشترین تاثیر را بر روی نتایج می‌گذارند.

لیو و همکاران (۲۰۰۶) مدل توزیعی WetSpa را در حوضه آبریز مارگسانی اسلواکی برای شبیه‌سازی رواناب و انتقال فسفر توسعه دادند. آن‌ها توسط آمار روزانه سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۰، هیدروگراف سیلاب و تجمع فسفر در خروجی حوضه را محاسبه نمودند و پیشنهاد دادند که تلاش‌های بیشتری باید در زمینه چرخه فسفر و عکس‌العمل بیوشیمیایی آن صورت گیرد.

ریتابولا و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۷) به پیش‌بینی رواناب در رودخانه سیمپو در محدوده دریاچه ویکتوریا تانزانیا با استفاده از مدل هیدرولوژیک WetSpa پرداختند. نتایج حاصل از کاربرد مدل نشان داد که در این حوضه رواناب سطحی و

<sup>۱</sup> suriname

<sup>۲</sup> Rwetabula et al.

زیرسطحی هر یک به ترتیب ۳۸/۶ و ۶۱/۴ درصد از کل رواناب را شامل می‌شوند. در حالی که سهم آب زیرزمینی صفر است، ۹۰ درصد از بارش از طریق تبخیر- تعرق تلف می‌شود و حجم رواناب تولید شده در اراضی کشاورزی، حدود ۹ درصد از کل رواناب را تشکیل می‌دهد.

بهرمند و همکاران (۲۰۰۷) اثر احیای جنگل بر روی سیل رودخانه هورناد<sup>۱</sup> واقع در اسلواکی<sup>۲</sup> با استفاده از مدل WetSpa در گام زمانی روزانه در دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۰۰ ارزیابی کردند، در سناریوی احیای جنگل فرض شده است که جنگل‌ها ۵۰٪ افزایش داده شده‌اند، نتایج نشان داد که دبی اوج حدود ۱۲٪ کاهش می‌یابد و زمان اوج هیدروگراف شبیه‌سازی از سناریوی احیای جنگل ۱۴ ساعت طولانی‌تر از سناریوی کاربری اراضی قبلی می‌باشد و هیدروگراف شبیه‌سازی یک سازش خوب (معیار ناش- ساتکلیف بین ۰/۷۵- ۰/۸) با هیدروگراف اندازه‌گیری شده دارد.

بیات (۲۰۰۹) با استفاده از مدل WetSpa به شبیه‌سازی جریان رودخانه و تحلیل اثرات تغییر کاربری روی آن در مرکز استان کرمانشاه پرداخت. نتایج شبیه‌سازی حاصل از کاربرد مدل در حوضه، براساس ضریب ناش- ساتکلیف دقتی معادل ۰/۷۷ نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که هیدروگراف جریان رودخانه اندکی با تاخیر به اوج خود رسیده است و از سوی دیگر، این مقدار در مقایسه با هیدروگراف کاربری فعلی دیرتر فروکش کرده است. همچنین دبی اوج هیدروگراف نیز بعد از تغییر کاربری، کمتر شده است.

زینی‌وند و دسمت (۲۰۰۹) با توسعه مدل WetSpa، به شبیه‌سازی توزیع مکانی فرسایش و رسوب حوضه هورناد اسلواکی پرداختند. نتایج مقایسه دبی و غلظت رسوب شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در خروجی این

---

<sup>۱</sup> Hornad

<sup>۲</sup> sloakia

حوضه‌ها در دوره‌های آماری مختلف، نشان داد که مدل توانایی شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب را با دقت مناسب دارد.

یعقوبی و همکاران (۲۰۱۰) به شبیه‌سازی جریان رودخانه حوضه آبریز چهل‌چای در استان گلستان با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa و بررسی کارایی مدل جهت پیش‌بینی هیدروگراف جریان پرداختند. نتایج شبیه‌سازی حاکی از قابلیت مدل در پیش‌بینی هیدروگراف‌های روزانه با دقت ۰/۶۸ براساس معیار ناش-ساتکلیف می‌باشد.

بهرمند و همکاران (۲۰۱۰) در حوضه آبریز توریسا در اسلواکی با استفاده از اتو کالیبراسیون، پارامترهای مدل WetSpa را تخمین و سپس آنالیز حساسیت و آنالیز پیش‌بینی انجام دادند. نتایج نشان داد که ضریب اصلاحی تبخیر-تغرق ( $K_{ep}$ ) بیشترین حساسیت را دارد و پارامتر  $K_g$  مربوط به ضریب افت آب زیرزمینی که این ضریب منعکس کننده وضعیت ذخیره زیرحوضه است، کمترین حساسیت نسبی را نشان داد.

پوریتا برنیدیک و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۰) مدل WetSpa را برای سه حوضه شهری لهستان با خصوصیات زمین‌شناسی و فیزیکی مختلف، ارزیابی کردند. نتایج نشان داد با توجه به معیار ناش-ساتکلیف بالای ۰/۶۹ و ۰/۶۶ به‌ترتیب در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی برای هر سه حوضه، عملکرد مدل در پیش‌بینی رواناب خیلی خوب بوده است.

جاروسلاو و بتلان<sup>۲</sup> (۲۰۱۱) جهت بررسی و آنالیز اثرات توپوگرافی، بافت خاک و کاربری اراضی بر خصوصیات رواناب بر بالادست حوضه بایبرزا در جنوب شرق کشور لهستان، از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa استفاده

---

<sup>1</sup> Porretta\_Brandyk et al.

<sup>2</sup> Jaroslaw and Batelaan



کردند. معیار کارایی بایاس و ضریب ناش - ساتکلیف برای دوره مرطوب در مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۷۱ و در دوره خشک ۰/۱۵۳ و ۰/۵۹ به دست آمد که نشان دهنده قابلیت خوب مدل در این حوضه بوده است.

کرمانسکی و بتلان<sup>۱</sup> (۲۰۱۱) مدل WetSpa را برای شبیه سازی جریان رودخانه بیبرزا استفاده کردند، نتایج نشان داد که این مدل در شبیه سازی جریان های سیلابی انطباق خوبی با داده های مشاهداتی دارد ولی برای جریان های کمینه مطابقت خوبی نداشته و در کل معیار ناش - ساتکلیف مدل نشان دهنده شبیه سازی خوب مدل می باشد.

صفری و همکاران (۲۰۱۲) مدل WetSpa را با پروژه ای به نام DMIP2<sup>۲</sup> در کشور آمریکا مورد استفاده قرار دادند و همچنین مدل را برای مواقع سیلابی که پیش بینی جریان های شدید نادیده گرفته می شد بهبود دادند. در این تحقیق اطلاعات هواشناسی ساعتی مورد استفاده قرار گرفت و آشکار شد که برای تمام حوضه ها مدل اصلاح شده نسبت به مدل قبلی نتایج بهتری دارد. بعد از کالیبراسیون در تمام حوضه ها به جز حوضه رودخانه بلو، نتایج مدل در بازه خوب تا عالی متغیر بود و همچنین در دوره اعتبارسنجی به نتایج در محدوده خوب تا خیلی خوب دست یافتند که این مطلب حاکی از توانایی بالای مدل در شبیه سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی است.

مرادی پور و همکاران (۲۰۱۳) به شبیه سازی مؤلفه های بیلان آبی در حوضه آبریز طالقان با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa پرداختند. نتایج نشان داد که با توجه به معیارهای آماری از جمله معیار ناش - ساتکلیف و معیار تجمعی به ترتیب برابر با ۰/۸۳ و ۰/۸۵، مدل قابلیت خیلی خوبی در شبیه سازی رواناب منطقه مورد مطالعه داراست.

---

<sup>1</sup> Chormanski and Batelaan

<sup>2</sup> Distributed Model Intercomparison Project 2

توکلی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa رواناب حوضه رودخانه Fork در ایالات متحده آمریکا را در بازه زمانی ۱۹۹۷-۲۰۰۰ شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که اجرای مدل با معیار کارایی ناش- ساتکلیف برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۷۷ بسیار خوب بوده است.

وربرین و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۳) اثرات شهرنشینی بر رواناب را با استفاده از مدل WetSpa در حوضه آبریز تولکا در ایرلند ارزیابی کردند. با توجه به شبیه‌سازی هیدرولوژیکی آشکار شد که توسعه شهری در این حوضه در سال‌های ۱۹۹۸-۲۰۰۶ تاثیر قابل توجهی در دبی اوج داشته است.

ونستن کیست و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۴) در پژوهشی ساختارهای مدل هیدرولوژیکی و رویکردهای کالیبراسیون در پیش‌بینی اثر سناریو آب و هوا با استفاده از پنج مدل WetSpa، VHM<sup>۳</sup>، PDM<sup>۴</sup>، NAM<sup>۵</sup> و MIKE\_SHE<sup>۶</sup> را در حوضه بلژیک مورد مقایسه قرار دادند. بعد از کالیبراسیون مدل‌ها، براساس نتایج مشخص شد که تمامی مدل‌ها در تخمین رواناب و جریان‌های حداکثر، دارای کارایی قابل قبول می‌باشند.

توکلی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل WetSpa به بررسی تغییرات اقلیم و تاثیر کاربری اراضی (رشد شهری) در بلژیک پرداختند. نتایج نشان‌دهنده این است که اثر این دو عامل، سیلاب در زمستان و جریان‌های حد پایین را در تابستان افزایش می‌دهد.

---

<sup>1</sup> Verbeiren et al.

<sup>2</sup> Vansteenkiste et al.

<sup>3</sup> Veralemeend conceptual Hydrologisch Model

<sup>4</sup> Nedbor Afstromning Model

<sup>5</sup> Nedbor Afstromning Model

<sup>6</sup> The European Hydrological System Model

هارگوین و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۵) تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین و اثرات آن بر پاسخ هیدرولوژیکی را با استفاده از مدل WetSpa برای حوضه گیلگل تگزاس در ارتفاعات شمال اتیوپی، مورد بررسی قرار دادند. تجزیه و تحلیل تصاویر دیجیتال نشان‌دهنده تغییر کاربری اراضی و پوشش زمین از مراتع و بوته‌زار به مناطق شهری و کشت شده می‌باشد که شبیه‌سازی مدل، افزایش ۱۰۱ میلیمتری رواناب سطحی سالانه و کاهش ۳۹ میلیمتری تخلیه آب زیرزمینی را در این دوره نشان داد.

یوان و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۵) اثر تغییر کاربری اراضی بر رواناب سطحی و عملکرد رسوب در حوضه آبریز چونگلینگ در شمال چین را با استفاده از مدل DSESYM<sup>۳</sup> بر پایه مدل WetSpa ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مدل قابلیت استفاده برای پیش‌بینی رواناب سطحی، فرسایش، رسوب و عملکرد رسوب در هر سلول شبکه و کل حوضه آبریز در پاسخ به سناریوهای کاربری اراضی برای وقوع یک بارش را دارد.

زینی‌وند (۲۰۱۵) روش‌های درون‌یابی مکانی بارش را با استفاده از مدل توزیعی مکانی مبتنی بر فیزیک WetSpa در رودخانه کرخه واقع در حوضه قره‌سو مقایسه کردند. آن‌ها با استفاده از این مدل، اقدام به شبیه‌سازی و مقایسه سه روش درون‌یابی چند ضلعی تیسن، جهانی کریجینگ و معکوس نمودند. نتایج نشان داد که کیفیت داده‌های شبیه‌سازی شده با این سه روش بسیار خوب یا عالی بوده است و با کارایی مدل ۰/۸۷ عملکرد چند ضلعی تیسن ارائه دقیق‌تری از پیش‌بینی تخلیه رودخانه نسبت به دو روش دیگر می‌دهد.

محمدی و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی تغییر کاربری اراضی بر تولید رواناب با استفاده از مدل WetSpa در حوضه آبریز باغ‌سالیان در استان گلستان پرداختند. نتایج ارزیابی کارایی مدل با استفاده از معیار ناش-ساتکلیف برای

---

<sup>1</sup> Haregeweyn et al.

<sup>2</sup> Yuan et al.

<sup>3</sup> Distributed Soil Erosion and Sediment Yield Model

دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۶۱ و ۰/۵۶ به دست آمد. در نتیجه تغییرات کاربری اراضی، رواناب کل و دبی اوج افزایش یافته است.

کریمی و همکاران (۲۰۱۶) مقایسه کارایی مدل‌های WetSpa و SRM<sup>۱</sup> برای شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف را در حوضه دهنو هرود واقع در استان لرستان مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی معیار ناش-ساتکلیف برای مدل SRM در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۵۳ و برای مدل WetSpa به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۸ نشان داد که عملکرد مدل WetSpa نسبت به مدل SRM بهتر بوده است.

ایمانی و همکاران (۲۰۱۶) دبی روزانه حوضه بالخوچای در استان اردبیل را با استفاده از مدل WetSpa شبیه‌سازی کردند. نتایج دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی جریان روزانه و دقت بالای مدل در شبیه‌سازی جریان‌های سیلابی نسبت به جریان‌های پایه را نشان داد.

ینهان و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۷) تغییرات مکانی و زمانی تخلیه آب زیرزمینی حوضه گبا<sup>۳</sup> در شمال اتیوپی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق برای شبیه‌سازی از مدل هیدرولوژیکی WetSpa استفاده شد. نتایج بیانگر توافق خوب بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده هیدروگراف جریان با ضریب ناش-ساتکلیف ۰/۷ و ۰/۸۵ به ترتیب برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی می‌باشد.

کرامیچ و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۷) پاسخ بارش رواناب به کاربری اراضی و تغییر پوشش زمین در حوضه آبریز رواندا را با استفاده از مدل WetSpa شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان‌دهنده تبدیل قابل توجهی از جنگل‌های طبیعی و مرتع

---

<sup>۱</sup> Snowmelt-Runoff Model

<sup>۲</sup> Yenehun et al.

<sup>۳</sup> Geba

<sup>۴</sup> Karamage et al.

به زمین‌های زراعی و مناطق مسکونی بوده است که اثر تغییر کاربری اراضی منجر به افزایش میانگین عمق رواناب در سال شد.

عزیزی و همکاران (۲۰۱۸) جریان رودخانه حوضه زیارت در استان گلستان با مساحت ۹۵/۱۵ کیلومتر مربع را با استفاده از مدل WetSpa شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد با توجه به معیار ناش- ساتکلیف بین ۰/۶۲ تا ۰/۷۴، مدل قادر به شبیه‌سازی خوب هیدروگراف ساعتی منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

تام و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۸) تاثیر توسعه شهرنشینی بر منابع آب زیرزمینی را از نظر تغییر کاربری اراضی و افزایش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به دلیل رشد جمعیت شهری در حوضه هانوی واقع در ویتنام ارزیابی کردند. در این تحقیق از مدل‌های بارش-رواناب هیدرولوژیکی و رواناب جریان آب‌های زیرزمینی WetSpa و Modflow<sup>۲</sup> استفاده شد. نتایج نشان داد که تغییر کاربری اراضی باعث کاهش جزئی آب‌های زیرزمینی می‌شود در حالی که بهره‌برداری گسترده از آب‌های زیرزمینی به دلیل رشد سریع جمعیت شهری، علت اصلی کاهش سطح آب زیرزمینی در کشور می‌باشد.

گبرمسکل و کبده<sup>۳</sup> (۲۰۱۸) تاثیر تغییرات اقلیم در منابع آب در شمال اتیوپی در حوضه رودخانه تگزاس (مساحت ۱۷۹۷ کیلومتر مربع) را با استفاده از مدل‌های اقلیمی SDSM<sup>۴</sup> و هیدرولوژیکی WetSpa مورد بررسی قرار دادند. ضریب ناش- ساتکلیف به ترتیب برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی برابر با ۰/۷۷ و ۰/۷۹ می‌باشد که نشان‌دهنده کارایی خوب مدل بوده است.

---

<sup>1</sup> Tam et al.

<sup>2</sup> Ground water flow modeling

<sup>3</sup> Gebremeskel and Kebede

<sup>4</sup> Statistical Down Scaling Model

-دهمرده (۲۰۱۸) با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa رواناب حوضه آبریز زیارت واقع در استان گلستان را شبیه‌سازی کرد. نتایج سازگاری خوبی بین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و محاسباتی در خروجی حوضه را نشان داد. معیار ناش- ساتکلیف برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب برابر با ۰/۵۷ و ۰/۸۴ نشان‌دهنده کارایی خوب و خیلی خوب مدل در منطقه مطالعاتی بوده است.

دستا و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۹) پاسخ رواناب به تغییر کاربری اراضی و تغییر پوشش زمین را با استفاده از مدل WetSpa در حوضه آینالم شمال اسویا آنالیز کردند. نتایج نشان داد که اجرای مدل WetSpa با ضریب همبستگی و ناش- ساتکلیف برای مرحله واسنجی به‌ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۹ و برای مرحله اعتبارسنجی ۰/۷۸ و ۰/۸۸ بسیار خوب بوده است

## ۲-۳- پیشینه مطالعات مدل HEC-HMS

امیراحمدی و شیران (۱۳۸۸) برای بازسازی مدل حوضه در سیلاب دشت کرون و بررسی ردیابی هیدروگراف سیل در آن و نیز برای تحلیل حساسیت دبی سیلابی حوضه نسبت به تغییر پارامترهای شیب، شماره‌منحنی و مساحت در هر یک از زیر حوضه‌ها از مدل HEC-HMS استفاده کردند. نتایج نشان داد در آنالیز حساسیت شیب و شماره-منحنی، با تغییر این پارامترها زیرحوضه‌ها به شکل یکسان در هیدروگراف خروجی مشارکت نداشته‌اند و تغییر مساحت در زیرحوضه‌ها به‌شکل مستقیم در سیلاب حوضه تأثیرگذار بوده ولی میزان حساسیت زیرحوضه‌ها یکسان نبوده است.

---

<sup>۱</sup> Desta et al.

دستورانی و همکاران (۱۳۸۹) پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه سد طرق واقع در استان خراسان رضوی را با استفاده از مدل HEC-HMS ارزیابی و واسنجی کردند. در این تحقیق زمان تأخیر با روش‌های SCS و اشنایدر برای اجرای مدل مورد استفاده قرار گرفت که در نهایت روش SCS با کمترین میزان خطا (۰/۹ درصد) نسبت به روش اشنایدر (خطا ۱/۰۱ درصد) به‌عنوان روش برتر انتخاب شد و همچنین نتایج نشان داد، این مدل قابلیت بالایی در برآورد سیلاب با ضریب تبیین ۰/۹۸۵ دارد.

کریمی و همکاران (۱۳۹۰) توانایی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در حوضه آبریز لیقوان ارزیابی کردند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی هیدروگراف سیل نشان داده است که اختلاف پیش‌بینی زمان وقوع و اندازه حداکثر سیلاب مشاهده شده و محاسبه شده توسط مدل HEC-HMS کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد، لذا می‌توان به نتایج به‌دست آمده اطمینان حاصل کرد و از آن‌ها برای پیش‌بینی سیلاب احتمالی استفاده نمود.

نصری و سلیمانی (۱۳۹۰) از مدل هیدرولوژیک HEC-HMS، به‌منظور اولویت بندی مناطق مؤثر بر دبی اوج سیلاب حوضه سد شیخ بهایی استفاده کردند و نتایج نشان دادند، مناطقی که در نزدیکی نقطه خروجی حوضه قرار داشتند بیشترین نقش را در تولید سیل داشته است.

شکری کوچک و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیقی به‌منظور تخمین سیلاب حوضه آبریز ایدنک واقع در استان کهگیلویه و بویراحمد، مدل هیدرولوژیکی بارش-رواناب HEC-HMS را مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد در مرحله واسنجی مدل، اختلاف دبی اوج هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی همواره کمتر از ۱۰ درصد و ضریب تبیین آن ۰/۸۲ می‌باشد، که دلالت بر کارایی مدل در مرحله واسنجی می‌باشد و نتایج اعتبارسنجی در ارتباط با

حجم رواناب مورد پذیرش نمی‌باشد. زیرا اختلاف بین حجم رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی بیشتر از ۳۱ درصد می‌باشد.

امیدوار و اژدرپور (۱۳۹۱) به مقایسه شبکه عصبی مصنوعی و مدل HEC-HMS در برآورد بارش-رواناب حوضه آبریز رودخانه اعظم هرات واقع در استان یزد پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که ضرایب همبستگی کل دبی‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده شبکه عصبی مصنوعی و مدل HEC-HMS به ترتیب ۰/۹۷۸ و ۰/۸۲۳ می‌باشد و خروجی شبکه عصبی مصنوعی از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد.

نوری و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقی برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل حوضه آبریز قروه واقع در استان کردستان با استفاده از مدل HEC-HMS از روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) و اشنایدر استفاده کردند. نتایج با توجه به اختلاف دبی اوج هیدروگراف سیل محاسبه شده نسبت به مشاهده شده در مرحله اعتبارسنجی ۵/۹ درصد و ۱۵/۵۳ درصد به ترتیب برای روش‌های SCS و اشنایدر نشان می‌دهد که روش SCS در شبیه‌سازی دبی اوج هیدروگراف با داده‌های مشاهداتی تطابق بهتری دارد.

جعفرنیا و همکاران (۱۳۹۲) از مدل HEC-HMS برای برآورد سیلاب واقع در بالادست ایستگاه هیدرومتریک ولیکبن (زیرحوضه کسلیان) واقع در استان مازندران استفاده کردند. برای کالیبره کردن مدل از داده‌های سیلاب اندازه‌گیری شده و هایتوگراف بارش منطقه استفاده شد. نتایج نشان داد که پیش‌بینی دبی اوج سیلاب در وقایع مختلف به روش SCS خطای اندکی داشته است و مدل توانایی بسیار خوبی در پیش‌بینی دبی اوج سیلاب منطقه داشته است.

ابراهیمیان و قادری (۱۳۹۳) فرآیند بارش-رواناب حوضه آبریز سد مهاباد را با استفاده از مدل HEC-HMS مدل-سازی کردند. در فرآیند شبیه‌سازی از روش‌های شماره‌منحنی SCS، مقدار اولیه و نرخ ثابت تلفات برای محاسبه



میزان تلفات مورد استفاده قرار دادند و از روش‌های هیدروگراف واحد کلارک و هیدروگراف واحد اشنایدر جهت برآورد میزان رواناب استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی حاکی از انطباق بهتر روش شماره‌منحنی SCS نسبت به روش نرخ ثابت و مقدار اولیه برای محاسبه میزان تلفات بوده است.

حسین‌زاده و ایمنی (۱۳۹۴) به‌منظور برآورد ارتفاع رواناب و مطالعه وضعیت سیل‌خیزی و هیدرولوژیکی حوضه آبریز قوچک-رودک از مدل HEC-HMS استفاده کردند. نتایج مدل در ارتباط با کارایی مدل مذکور در برآورد رواناب و دبی اوج سیلاب مورد پذیرش نمی‌باشد. زیرا اختلاف بین دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی بیش از ۲۰ درصد می‌باشد.

مرادی و همکاران (۱۳۹۷) عملکرد مدل HEC-HMS با استفاده از سه روش مختلف تخمین نفوذ شامل شماره-منحنی (CN)، گرین-آمپت و اولیه-ثابت در پیش‌بینی حجم رواناب، جریان اوج و زمان رسیدن به اوج سیلاب را در حوضه قره‌سو واقع در استان کرمانشاه ارزیابی کردند. نتایج نشان داد روش اولیه-ثابت نسبت به روش‌های دیگر، میزان دبی اوج را با دقت زیادی ( $R^2 = 0.96$  و  $CRM = 0.01$ ) برآورد کرد.

اولیب‌لو و لی<sup>۱</sup> (۲۰۱۰) برای پیش‌بینی سیلاب در حوضه‌های میسای و وان در چین از مدل HEC-HMS استفاده کردند. در این تحقیق از معیار ناش-ساتکیف برای ارزیابی کارایی مدل استفاده کردند. نتایج نشان داد با توجه به معیار ناش-ساتکیف به‌ترتیب برای حوضه میسای بالای ۰/۹ و حوضه وان بالای ۰/۷۴ این مدل توانایی خوبی در برآورد سیلاب داشته است.

---

<sup>1</sup> Oleyiblo and Li

داریان و همکاران (۲۰۱۶) براساس الگوریتم ژنتیک (GA)<sup>۱</sup> واسنجی خودکار و با استفاده از مدل HEC-HMS بارش-رواناب را در حوضه آبی‌چای تبریز شبیه‌سازی نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها بیان‌کننده دقت خوب مدل هیبرید HEC-HMS و GA در مقایسه با سایر روش‌های موجود می‌باشد.

گامیندوگا و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۶) از روش هیدروگراف واحد اشنایدر و مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی رواناب حوضه ماریمبا (در کشور زیمبابوه) استفاده کردند. نتایج نشان داد مدل به‌طور موفقیت‌آمیزی حجم رواناب و دبی اوج را با معیار ناش-ساتکلیف ۰/۶۸ و ۰/۶۱ به‌ترتیب در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی پیش‌بینی می‌کند.

رحمان و همکاران (۲۰۱۷) از مدل HEC-HMS، به‌منظور شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در غرب عربستان، استفاده کردند. نتایج پژوهش حاکی از آن بود که هر دو هیدروگراف شبیه‌سازی در دوره واسنجی و اعتبارسنجی سازگاری بسیار مناسبی (خطای نسبی ۲/۱ درصد) با هیدروگراف‌های مشاهداتی دارند.

## ۲-۴- پیشینه مطالعات برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

زمانی و همکاران (۱۳۹۳) به مقایسه روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن، سری زمانی غیرخطی، خطی و شبکه عصبی مصنوعی در تخمین دبی روزانه رودخانه کارون پرداختند. نتایج نشان داد که روش برنامه‌ریزی بیان ژن با ضریب همبستگی ۰/۹۳۱ و ریشه میانگین مربعات خطا ۳۶/۵۹ مترمکعب بر ثانیه، دارای معیارهای ارزیابی مناسب‌تری نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد.

دهقانی و همکاران (۱۳۹۴) قابلیت کاربرد شبکه عصبی بیزین، برنامه‌ریزی بیان ژن، ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون خطی چند متغیره برای پیش‌بینی سری زمانی جریان رودخانه صوفی چای را مورد بررسی قرار دادند.

---

<sup>۱</sup> Genetic Algorithm

<sup>۲</sup> Gumindoga et al.

مقایسه مدل‌ها نشان داد که شبکه عصبی بیزین با ضریب همبستگی  $0/991$  و ریشه میانگین مربعات خطا  $0/31$  مترمکعب بر ثانیه، بهترین تخمین را از داده‌های روزانه جریان رودخانه نسبت به مدل‌های دیگر داشته است.

قربانی و دهقانی (۱۳۹۴) فرآیند بارش-رواناب رودخانه کاکارضا واقع در استان لرستان را با استفاده از روش‌های شبکه عصبی بیزین، برنامه‌ریزی بیان ژن و ماشین بردار پشتیبان مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده عملکرد خوب هر سه مدل با ضریب همبستگی به ترتیب ( $0/99$ ،  $0/802$  و  $0/89$ ) بوده است و مقایسه مدل‌ها نشان داد، شبکه عصبی بیزین عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب دارد.

امامقلی‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن، جهت برآورد بارش-رواناب حوضه آبریز کسلیان مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق مدل برنامه‌ریزی بیان ژن، با ۳ ژن و ۳۰ کروموزوم اجرا شد. نتایج نشان داد مدل مذکور با ضریب همبستگی  $0/635$  و ریشه میانگین مربعات خطا  $0/234$  متر مکعب بر ثانیه در مرحله آزمون، از توانایی قابل قبولی در برآورد بارش-رواناب برخوردار می‌باشد.

سالاری جزی و همکاران (۱۳۹۵) دبی جریان روزانه حوضه آبریز گالیکش در استان گلستان را با استفاده از مدل درختی M5، برنامه‌ریزی بیان ژن و مدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد هر سه مدل دارای کارایی مناسب می‌باشند، مقایسه نتایج نشان‌دهنده برتری نسبی مدل درختی M5 با ضریب همبستگی  $0/865$  و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا  $0/059$  ۱ متر مکعب بر ثانیه، نسبت به مدل‌های دیگر می‌باشد.

قربانی و همکاران (۱۳۹۵) فرآیند بارش-رواناب ماهانه سیمینه رود را با استفاده از مدل‌های ماشین بردار پشتیبان با توابع کرنل پایه شعاعی، چند جمله‌ای و خطی، مدل شبکه بیزین با الگوریتم یادگیری PC، مدل متداول شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌ریزی بیان ژن شبیه‌سازی کردند. نتایج گویای عملکرد قابل قبول هر چهار مدل و برتری

مدل برنامه‌ریزی بیان ژن با بیشترین ضریب همبستگی ۰/۹۱، کمترین ریشه میانگین مربعات خطا ۳/۱ متر مکعب بر ثانیه و مقدار ضریب ناش- ساتکلیف ۰/۸۲ در مرحله آزمون است.

دهقانی و همکاران (۱۳۹۶) جهت مدل‌سازی جریان روزانه رودخانه کشکان از مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه بیزین استفاده کردند و برای بررسی صحت مدل‌های مورد مطالعه، آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج نشان‌دهنده کارایی هر سه مدل در منطقه مطالعاتی می‌باشد. همچنین با توجه به معیارهای ارزیابی، مدل ماشین‌بردار پشتیبان بیشترین ضریب همبستگی ۰/۹۱ و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۰۰۲ متر مکعب بر ثانیه، در مرحله اعتبارسنجی را داراست.

سلگی و همکاران (۱۳۹۶) از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن برای مدل‌سازی جریان رودخانه گاماسیاب استفاده کردند. برای افزایش عملکرد مدل از دو روش پیش‌پردازش داده‌ها یعنی تبدیل موجک و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. مقایسه مدل ترکیبی برنامه‌ریزی بیان ژن- موجک (ضریب تبیین در مرحله آموزش و آزمون به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۶) با مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (ضریب تبیین آموزش و آزمون ۰/۹۵ و ۰/۹۲) نشان داد که عملکرد مدل ترکیبی از مدل ساده بهتر بوده است.

فرناندو و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۱) از مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و یک مدل ترکیبی از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک (ANN-GA) برای شبیه‌سازی رواناب حوضه آبریز نیل<sup>۲</sup> استفاده کردند. نتایج نشان داد برنامه‌ریزی بیان ژن (ضریب تبیین در مرحله آموزش و آزمون به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۷)، عملکرد بهتری نسبت به مدل دیگر در شبیه‌سازی رواناب حوضه مورد نظر داشته است.

---

<sup>۱</sup> Fernando et al.

<sup>۲</sup> Blue Nile

فرناندو و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن، جریان رودخانه چهار حوضه را پیش‌بینی کردند. در این تحقیق نتایج نشان داد مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی جریان رودخانه در هر چهار حوضه (Baihe, Yanbian و Han, Brosna به‌ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۵، ۰/۹۷، ۰/۹۶ و ۰/۹۷ در مرحله آموزش) از کارایی مناسبی برخوردار است.

کیسی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۳) فرآیند بارش-رواناب یک حوضه کوچک در ترکیه را با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)، سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS)<sup>۲</sup> و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) شبیه‌سازی نمودند. مقایسه نتایج مدل‌ها نشان داد که برنامه‌ریزی بیان ژن با ریشه میانگین مربعات خطای ۱۷/۸۲ لیتر بر ثانیه و ضریب تبیین ۰/۹۷۸ برای دوره آزمون نسبت به سایر مدل‌های هوشمند برتری نسبی دارد.

روشنگر و همکاران (۲۰۱۳) برای پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه ونیار، واقع در استان آذربایجان شرقی از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند. نتایج نشان داد مدل برنامه‌ریزی بیان ژن با ضریب تبیین ۰/۹۴ و ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۰۷۲ در مرحله آزمون، توانایی بالایی در تخمین جریان رودخانه از خود نشان داده است.

سلگی و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۷) دو مدل هوشمند به نام‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و ماشین‌بردار پشتیبان را برای پیش‌بینی بارش ماهانه ایستگاه وراینه واقع در شهرستان نهاوند به‌کار گرفتند. نتایج نشان داد که عملکرد هر دو مدل خوب و مشابه بوده است (ضریب همبستگی حدود ۰/۹۲) ولی با توجه به بررسی معیارهای ارزیابی مختلف، مدل برنامه‌ریزی بیان ژن عملکرد کمی بهتری داشته است (ریشه میانگین مربعات خطا در مرحله آموزش و آزمون

---

<sup>1</sup> Kisi et al.

<sup>2</sup> Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System

<sup>3</sup> Solgi et al.

به ترتیب ۰/۰۴۷۸ و ۰/۰۴۸۶). این در حالی است که مدل ماشین بردار پشتیبان دارای مزیت سهولت در اجرای مدل می باشد.

نیکپور و همکاران (۲۰۱۷) برای تخمین بارش-رواناب رودخانه خیاوچای از مدل های LS-SVM<sup>۱</sup> ، ANN، WANN و GEP استفاده کردند. نتایج نشان دهنده برتری مدل هیبرید موجک-عصبی (WANN)<sup>۲</sup> با بیشترین ضریب همبستگی ۰/۸۷۷، کمترین ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۶۹۶ متر مکعب بر ثانیه در دوره اعتبارسنجی نسبت به مدل های دیگر بوده است.

ادیب و همکاران (۲۰۱۷) برای پیش بینی دبی جریان روزانه حوضه کلسیان واقع در استان مازندران از مدل برنامه ریزی بیان ژن در طی دوره آماری ۲۰۰۹-۱۹۷۰ استفاده نمودند. نتایج نشان داد مدل برنامه ریزی بیان ژن با توجه به معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین قدرمطلق خطا به ترتیب ۰/۹، ۰/۴۹۵، ۰/۲۸۸ لیتر بر ثانیه و ۰/۲۸۸ لیتر بر ثانیه در دوره آزمون، عملکرد بالایی جهت پیش بینی دبی جریان در مقیاس زمانی روزانه برخوردار است.

سینق و آجمریا<sup>۳</sup> (۲۰۲۰) فرآیند بارش-رواناب حوضه آبریز دیندوری واقع در کشور هند را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و روش برنامه ریزی بیان ژن شبیه سازی کردند. نتایج نشان داد روش برنامه ریزی بیان ژن عملکرد بهتری (ضریب تبیین ۰/۹۲) نسبت به شبکه عصبی مصنوعی (ضریب تبیین ۰/۹۰) در دوره آزمون دارد.

---

<sup>۱</sup> Support Vector Machine

<sup>۲</sup> ANN-Wavelet Hybrid

<sup>۳</sup> Singh and Ajmera

فصل سوم

مواد و روش ها

### ۳-۱ مقدمه

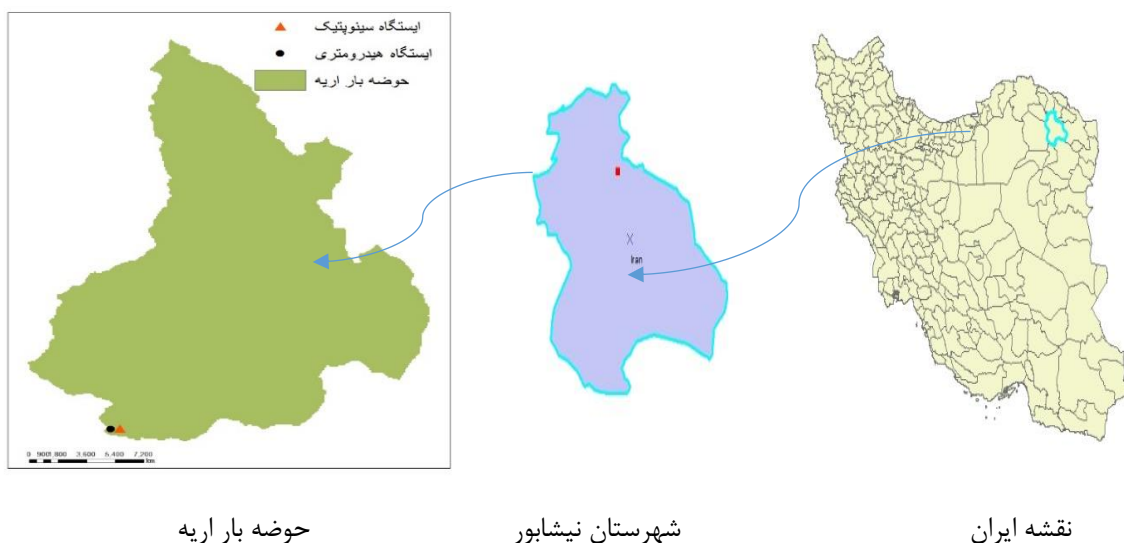
در این فصل ابتدا شرح مختصری از منطقه مورد مطالعاتی ارائه می‌گردد، سپس مدل WetSpa، HEC-HMS و روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و پارامترهای مورد استفاده در این مدل‌ها ارائه می‌گردد.

### ۳-۲ معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه بار اریه یکی از زیرحوضه‌های حوضه نیشابور واقع در خراسان رضوی می‌باشد.

### ۳-۲-۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی

با توجه به شکل ۳-۱ حوضه بار اریه در شمال شرق شهرستان نیشابور واقع شده است. رودخانه اصلی این حوضه از دامنه جنوب غربی کوه‌های بینالود سرچشمه گرفته و در نهایت با عبور از نیشابور به رودخانه کال سبزوار می‌پیوندد. این حوضه از نظر موقعیت جغرافیایی در محدوده‌ای بین طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۲۱ دقیقه و ۵ ثانیه تا ۵۸ درجه و ۲۱ دقیقه و ۶ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه و ۱۸ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۲۹ دقیقه و ۱۸ ثانیه شمالی قرار دارد.

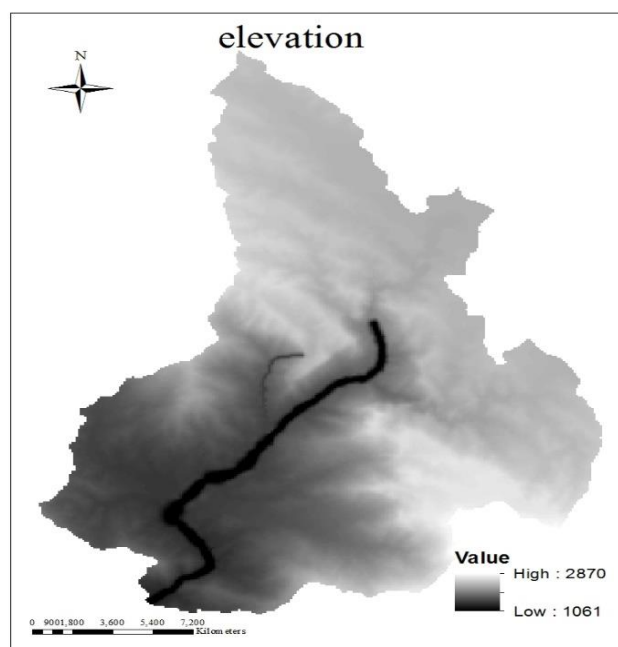


شکل ۳-۱ موقعیت مکانی حوضه‌ی آبریز بار اریه در نیشابور و ایران



### ۳-۲-۲-۲- مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز بار اریه

حوضه بار اریه دارای مساحت ۱۱۲ کیلومتر مربع می باشد. براساس نقشه رقومی ارتفاعی (شکل ۳-۲)، ارتفاع حوضه بین ۱۰۶۰/۳۰ متر تا ۲۸۷۰/۷۵ متر قرار دارد. همچنین حوضه آبریز بار اریه به طور متوسط دارای شیب ۱۹ درصد می باشد (نقشه توپوگرافی تهیه شده از سازمان نقشه برداری کشور).

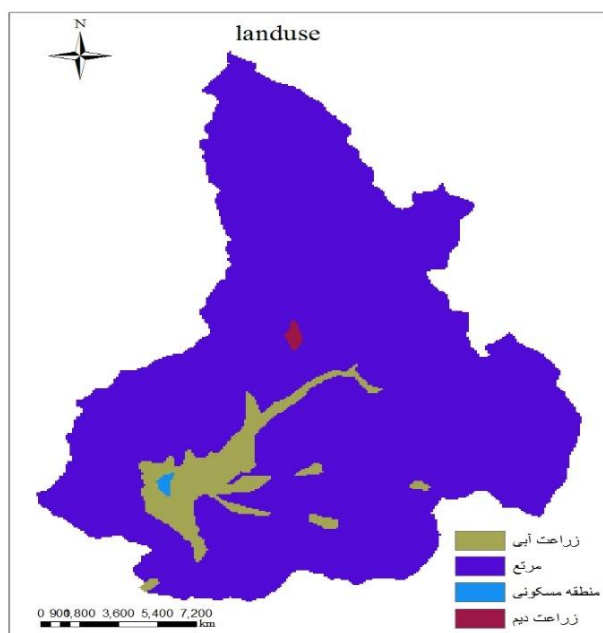


شکل ۳-۲ نقشه مدل رقومی ارتفاعی (DEM)

### ۳-۲-۳- پوشش گیاهی منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه از چهار نوع پوشش مرتع، زراعت آبی، اراضی دیم و منطقه مسکونی و شهری تشکیل شده است، که پوشش مرتع ۹۳/۵۷ درصد از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده و سهم هر یک پوشش های زراعت آبی، اراضی دیم و منطقه مسکونی و شهری به ترتیب برابر با ۶/۰۶ درصد، ۰/۲۲ درصد و ۰/۱۵ درصد می باشد.

نقشه پوشش گیاهی منطقه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ در شکل ۳-۳ نمایش داده شده است (نقشه کاربری اراضی تهیه شده از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور).

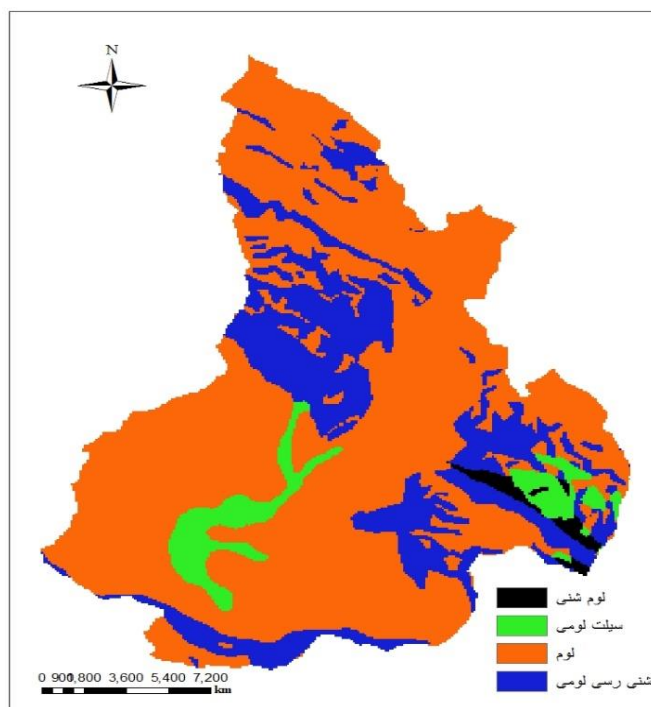


شکل ۳-۳ نقشه کاربری اراضی حوضه بار اریه

### ۳-۲-۴- مشخصات خاک‌شناسی منطقه مطالعاتی

مدل به منظور طبقه‌بندی بافت خاک سطحی از مثلث بافت خاک آمریکا استفاده می‌نماید. این مثلث بر مبنای تغییرات درصد رس، سیلت و ماسه به ۱۲ طبقه تقسیم می‌گردد. بافت خاک لوم با اختصاص ۷۰/۶۹ درصد از مساحت حوضه عمده‌ترین بافت موجود در حوضه است. بافت‌های شنی رسی لوم، سیلت لوم و لوم‌شنی به ترتیب ۲۲/۷۱ درصد، ۵/۴۶ و ۱/۱۴ درصد از سطح حوضه را در بر می‌گیرند. در شکل ۳-۴ نقشه‌ی بافت خاک حوضه

آبریز بار اریه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ نمایش داده شده است (نقشه بافت خاک تهیه شده از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی).



شکل ۳-۴ نقشه بافت خاک حوزه بار اریه

### ۳-۲-۵- مشخصات ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی

در این مطالعه از ایستگاه هیدرومتری بار و ایستگاه سینوپتیک واقع در خروجی حوزه استفاده شده است. به منظور بررسی وضعیت بارندگی در حوزه بار اریه از یک دوره آماری ۱۰ ساله (۱۳۸۷-۱۳۹۷) استفاده شده است. متوسط سالانه بارندگی ۲۸۳/۳۴ میلیمتر در سال می‌باشد که بیشترین میزان بارندگی در فصل‌های زمستان و بهار (بهمن - فروردین) ثبت شده است. بیشترین بارش در مرتبه اول مربوط به فصل زمستان و در مرتبه دوم مربوط به فصل بهار می‌باشد و در فصل تابستان در بیشتر سال‌ها بارندگی صورت نگرفته است.

### ۳-۲-۶- وضعیت هواشناسی حوضه بار اریه

در منطقه مورد مطالعه عواملی چون مرتفع بودن حوضه، عرض جغرافیایی زیاد، دوری از منابع آب موجب می‌شود تا منطقه اقلیمی نیمه سرد داشته باشد. در این رژیم گرمایی گرم‌ترین و سردترین ماه‌های سال به ترتیب مربوط به ماه‌های دی و تیر می‌باشد.

### ۳-۳- روش تحقیق

در این تحقیق از سه مدل HEC-HMS، WetSpa و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) برای برآورد بارش-رواناب و برای برآورد رسوب از برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده گردیده است.

### ۳-۴- داده‌های مورد نیاز

در این تحقیق از داده‌های روزانه ایستگاه‌های هیدرومتری و سینوپتیک مربوط به دوره آماری ۱۳۹۷-۱۳۹۰ حوضه بار اریه برای شبیه‌سازی بارش-رواناب استفاده گردید.

### ۳-۵- تشریح مدل WetSpa

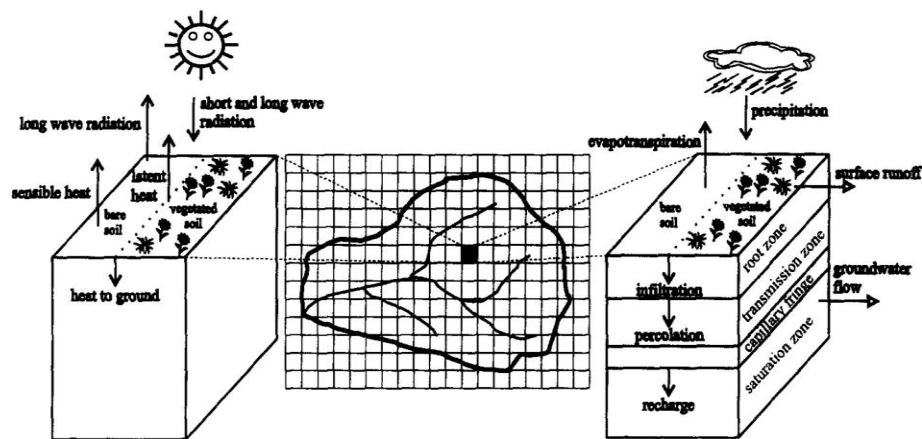
مدل هیدرولوژیکی توزیعی- مکانی WetSpa در سازمان مهندسی هیدرولوژیکی و هیدرولیک دانشگاه بروکسل به جهت پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاه و اتمسفر توسط ونگ و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۶ در گام زمانی روزانه توسعه یافت و سپس در سال ۲۰۰۴ توسط لیو و دی‌اسمدت<sup>۲</sup> به جهت پیش‌بینی سیلاب انطباق داده شد (صفری، ۲۰۰۹). مدل توانایی پیش‌بینی سیلاب، شبیه‌سازی تعادل آب در مقیاس حوضه، فرسایش، انتقال رسوب، بررسی تاثیر تغییر اقلیم و کاربری اراضی در فرآیندهای هیدرولوژیک، کیفیت آب و مدیریت حوضه آبریز به‌صورت

---

<sup>1</sup> Wang et al.

<sup>2</sup> Liu and De Smedt

توزیعی- مکانی و با گام‌های زمانی مختلف را داراست (صفری، ۲۰۱۴). در این مدل، سیستم هیدرولوژیک حوضه برای هر شبکه سلولی، از ۴ لایه در جهت عمودی تشکیل شده است، که عبارت‌از: لایه تاج پوشش، لایه سطح خاک، ناحیه ریشه و ناحیه اشباع (بهرمند، ۲۰۰۷). مدل در هر شبکه سلولی، فرآیندهای هیدرولوژیکی ذوب برف، ذخیره برگابی، ذخیره چالابی، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر- تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیرسطحی، جریان آب زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌نماید (برندیک، ۲۰۱۰). ساختار کلی مدل WetSpa در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵ ساختار کلی مدل WetSpa (لیو و همکاران، ۲۰۰۴)

### ۳-۵-۱- ورودی مدل WetSpa

ورودی‌های مدل شامل دو نوع از داده‌ها، نقشه‌های پایه شامل مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، کاربری اراضی و بافت خاک به‌عنوان فایل‌های شطرنجی در فرمت ASCII و همچنین داده‌های هواشناسی از جمله بارش، دما، تبخیر- تعرق پتانسیل می‌باشد. برای ارزیابی و واسنجی مدل، داده‌های دبی مورد نیاز می‌باشد (کریمی، ۲۰۱۶). در میان داده‌های هواشناسی میزان بارندگی از اهمیت بیشتری برخوردار می‌گردد. داده‌های بارندگی از ایستگاه آب‌سنجی بار اریه (شرکت منابع آب ایران) و دما از ایستگاه سینوپتیک نیشابور (اداره هواشناسی) تهیه شده‌اند.

### ۳-۵-۲- معادلات مدل WetSpa

مدل مذکور ابتدا تعادل آب در ناحیه ریشه را محاسبه می‌کند، چراکه مهم‌ترین بخش در نگهداشت آب به‌شمار می‌آید و همچنین کنترل‌کننده حجم رواناب سطحی و زیرسطحی، تبخیر-تعرق و دبی آب زیرزمینی است. در توصیف فرآیندهای هیدرولوژیکی مدل از ترکیب روابط فیزیکی و تجربی استفاده شده است.

### ۳-۵-۲-۱- بیلان آب در ناحیه ریشه

مقدار رطوبت خاک در منطقه ریشه مهم‌ترین بخش کنترل‌کننده حجم رواناب سطحی، رواناب زیرسطحی، تبخیر-تعرق و دبی آب زیرزمینی می‌باشد. تعادل آب در منطقه ریشه با معادل قرار دادن ورودی‌ها و خروجی‌ها برای هر شبکه سلولی با استفاده از رابطه ۳-۱ محاسبه می‌شود.

$$D \frac{d\theta}{dt} = P - I - S - E - R - F \quad ۳-۱$$

D عمق ریشه [L]،  $\theta$  رطوبت خاک در منطقه ریشه [ $L^3 L^{-3}$ ]، dt گام زمانی [T]، P بارش [ $LT^{-1}$ ]، I تلفات اولیه شامل ذخیره برگابی و ذخیره چالابی [ $LT^{-1}$ ]، S رواناب سطحی [ $LT^{-1}$ ]، E تبخیر از سطح خاک [ $LT^{-1}$ ]، R نفوذ عمقی از منطقه ریشه [ $LT^{-1}$ ] و F جریان زیرسطحی [ $LT^{-1}$ ] (زینی‌وند، ۲۰۱۵).

### ۳-۵-۲-۲- رواناب سطحی

میزان رواناب سطحی با توجه به میزان رواناب در هر سلول محاسبه می‌گردد. از ضریب رواناب به‌عنوان پارامتری برای نشان دادن میزان رواناب تولیدی در حوضه‌های آبریز استفاده می‌شود. مدل WetSpa از روش ضریب رواناب اصلاح شده که به نوع پوشش گیاهی، نوع خاک و شیب زمین بستگی دارد به‌صورت زیر جهت محاسبه رواناب در هر شبکه سلول استفاده می‌کند.

$$S = C(P - I) \left[ \frac{\theta}{n} \right]^\alpha \quad ۲-۳$$

در رابطه ۲-۳، S رواناب، n تخلخل خاک  $[L^3 L^{-3}]$ ، C ضریب رواناب و براساس نوع کاربری اراضی، بافت خاک و شیب زمین تعیین می‌شود و به‌عنوان ضریب پتانسیل رواناب معرفی شده است (-).  $\alpha$  ضریبی است که نماینده تأثیر شدت بارندگی بر میزان بارش مازاد می‌باشد، P بارش، I جذب اولیه شامل برگاب و ذخیره چالابی و  $\theta$  رطوبت خاک در حالت اشباع  $[L^3 L^{-3}]$  می‌باشد (لیو، ۲۰۰۵).

### ۳-۲-۵-۳- جریان زیرسطحی

جریان زیرسطحی از اجزای مهم تعادل آب در ناحیه ریشه محسوب می‌شود. در مدل، فرض بر این است که این فرآیند زمانی رخ می‌دهد که رطوبت موجود در خاک بیش از ظرفیت زراعی آن باشد. هدایت هیدرولیکی، عمق ریشه و رطوبت خاک سه پارامتر موثر بر نفوذ هستند. جریان زیرسطحی براساس قانون دارسی و معادلات موج سینماتیکی به صورت معادله ۳-۳ محاسبه می‌گردد.

$$F = \frac{C_f D S_0 K(\theta)}{W} \quad ۳-۳$$

در این رابطه F جریان زیرسطحی، D عمق ریشه  $[L]$ ،  $S_0$  شیب سطح  $[L L^{-1}]$ ،  $K(\theta)$  هدایت هیدرولیکی در حالت غیر اشباع  $[L T^{-1}]$ ، W عرض سلول  $[L]$ ،  $\theta$  رطوبت خاک  $[L^3 L^{-3}]$ ،  $C_f$  ضریبی که به بافت خاک و کاربری اراضی وابسته می‌باشد (صفری، ۲۰۱۲). از آنجایی که جریان آب زیرزمینی بسیار آهسته‌تر از حرکت آب در سطح زمین و نزدیک به سطح است، جریان آب زیرزمینی به صورت خروجی از یک مخزن خطی یکپارچه در مقیاس زیرحوضه تعریف می‌گردد. جریان آب سطحی و زیرسطحی ابتدا در هر شبکه سلولی به سوی کانال اصلی روندیابی می‌شود و در خروجی هر زیرحوضه به آب زیرزمینی می‌پیوندد و سپس هیدروگراف نهایی از مجموع جریان سطحی، زیرسطحی و زیرزمینی با توجه به روابط پیچیده جریان از همه پیکسل‌ها به‌دست می‌آید.

### ۳-۵-۴- جریان سطحی و جریان آبراهه

مدل با استفاده از روش معادلات تقریب موج پخشی سنت ونانت، روندیابی جریان سطحی و جریان آبراهه را انجام می‌دهد که در رابطه ۳-۴ ارائه گردیده است.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - C \frac{\partial Q}{\partial x} \quad 4-3$$

که در آن دبی  $Q [L^3 T^{-1}]$ ، ضریب پخش  $D [L^2 T^{-1}]$ ،  $x$  مسافت طی شده  $[L]$  و  $dt$  گام زمانی  $[T]$ ،  $C$  سرعت موج سینماتیک  $[LT^{-1}]$  می‌باشد و از معادله ۳-۵ به دست می‌آید (صفری، ۲۰۱۲).

$$C = \frac{5}{3} V \quad 5-3$$

که در آن  $v$  سرعت جریان و  $D$  ضریب پخش در سلول می‌باشد که از رابطه ۳-۶ به دست می‌آید.

$$D = \frac{vH}{2S_0} \quad 6-3$$

که در آن  $v$  سرعت جریان  $[LT^{-1}]$  با معادله مانینگ محاسبه شده و  $H$  شعاع هیدرولیکی  $[L]$  یا متوسط عمق جریان است.  $S_0$  شیب کف آبراهه می‌باشد که فرض می‌شود در پیکسل ثابت است. این دو پارامتر بستگی به عمق، سرعت جریان و خصوصیات زمین دارند.

لیو و همکاران برای محاسبه میزان دبی در انتهای مسیر جریان از معادله ۳-۷ به عنوان تابع پاسخ خطی سنت ونانت استفاده نمودند.

$$U(T) = -\frac{1}{\sigma \sqrt{2 \pi t^3 / t_0^3}} \exp \left[ -\frac{(t-t_0)^2}{2 \sigma^2 t / t_0} \right] \quad 7-3$$



که در آن  $U(t)$  تابع پاسخ مسیر جریان  $[T^{-1}]$  می باشد که برای تعیین هیدروگراف واحد لحظه ای جریان به کار می رود و روندیابی مسیر جریان تا خروجی حوضه را ممکن می سازد.  $t_0$  زمان پیمایش  $[T]$  و  $\sigma$  انحراف معیار استاندارد زمان جریان  $[T]$  می باشد که هر یک براساس معادلات ۳-۸ و ۳-۹ محاسبه می شوند. با انتگرال گیری از رابطه هم گرایی جریان بر روی تمام سلول های شبکه، دبی خروجی حوضه به دست می آید.

$$t_0 = \int \frac{1}{c} dx \quad ۳-۸$$

$$\sigma = \sqrt{\int 2 \frac{d}{c^3} dx} \quad ۳-۹$$

در نهایت رواناب مستقیم در خروجی حوضه و یا در هر نقطه که جریان به هم می پیوندد از رابطه ۳-۱۰ محاسبه می گردد.

$$Q(t) = \int A \int_0^t V(t) U(T - \tau) d\tau dA \quad ۳-۱۰$$

$Q(t)$  میزان دبی خروجی  $[L^3 T^{-1}]$ ،  $U(t)$  تابع پاسخ مسیر جریان،  $\tau$  تاخیر زمانی و  $V(t)$  حجم رواناب خروجی  $[L^3]$  می باشند.

### ۳-۵-۳- فرآیند شبیه سازی مدل

نقشه های پایه مورد نیاز (مدل رقومی ارتفاعی، نقشه بافت خاک و نقشه کاربری اراضی) با فرمت رستر و با اندازه پیکسل ۵۰ متر تهیه شده و سایر لایه های وابسته به آن در محیط GIS استخراج شد. به این ترتیب که ابتدا مشخصات پستی و بلندی در هر پیکسل شامل ارتفاع، جهت جریان، تراکم جریان، شبکه زهکشی، اتصال جریان، انشعابات رودخانه، شیب و شعاع هیدرولیکی کانال از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استخراج گردید. سپس لایه هدایت هیدرولیکی خاک، تخلخل، ظرفیت مزرعه، رطوبت باقیمانده، شاخص پراکنش اندازه خلل و فرج و نقطه

پژمردگی از بافت خاک به دست آمد. به طور مشابه، لایه های عمق ریشه، ظرفیت ذخیره برگابی، شاخص سطح برگ و ضریب زبری از نقشه کاربری اراضی استخراج گردید و ضریب زبری کانال نیز به صورت خطی براساس انشعاب آبراهه میان یابی شد.

### ۳-۵-۴- پارامترهای مدل WetSpa

به طور کلی مدل دارای دو دسته پارامتر می باشد که در زیر شرح داده می شود:

- پارامتر توزیعی مکانی: این دسته از پارامترها مانند ضریب رواناب پتانسیل، ضریب زبری مانینگ و غیره در بخش ArcView و اجرای منوهای مختلف با استفاده از سه نقشه پایه کاربری اراضی، بافت خاک و مدل رقومی ارتفاعی آن در قالب نقشه توزیعی مکانی تهیه می شود که از این نقشه ها می توان جهت داده ورودی سایر مدل های هیدرولوژیکی استفاده نمود.

- پارامترهای عمومی: به جهت واسنجی بهتر در مدل WetSpa، ۱۱ پارامتر در آن تعبیه شده است. اکثر این پارامترها دارای تعاریف فیزیکی بوده و در کنترل رواناب و هیدروگراف خروجی حوضه نقش مهمی دارند، اما تعیین نمودن آنها در مقیاس شبکه سلولی مشکل می باشد (تهیه نقشه توزیعی مکانی از این پارامترها مشکل می باشد). بنابراین برای کسب نتایج بهتر در مدل و بهینه سازی آن، واسنجی این پارامترها در مقابل داده های رواناب مشاهده ای ترجیح داده می شود (آذین مهر، ۱۳۹۴).

این پارامترها عبارتند از: فاکتور جریان زیرسطحی: به منظور در نظرگیری تأثیر هدایت هیدرولیکی بر جریان زیرسطحی استفاده می شود و مقدار یک را به صورت پیش فرض برای این ضریب در نظر می گیرند. فاکتور تصحیح تبخیر-تعرق: در حوضه های مرطوب که دارای پوشش کامل و میزان رطوبت کافی بوده برابر با یک است. ضریب افت آب زیرزمینی: این ضریب منعکس کننده وضعیت ذخیره زیر حوضه است. رطوبت اولیه خاک: این فاکتور در شبیه سازی طولانی مدت حوضه اهمیت کمتری خواهد داشت و تنها مرحله اول شبیه سازی را تحت تأثیر قرار

می‌دهد. ذخیره آب زیرزمینی اولیه: یک مقدار عددی برحسب میلیمتر به‌عنوان عمق اولیه آب زیرزمینی برای همه زیرحوضه‌ها قرار داده می‌شود که این مقدار با مقایسه مراحل ابتدایی هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای، قابل واسنجی است. حداکثر ذخیره آب زیرزمینی: میزان تبخیر و تعرق را از آب زیرزمینی کنترل می‌کند. درجه حرارت پایه برای ذوب برف: در صورتی که دما از دمای پایه کمتر شود، بارش به‌صورت برف خواهد بود و هنگامی که دمای هوا از دمای پایه بالاتر برود، پدیده ذوب برف رخ داده و برف ذوب شده قسمتی از رواناب سطحی را تشکیل می‌دهد. ضریب روز-درجه حرارت: در شرایطی که بارندگی وجود ندارد این ضریب بین  $3/7$ -  $1/8$  (میلیمتر بر درجه سانتی‌گراد بر روز) است و با مقایسه هیدروگراف مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در فصل بهار می‌توان این ضریب را واسنجی کرد. ضریب روز-درجه بارش: نرخ ذوب برف ناشی از تراکم هوای مرطوب بر سطح برف و همچنین گرمای انتقال یافته به برف‌پشته از سوی بارندگی را تعیین می‌کند و تعیین کننده نرخ ذوب برف ناشی از بارش است. توان رواناب سطحی برای زمانی که شدت بارش به سمت صفر میل می‌کند: این پارامتر متغیر بوده و منعکس کننده تأثیر شدت بارندگی بر ضریب رواناب سطحی در زمانی است که شدت بارندگی بسیار کم است و شدت بارش: این پارامتر به یک شدت بارش آستانه مربوط می‌گردد که به گام زمانی مدل‌سازی بستگی دارد. به‌طوری‌که در آن توان رواناب سطحی برابر با یک بوده و ضریب رواناب واقعی به‌صورت تابع خطی با محتوای رطوبت نسبی خاک محاسبه می‌شود (لیو و دی‌اسمدت، ۲۰۰۴).

### ۳-۵-۵- واسنجی و اعتبارسنجی مدل WetSpa

مدل، زمانی پیش‌بینی مناسب دارد که ساختار مدل و پارامترهای مدل با قابلیت اطمینان بالا بر همدیگر منطبق باشند. به هر حال از دلایل مشکل بودن ارزیابی پارامترهای مدل، وجود عدم قطعیت‌های زیاد در تعیین مقادیر پارامترهای مورد بررسی می‌باشد، چرا که هر یک از این پارامترها را نمی‌شود به‌صورت مستقیم در حوضه اندازه‌گیری کرد. از این رو واسنجی مدل در بهبود عملکرد مدل ضروری است (لیو و همکاران، ۲۰۰۵). در مرحله واسنجی

بایستی به دفعات مختلف اقدام به اجرای مدل کرد و هر بار با توجه به شاخص‌ها و معیارهای آماری، نتایج را مورد ارزیابی قرار داد. در صورت رضایت‌بخش نبودن نتایج شبیه‌سازی، بایستی پارامترهای عمومی موجود در مدل بهینه شود و مدل مجدداً اجرا گردد تا جریان شبیه‌سازی شده از لحاظ آماری دارای دقت مناسب باشد. در تحقیق حاضر نیز بعد از اجرای مدل در دفعات متعدد، هر بار پارامترهای عمومی کالیبراسیون تغییر داده شده و پس از بهینه شدن پارامترها، مدل در منطقه مطالعاتی کالیبره شد.

### ۳-۵-۱- واسنجی مدل

پس از ارزیابی اولیه مدل در صورت مطلوب نبودن نتایج در مقایسه با دبی مشاهداتی با تغییر در ۱۱ پارامتر مدل، می‌توان مقادیر دبی محاسبه شده را به دبی اندازه‌گیری شده نزدیک کرده و معیارهای آماری را بهینه نمود. برای مناطق مختلف می‌توان مقادیر بهینه این پارامترها را مشخص کرد. در این مطالعه ابتدا مدل برای داده‌های روزانه مربوط به تاریخ ۱۳۹۰/۷/۱ تا ۱۳۹۴/۶/۳۱ اجرا، ارزیابی و به‌صورت دستی واسنجی شده است.

### ۳-۵-۲- اعتبارسنجی مدل

پس از بهینه‌سازی نتایج برای دوره واسنجی، جهت اطمینان از مقادیر برآورد شده پارامترها در مرحله واسنجی، مدل برای یک دوره زمانی جدا با استفاده از مقادیر بهینه پارامترهای به‌دست آمده در مرحله واسنجی اجرا و نتایج آن بررسی گردید. در این مطالعه جهت اعتبارسنجی مدل از داده‌های مربوط به تاریخ ۱۳۹۴/۷/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱ استفاده گردید.

### ۳-۵-۶- معرفی معیارهای کارایی و ارزیابی مدل

به‌منظور ارزیابی کارایی مدل WetSpa در شبیه‌سازی هیدروگراف مشاهده‌ای، یک سری روش‌های آماری مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر مقایسه چشمی، جهت ارزیابی بهترین برازش بین هیدروگراف‌های محاسبه‌ای و

مشاهده‌ای، سایر معیارها از قبیل معیار ناش - ساتکلیف برای برآورد کارایی در مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. این اندازه‌گیری آماری یک ارزیابی کمی و بیانگر درجه انطباق هیدروگراف مشاهده‌ای و پیش‌بینی می‌باشد. در این مطالعه ارزیابی برای دوره واسنجی و سپس برای دوره اعتبارسنجی انجام شد. برای این منظور از معیارهای آماری زیر استفاده می‌شود.

### ۳-۵-۶-۱- اریبی مدل

اریبی مدل به‌عنوان اختلاف میانگین نسبی بین جریان‌های مشاهداتی و اندازه‌گیری شده برای یک دوره اندازه‌گیری بیان می‌شود، که کارایی بیلان آبی را نشان می‌دهد و مهم‌ترین معیار برای مقایسه نحوه کار مدل بوده که از رابطه ۱۱-۳ به‌دست می‌آید.

$$CRI = \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{st} - Q_{ot})}{\sum_{t=1}^N Q_{ot}} \quad 11-3$$

که در آن  $Q_{st}$  و  $Q_{ot}$  به‌ترتیب دبی‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در گام زمانی  $t$  می‌باشد (متر مکعب بر ثانیه) و  $N$  تعداد گام زمانی در دوره شبیه‌سازی است. مقدار صفر آن نشان‌دهنده شبیه‌سازی مناسب حجم جریان مشاهداتی می‌باشد، مقادیر منفی نشان‌دهنده برآورد کمتر از واقعیت و مقادیر مثبت آن نشان‌دهنده برآورد بیشتر از واقعیت می‌باشد.

### ۳-۵-۶-۲- معیار کارایی ناش - ساتکلیف<sup>۱</sup>:

ناش و ساتکلیف (۱۹۷۰) یک ضریب بی‌بعد به نام کارایی مدل ارائه دادند. این معیار نشان‌دهنده دقت شبیه‌سازی مدل بوده و شامل استاندارد واریانس باقی‌مانده‌ها می‌باشد و مقدار عددی آن با طول دوره یا میزان رواناب تغییر

<sup>1</sup> Nash-Sutcliffe efficiency

نمی‌کند. این معیار از مقادیر منفی تا ۱ تغییر می‌کند و در یک پیش‌بینی کامل برابر یک می‌باشد. این معیار در رابطه ۱۲-۳ ارائه گردیده است.

$$NS=1-\frac{\sum_{t=1}^N(Q_{st}-Q_{ot})^2}{\sum_{t=1}^N(Q_{ot}-\bar{Q}_o)^2} \quad 12-3$$

### ۳-۵-۶-۳- معیار کارایی ناش- ساتکلیف لگاریتمی برای ارزیابی جریان‌های کم

همان معیار لگاریتم ناش- ساتکلیف است که با این معیار، کیفیت شبیه‌سازی جریان‌های کم ارزیابی می‌گردد.  $\varepsilon$  مقدار بسیار کوچک اختیاری برای اجتناب از مشکلات ناشی از دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی مساوی با صفر است. میزان  $\varepsilon$  خطای مدل در محاسبه بیلان آبی به اندازه کافی کم بوده و دبی‌های مشاهداتی کمتر از  $\varepsilon$  قابل صرف‌نظر کردن هستند در غیر این صورت این فاکتور ناش- ساتکلیف باعث ایجاد خطای مدل در محاسبه بیلان آبی می‌گردد و در یک شبیه‌سازی کامل برابر با یک می‌باشد. برای محاسبه این معیار از رابطه ۱۳-۳ استفاده می‌شود.

$$NS=1-\frac{\sum[\ln(Q_{st}+\varepsilon)-\ln(Q_{ot}+\varepsilon)]^2}{\sum_{t=1}^N[\ln(Q_{ot}+\varepsilon)-\ln(\bar{Q}_o+\varepsilon)]^2} \quad 13-3$$

### ۳-۵-۶-۴- معیار کارایی ناش- ساتکلیف برای ارزیابی جریان‌های بالا

این معیار نیز همان ناش- ساتکلیف است که برای جریان‌های زیاد سازگار شده است. به این صورت که وزن بیشتری به جریان‌های بیشتر (زیادتر) اختصاص می‌دهد. این معیار در رابطه ۱۴-۳ نشان داده شده است.

$$NSH=1-\frac{\sum_{t=1}^N(Q_{ot}-\bar{Q}_o)(Q_{st}-Q_{ot})^2}{\sum_{t=1}^N(Q_{ot}+\bar{Q}_o)(Q_{ot}-\bar{Q}_o)^2} \quad 14-3$$

در این رابطه‌ها،  $Q_{st}$  دبی شبیه‌سازی شده و  $Q_{ot}$  دبی مشاهداتی در گام زمانی  $t$  بر حسب  $(\frac{m^3}{s})$  و  $\bar{Q}_0$  نشان-دهنده میانگین دبی مشاهداتی و  $N$  تعداد گام‌های زمانی است.

### ۳-۵-۶-۵- شاخص کارایی یا معیار جمعی

برای ارزیابی کارایی مدل طی دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی عامل جدیدی معرفی گردیده است که جنبه‌های مختلف هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را مورد مقایسه قرار می‌دهد و در حقیقت نشان‌دهنده میزان تفاوت‌هایی از قبیل اندازه، شکل و حجم بین هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است که به صورت معادله ۳-۱۵ ارائه می‌گردد:

$$AM = \frac{r_{mod} + NS + (1 - |MB|)}{3} \quad ۳-۱۵$$

$$r_{mod} = \left[ \frac{\min\{\delta_0, \delta_s\}}{\max\{\delta_0, \delta_s\}} \right] \quad ۳-۱۶$$

که در ۳-۱۶،  $r_{mod}$  عبارت است از ضریب همبستگی اصلاح‌شده که خود نیز نشان‌دهنده تفاوت اندازه‌های هیدروگراف و شکل آن می‌باشد،  $MB$  خطای مدل در محاسبه بیلان آبی مدل که نمایانگر تعادل آبی مدل می‌باشد،  $NS$  معیار کارایی ناش-ساتکلیف که برای ارزیابی توانایی تولید هیدروگراف جریان به کار می‌رود،  $\delta_0$  و  $\delta_s$  به ترتیب انحراف معیار دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی و  $R$  ضریب همبستگی بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی می‌باشد.

هنریکسن و همکارانش (۲۰۰۳)، برای بررسی میزان ناش-ساتکلیف و اندرسن و همکارانش (۲۰۰۱) برای معیار تجمعی، ۵ طبقه ارائه کرده‌اند که در جدول ۳-۱ نشان داده شده است. با استفاده از این جدول میزان کارایی مدل براساس دو معیار یادشده ارزیابی شد. به‌طور کلی، در شبیه‌سازی توزیع مکانی، مؤلفه‌های بیلان آبی و سپس جریان رودخانه در یک حوضه آبریز با پیچیدگی‌های طبیعی خاص آن، رسیدن به دقت بالای ۵۵ درصد، رضایت‌بخش است (صفری، ۲۰۱۲). ارزیابی کیفیت مدل تا حد زیادی به کیفیت داده‌های هواشناسی و پارامترهای مناسب از پوشش خاک بستگی دارد (برندیک و همکاران، ۲۰۱۰).

جدول ۳-۱ طبقه‌بندی کارایی مدل برای تعیین درجه تطابق

کلاس	عالی	خیلی خوب	خوب	ضعیف	خیلی ضعیف
معیار جمعی	$> 0/85$	$0/7 - 0/85$	$0/55 - 0/70$	$0/4 - 0/55$	$< 0/4$
ناش-ساتکلیف	$> 0/85$	$0/65 - 0/85$	$0/50 - 0/65$	$0/20 - 0/50$	$< 0/2$

### ۳-۵-۶- معیار میانگین قدرمطلق خطا یا میانگین خطای مطلق (MAE)

MAE، میانگین اختلاف بین مقدار پیش‌بینی شده و مقدار واقعی در تمام موارد آزمایش است. این خطا، خطای متوسط پیش‌بینی است که در رابطه ۳-۱۷ ارائه شده است.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad 3-17$$

### ۳-۵-۶-۷- معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

این معیار نشان‌دهنده تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی می‌باشد و در رابطه ۳-۱۸ نشان داده شده است.



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

۱۸-۳

### ۳-۵-۶-۸- معیار ضریب همبستگی (R)

این معیار بیانگر میزان احتمال همبستگی میان دو دسته داده در آینده می‌باشد. این ضریب در واقع نتایج تقریبی پارامتر مورد نظر در آینده را براساس مدل ریاضی تعریف شده که منطبق بر داده‌های موجود است بیان می‌دارد. معادله این معیار در رابطه ۱۹-۳ ارائه شده است.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2)(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2)}}$$

۱۹-۳

در روابط ۱۷-۳، ۱۸-۳ و ۱۹-۳، N تعداد داده‌ها،  $O_i$  مقدار مشاهده شده و  $P_i$  مقدار پیش‌بینی شده است. هم‌چنین نماد بار بر میانگین داده‌ها دلالت دارد.

پس از معرفی اطلاعات مورد نیاز مدل WetSpa، مانند باران، تبخیر-تعرق پتانسیل، دما و دبی، مدل اجرا شد. در شروع عملیات بهینه‌سازی لازم است برای تمام پارامترهای به کار رفته در مدل مقادیر اولیه‌ای اختیار گردد، عملیات بهینه‌سازی با حصول بهترین تطبیق بین هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای به اتمام می‌رسد. به‌منظور واسنجی و ارزیابی مدل، اطلاعات مشاهده‌ای با دوره آماری ۴ سال برای واسنجی مدل و ۳ سال برای ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفت. در صورت قابل قبول بودن نتایج دوره ارزیابی، می‌توان نسبت به انتخاب صحیح پارامترهای ورودی اطمینان خاطر حاصل کرد.

### ۳-۶- تشریح مدل HEC-HMS

مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب و تخمین مقدار رواناب سطحی حوضه با تقسیم‌بندی آن به اجزای مختلف هیدرولوژیکی و هیدرولیکی به هم پیوسته، طراحی شده است (اولیب لو، ۲۰۱۰). مدل HEC-HMS در سال ۱۹۹۸ توسط اداره مهندسی ارتش ایالات متحده توسعه داده شد (فلدمن، ۲۰۰۰). این مدل شامل چهار بخش مدلی تحلیلی برای محاسبه جریان سطحی مانند روندیابی سیل در کانال، روابط گرافیکی پیشرفته اجزای سامانه هیدرولوژیکی با ویژگی‌های تعاملی، سیستمی برای ذخیره و مدیریت داده‌ها و وسیله‌ای برای نمایش و گزارش خروجی مدل می‌باشد. این مدل جریان حوضه را در محدوده گسترده‌ای از سطوح جغرافیایی شبیه‌سازی می‌کند (ورما، ۲۰۱۰). ساختار مدل HEC-HMS شامل سه بخش اصلی که عبارت از الف) مدل حوضه ب) مدل هواشناسی ج) شاخص کنترل زمانی

### ۳-۶-۱- مدل حوضه

در این بخش، حوضه به صورت شماتیک که شامل زیرحوضه‌ها، اتصال آن‌ها به یکدیگر و بازه‌ها به مدل معرفی می‌شوند. سپس روش مناسبی برای تعیین تلفات اولیه رواناب، روش انتقال و جریان پایه انتخاب کرده و اطلاعات فیزیکی حوضه آبریز وارد می‌گردد. در زیر روش‌های محاسبه هر کدام از پارامترها شرح داده می‌شود.

### ۳-۶-۱-۱- تلفات حوضه

برگاب، تبخیر- تعرق و ذخیره آب در چالاب‌ها از تبدیل مستقیم بارش به رواناب جلوگیری می‌کنند. تلفات بارش برای هر گام زمانی با روش‌های متفاوت محاسبه و از کل عمق بارش در آن گام زمانی کسر می‌شود. عمق باقی‌مانده، به عنوان بارش مازاد در نظر گرفته می‌شود و به صورت یکنواخت در سراسر حوضه توزیع می‌گردد. در مدل HEC-HMS برای محاسبه تلفات رواناب، ده روش مختلف وجود دارد که در این تحقیق از روش شماره‌منحنی SCS-CN

استفاده گردیده است. پارامترهای مورد نیاز مدل تلفات، شامل نگهداشت اولیه، شماره منحنی (CN) و نفوذناپذیری می‌باشند که روابط آن‌ها در زیر آمده است (سلطانی، ۱۳۸۹).

الف) نگهداشت اولیه: نگهداشت اولیه ( $I_a$ )، مقداری از بارندگی است که قبل از وقوع رواناب جذب خاک می‌شود. مقدار نگهداشت اولیه و حداکثر ظرفیت نگهداشت (S) به عوامل مختلفی از قبیل نوع خاک، نوع پوشش گیاهی، نفوذپذیری، ذخیره گودالی و رطوبت اولیه خاک وابسته‌اند. تحقیقات انجام شده در آمریکا نشانگر این است که مقدار  $I_a$  از ۰/۲S تا ۲/۲S تغییر می‌کند (هاوکینس<sup>۱</sup>، ۱۹۸۲). با آزمایش در حوضه‌های مختلف مقدار متوسط  $I_a$  برابر ۰/۲S محاسبه شده است که روابط آن‌ها در ۳-۲۰ و ۳-۲۱ آمده است.

$$I_a = 0.2S$$

۳-۲۰

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

۳-۲۱

ب) شماره منحنی CN: برای به‌دست آوردن شماره منحنی که به خصوصیات نفوذپذیری خاک حوضه وابسته است ابتدا گروه هیدرولوژیکی خاک مشخص گردید و سپس با بررسی وضعیت کاربری در سطح حوضه براساس جداول استاندارد که در کتب معتبر (اصول هیدرولوژی کاربردی امین علیزاده) موجود است، مقدار این پارامتر تخمین زده شد. در این مرحله لایه اطلاعات کاربری اراضی با لایه اطلاعات بافت خاک همپوشانی شدند و مقدار شماره منحنی برای هر زیرحوضه در GIS محاسبه گردید.

---

<sup>1</sup> Hawkins

ج) نفوذناپذیری: به مناطقی نفوذناپذیر گفته می‌شود که مانند مناطق شهری و صخره‌ای با رواناب بالا و کمترین درصد نفوذ باشند یا نفوذپذیری صفر باشد. با توجه به نقشه کاربری اراضی منطقه (شکل ۳-۳) مقدار مناطق غیر قابل نفوذ محاسبه گردید.

### ۳-۶-۱-۲- مدل انتقال

برای تبدیل فرآیند بارش به رواناب در مدل، روش‌های مختلف وجود دارد که در مدل HEC-HMS، هفت روش برای تبدیل بارش مازاد به جریان سطحی وجود دارد که در این تحقیق از روش هیدروگراف واحد SCS مورد استفاده قرار گرفته است. پارامتر مورد نیاز مدل روش انتقال، زمان تاخیر می‌باشد که برای به‌دست آوردن آن، محاسبه زمان تمرکز الزامی می‌باشد.

الف) محاسبه زمان تمرکز: زمان تمرکز، به زمانی گفته می‌شود که رواناب از دورترین نقطه (از لحاظ زمانی) حوضه آبریز به نقطه خروجی از حوضه مورد نظر برسد. روش‌های متعددی برای محاسبه زمان تمرکز حوضه‌های آبریز وجود دارد که در این پژوهش از معادله کالیفرنیا رابطه ۳-۲۲ به واسطه تأیید عملکرد آن در بیشتر مناطق، استفاده شده است (حسین‌زاده، ۱۳۹۴).

$$T_c = 0.885 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad ۲۲-۳$$

که در آن  $T_c$  زمان تمرکز بر حسب ساعت،  $L$  طول بزرگ‌ترین مسیر آب حوضه بر حسب کیلومتر و  $H$  اختلاف ارتفاع بین بالاترین و پایین‌ترین نقطه حوضه بر حسب متر است.

ب) محاسبه زمان تأخیر: سازمان حفاظت خاک آمریکا، رابطه ۳-۲۳ را برای محاسبه زمان تأخیر حوضه پیشنهاد داده است که در آن  $T_c$  زمان تمرکز بر حسب ساعت و  $T_1$  زمان تأخیر بر حسب ساعت می‌باشد.

$$T_l = 0.6 T_c$$

۲۳-۳

### ۳-۱-۶-۳- آب پایه

روش جریان پایه در آغاز شبیه سازی به عنوان جریان زیرسطحی تأخیری برای رسیدن به آبراهه های حوضه اعمال می گردد (ورما، ۲۰۱۰). در این بخش می توان روشی برای تعیین آب پایه در نظر گرفت و یا مدل را بدون آب پایه شبیه سازی کرد، در این تحقیق از روش رگرسیون استفاده شده است.

### ۳-۲-۶-۳- مدل هواشناسی حوضه

در این بخش باید داده های بارندگی برای شبیه سازی حوضه وارد گردند. در این تحقیق روش هیدروگراف مشخص، به عنوان مدل هواشناسی مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق از داده های ایستگاه آب سنجی بار اریه استفاده شده است.

### ۳-۳-۶-۳- شاخص کنترلی

در این بخش، تاریخ و ساعت شروع و پایان شبیه سازی و فواصل زمانی مورد نظر به مدل معرفی می گردد. این بخش در کنترل سرعت و دقت محاسبات نقش دارد. در این تحقیق شبیه سازی در دوره آماری ۱۳۹۷-۱۳۹۰ صورت می گردد، لذا گام زمانی روزانه (۲۴ ساعته) در انجام محاسبات مورد استفاده قرار گرفت.

### ۳-۴-۶-۳- واسنجی و اعتبارسنجی مدل

در این مرحله پارامترهای مدل در یک دوره ای از داده ها (از ۱۳۹۰/۷/۱ تا ۱۳۹۴/۶/۳۱) واسنجی می شوند. سپس اعتبارسنجی مدل از اجرای مدل با پارامترهای بهینه شده برای دوره دوم داده ها (از ۱۳۹۴/۷/۱ تا ۱۳۹۷ ۶/۳۱) انجام گرفت و در آخر هیدروگراف دبی شبیه سازی با دبی مشاهداتی مقایسه گردید.

### ۳-۶-۵- ارزیابی صحت داده‌ها

جهت تعیین بهترین برازش بین هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی مدل از ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین قدر مطلق خطا که به ترتیب در روابط ۳-۱۹، ۳-۱۸ و ۳-۱۷ ارائه گردیده است برای سنجش اختلاف میان داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، استفاده شد. در نهایت عملکرد مدل در شبیه‌سازی بارش- رواناب در مرحله اعتبارسنجی مورد ارزیابی قرار گرفت.

### ۳-۷- تشریح مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

تحقیقات گسترده‌ای در زمینه کاربرد مدل‌های هوش محاسباتی به منظور پیش‌بینی‌های اقلیمی صورت گرفته است، اما انتخاب نوع و تعداد متغیرهای ورودی برای هر کدام از این مدل‌ها همواره مدل‌سازان را با مسائلی روبه‌رو کرده است. برنامه‌ریزی بیان ژن از روش‌های جدید بین روش‌های الگوریتم گردشی می‌باشد که به دلیل دارا بودن دقت کافی، به عنوان یک روش کاربردی مطرح می‌شود. روش برنامه‌ریزی بیان ژن، در سال ۱۹۹۹ توسط فریرا<sup>۱</sup> ارائه شد. این روش ترکیبی از روش‌های الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)<sup>۲</sup> که در آن، کروموزوم-های خطی و ساده با طول ثابت، مشابه با آنچه که در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و به شکل ساختار شاخه‌ای و با اندازه و اشکال متفاوت مشابه با برنامه‌ریزی ژنتیک بیان می‌گردند. تفاوت اساسی موجود بین الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی بیان ژن به طبیعت هر یک از افراد بر می‌گردد، به نحوی که افراد در الگوریتم ژنتیک ردیف‌های خطی با طول ثابت می‌باشند (کروموزوم‌ها) ولی در برنامه‌ریزی بیان ژن همان شاخه‌های مجزا می‌باشند. همچنین در این برنامه بر ساختار درختی مجموعه‌ها تأکید می‌شود ولی الگوریتم ژنتیک، براساس سیستم ارقام دودویی عمل می‌نماید. فرآیند گام به گام حل یک مسئله با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن به شرح زیر می‌باشد.

---

<sup>1</sup> Ferreira

<sup>2</sup> Genetic Programming

۱- تعیین تابع برازش: مقداری کمی که نمایش‌گر کیفیت یک کروموزوم به‌عنوان یک جواب از مسئله است و میزان شایستگی یک کروموزوم را در بین جمعیت کروموزومی نشان می‌دهد، به‌عنوان تابع برازش شناخته می‌شود.

۲- انتخاب مجموعه ترمینال: که همان متغیرهای مستقل مسئله و متغیرهای حالت سامانه می‌باشند. ۳- انتخاب مجموعه توابع: برای برقراری رابطه بین داده‌های ورودی و خروجی لازم است توابعی تعریف شود که شامل عملگرهای حسابی، توابع آزمون و توابع بولی می‌باشد. ۴- شاخص اندازه‌گیری دقت مدل که بر مبنای آن می‌توان مشخص نمود که توانایی مدل در حل یک مسئله خاص تا چه اندازه می‌باشد. ۵- مؤلفه‌های کنترل: مقادیر مؤلفه‌های عددی و متغیرهای کیفی که برای کنترل اجرای برنامه استفاده می‌شوند. ۶- شرط توقف اجرای برنامه: معیاری برای حصول نتیجه و توقف اجرای برنامه می‌باشد (قربانی، ۲۰۱۰).

### ۳-۷-۱- ساختار مدل برنامه‌ریزی بیان ژن

برنامه‌ریزی بیان ژن یک تکنیک برنامه‌ریزی خودکار می‌باشد که راه حل مسئله را با استفاده از برنامه کامپیوتری ارائه می‌کند. این روش با استفاده از اطلاعات موجود در داده‌ها و بدون هیچ فرضیه‌ای در ساختار رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته، رابطه‌ای مناسب بین آن‌ها برقرار کرده و خروجی را پیش‌بینی می‌کند. این الگوریتم روشی مناسب برای مدل‌سازی فرآیندهای غیرخطی و پیچیده است.

برنامه‌ریزی بیان ژن، با خلق کروموزوم‌ها و بیان درختی، دارای بینشی گسترده در ایجاد راه‌حل‌های جدید برای محاسبات تکاملی است. در GEP، ژن‌ها به شکل درختی بیان و کدگذاری می‌شوند. در مورد کروموزوم‌های چند ژنی، تمامی بیان درختی‌ها به‌وسیله تابع پیوند<sup>۱</sup>، از محل گره ریشه<sup>۲</sup> خود به یکدیگر متصل می‌شوند. هر ژن، یک

---

<sup>۱</sup>- Linking Function

<sup>۲</sup>- Root Node

ناحیه کدگذاری به نام ORF<sup>۱</sup> (چارچوب تفسیر باز) یا بیان K<sup>۲</sup> دارد که پس از کدبرداری و رمزگشایی به صورت ساختار درختی (ET) بیان می‌شود. این مدل برای کدگذاری اطلاعات و بیان کروموزوم‌ها، از یک زبان جدید، موسوم به کاروا استفاده می‌کند. همچنین ساختار کروموزوم‌ها به گونه‌ای طراحی شده است که شرایط ایجاد چندین ژن که هر یک برای بیان درختی یا برنامه کوچک‌تر کدگذاری می‌شود را فراهم کند (فریرا، ۲۰۰۱).

این مدل با به‌کارگیری مجموعه قدرتمند از عملگرهای ژنتیکی از قبیل جهش، وارون‌سازی، ترانهش IS<sup>۳</sup>، ترانهش ریشه IRS<sup>۴</sup>، ترانهش ژنی، ترکیب تک نقطه‌ای، ترکیب دو نقطه‌ای و ترکیب ژنی<sup>۵</sup> به گونه‌ای مناسب فضای راه‌حل را جست‌وجو می‌نماید (فریرا، ۲۰۰۱).

### ۳-۷-۲- ورودی‌های مدل برنامه‌ریزی بیان ژن

به‌منظور داشتن پیش‌بینی‌های نزدیک به واقعیت از پارامترهای بارش روزانه (R)، تبخیر- تعرق روزانه (ET)، دمای روزانه (T)، دبی روزانه (Q) و همچنین از توالی برخی پارامترها، دبی موبوط به روز قبل (Q-1) و بارش روز قبل (R-1) به‌عنوان ورودی‌های مدل استفاده گردید.

همچنین پارامترهای کنترل‌کننده مورد استفاده در این مدل که با آزمایش و سعی و خطا، مقدار مطلوب هر کدام حاصل می‌گردد، که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. عملگر جهش: این عملگر، بهسازی تصادفی داخل کروموزوم‌های معینی است که برای جلوگیری از ایجاد افراد معیوب از نظر قواعد، برخی عملیات بدون نقص را اجرا می‌نماید. عملگر ترانهش: عناصر ترانهش قطعاتی از ژنوم هستند که می‌تواند فعال شده و در قسمت دیگری در کروموزوم کپی شود. ترکیب ژنی: در این ترکیب، ابتدا دو کروموزوم والد انتخاب می‌شود و یکی از ژن‌های دو

---

<sup>1</sup> Open Reading Frame

<sup>2</sup> K- Expression

<sup>3</sup> Insertion- Sequence

<sup>4</sup> Root- Insertion- Sequence

<sup>5</sup> Gene Recombination



کروموزوم به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، در نهایت ژن‌های انتخاب شده در دو کروموزوم با یکدیگر جابجا می‌شوند. ترکیب تک نقطه‌ای: رایج‌ترین نوع ترکیب، ترکیب تک نقطه‌ای است. در این روش، کروموزوم‌های والدین در یک نقطه تصادفی به دو قسمت تقسیم شده و هر فرزند با انتخاب قسمت اول از کروموزوم یک والد و قسمت دوم از کروموزوم والد بعدی ساخته می‌شود. ترکیب دو نقطه‌ای: به کمک این عملگر می‌توان ژن‌هایی که خصوصیات مناسب دارند را حفظ نمود. در این روش، پس از انتخاب والدین و انتخاب دو نقطه تصادفی بر روی رشته‌های کروموزوم، محتویات بین دو نقطه تبادیل می‌گردد (فریرا، ۲۰۰۱).

### ۳-۷-۳- شاخص‌های تعیین دقت روش برنامه‌ریزی بیان ژن

به منظور ارزیابی دقت روش برنامه‌ریزی بیان ژن، از شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب همبستگی (R) استفاده گردیده است. بهترین مقدار برای این سه معیار به ترتیب صفر، صفر و یک است. شاخص‌های یاد شده به ترتیب با استفاده از روابط ۱۸-۳، ۱۷-۳ و ۱۹-۳ قابل محاسبه می‌باشند.



## فصل چہارم

### بحث و نتائج

#### ۴-۱- مقدمه

همانطور که در فصل‌های قبلی اشاره گردید، در این پژوهش از مدل HEC-HMS، WetSpa برای پیش‌بینی رواناب و روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) برای پیش‌بینی رواناب و رسوب حوضه آبریز بار اریه استفاده گردیده است.

#### ۴-۲- مدل WetSpa

ابتدا در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی، نقشه کاربری اراضی، مدل رقومی ارتفاع و بافت خاک به‌عنوان واحدهای کاری در قالب رستر با اندازه‌ی سلولی ۵۰ متر برای حوضه بار اریه استخراج شد و سپس از داده‌های هواشناسی و آب‌سنجی برای اجرای مدل استفاده گردید.

#### ۴-۲-۱- نتایج حاصل از آماده‌سازی نقشه‌های مقدماتی

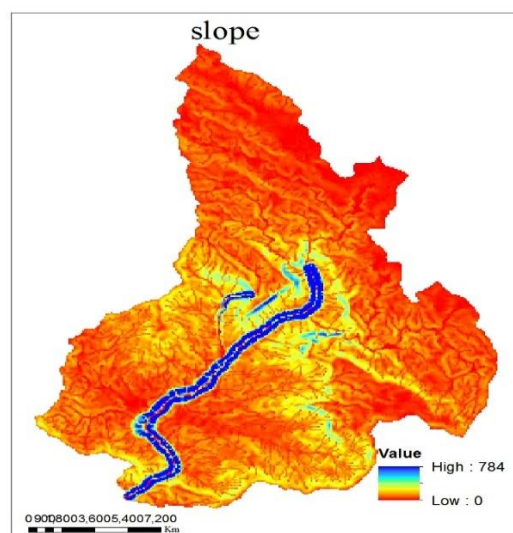
مدل WetSpa با استفاده از سه نقشه ورودی و به کمک اسکریپت‌های موجود در نرم افزارهای ArcView و نیز جداول Lookup Table برای تهیه نقشه‌های زیر مورد استفاده قرار گرفت. این لایه‌ها به‌منظور محاسبه تابع پاسخ جریان از هر سلول تا خروجی حوضه و آبراهه اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

#### ۴-۲-۱-۱- نقشه‌های پارامترهای توزیعی-مکانی مستخرج از نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM)

در این پژوهش، از توپوگرافی با ابعاد ۵۰ متر استفاده شد. نقشه‌های تولید شده از مدل رقومی ارتفاع شامل میزان شیب، طول جریان، جریان تجمعی، شبکه آبراهه، شعاع هیدرولیکی و زیرحوضه‌ها می‌باشند.

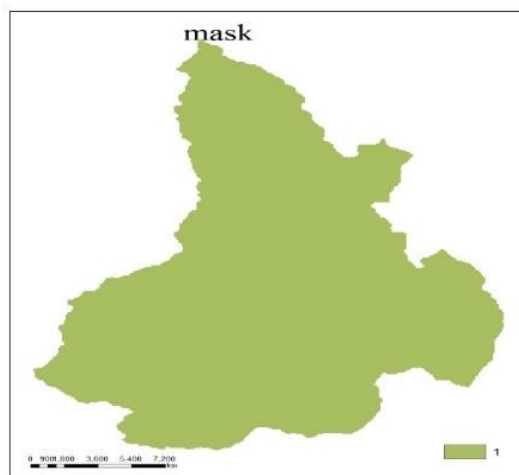
نقشه شیب: روند محاسبه شیب، نرخ حداکثر تغییرات مکانی ارتفاعی و ایجاد یک شبکه جدید به‌عنوان شیب در خروجی شبکه می‌باشد. از آنجایی که در برخی نقاط حوضه ممکن است شیب برابر با صفر باشد که در نتیجه باعث ایجاد خطا در بحث روندیابی جریان می‌شود به همین دلیل در صورت صفر بودن شیب واقعی منطقه، شیبی معادل

با ۰/۰۱ درصد که به صورت پیش فرض مدل می باشد، در نظر گرفته می شود. این نقشه در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



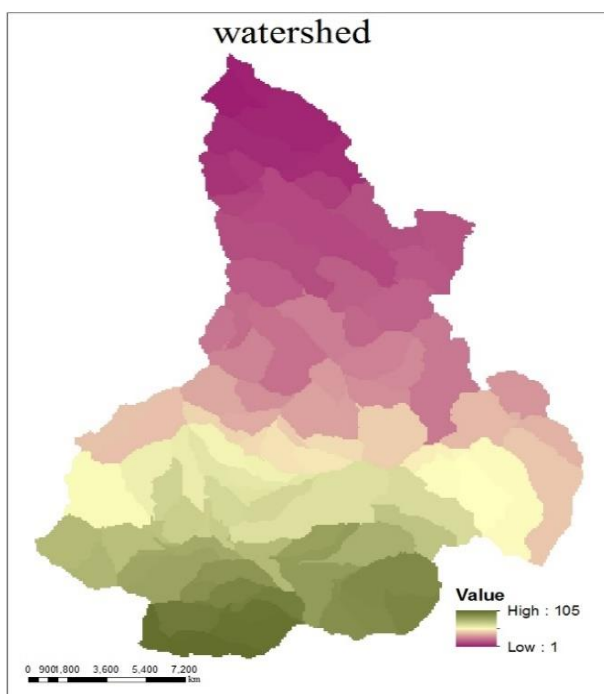
شکل ۴-۱ نقشه شیب حوزه بار اریه

نقشه Mask: با توجه به شکل ۴-۲ این نقشه محدوده مورد مطالعاتی را تعیین می کند که می تواند برای استخراج مرز حوزه و تعیین وسعت شبکه های دیگر به کار می رود.



شکل ۴-۲ نقشه تعیین مرزحوضه بار اریه

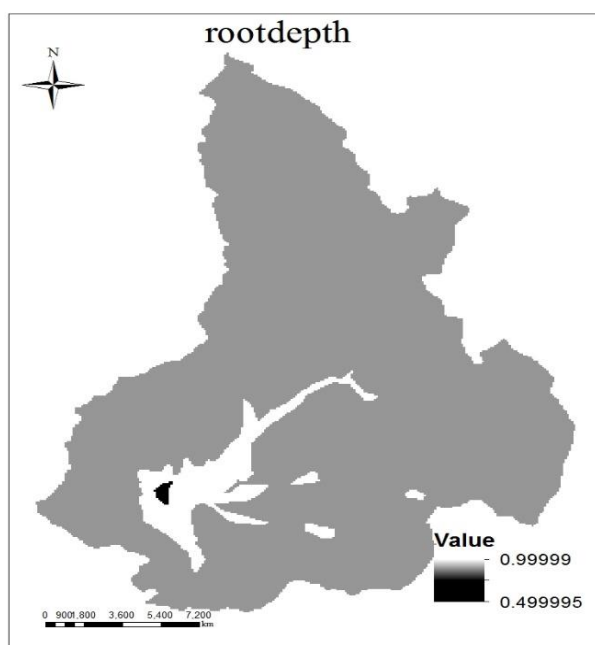
نقشه زیرحوضه: حوضه آبریز از مسیر جریان و شاخه‌های جریان برای تعیین زیرحوضه برای هر شاخه جریان استفاده می‌کند. در این مدل زیرحوضه‌ها با توجه به مقدار عددی آستانه ترسیم آبراهه باز در نظر گرفته شده ایجاد می‌شوند که در این حوضه عدد ۲۰۰ به عنوان آستانه باز معرفی شد که در نتیجه آن ۱۰۵ زیرحوضه برای این حوضه مشخص گردید. آستانه باز به این معنی است که به مدل دستور داده می‌شود آن آبراهه اصلی را که از این مساحت تغذیه می‌شود در نظر بگیرد و سایر آبراهه‌ها را حذف نماید. نقشه زیرحوضه در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ نقشه توزیع زیرحوضه‌های آبریز حوضه بار اریه

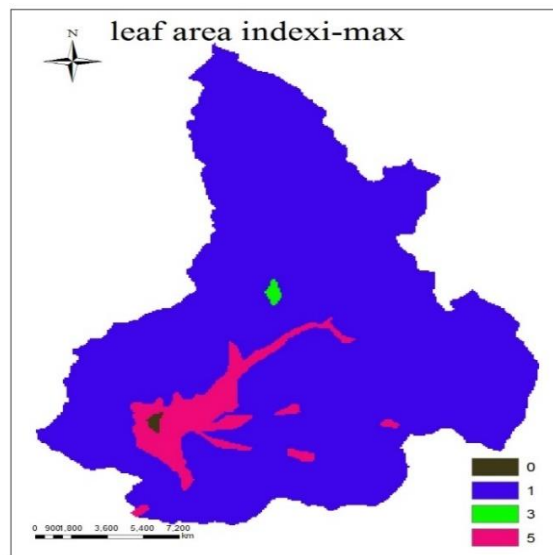
#### ۴-۲-۱-۲- نقشه‌های پارامترهای توزیعی- مکانی حوضه مستخرج از نقشه کاربری اراضی

نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز بار اریه (شکل ۳-۳) دارای مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ به‌عنوان یکی از ورودی‌های اصلی می‌باشد، با توجه به تاثیر نوع پوشش بر فرآیندهای هیدرولوژیکی، عمل تقسیم‌بندی پوشش‌ها در ۱۷ کلاس صورت می‌گیرد. در محیط ArcView با استفاده از نقشه کاربری اراضی و جداول مرجع موجود، نقشه‌هایی همچون عمق ریشه (شکل ۴-۴)، درصد پوشش، ظرفیت ذخیره برگابی حداقل و حداکثر، ضریب زبری مانینگ برای جریان سطحی و کانال و شاخص سطح برگ تولید می‌شود.

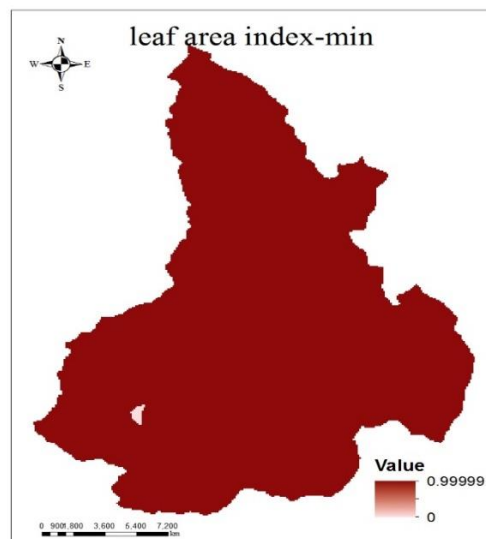


شکل ۴-۴ نقشه عمق ریشه در حوضه بار اریه

نقشه شاخص سطح برگ: شاخص سطح برگ (LAI)<sup>۱</sup>، بیان‌کننده سطح برگ (فقط یک طرف) به سطح زمین اشغال شده توسط محصول است که در شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵ نقشه حداکثر شاخص سطح برگ

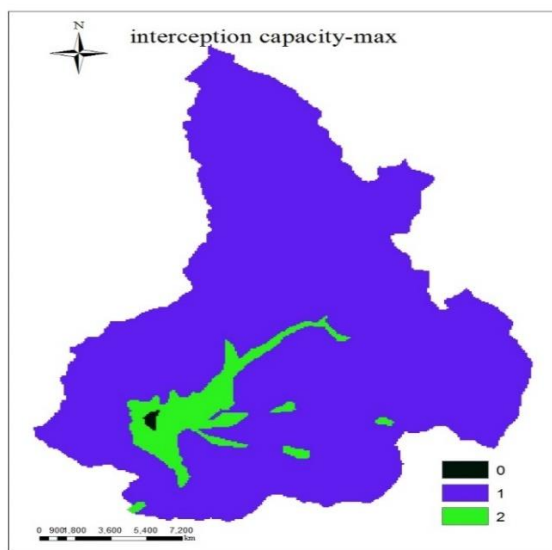


شکل ۴-۶ نقشه حداقل شاخص سطح برگ

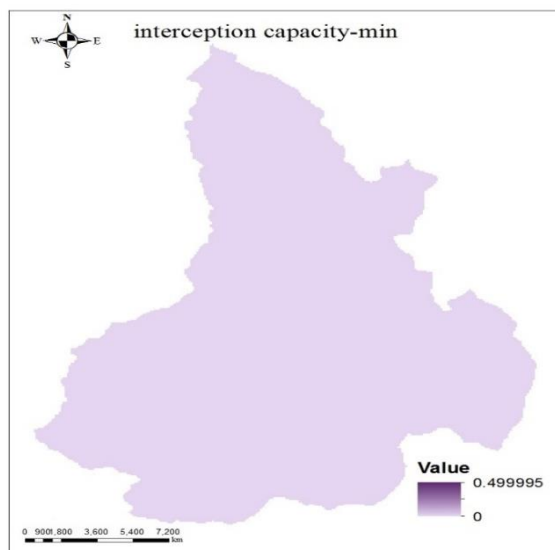
<sup>۱</sup> Leaf Area Index



نقشه حداکثر ظرفیت نفوذ بیانگر حداکثر سرعتی که خاک می‌تواند رطوبت را جذب نماید و نقشه حداقل ظرفیت نفوذ، بیانگر حداقل سرعت جذب رطوبت می‌باشد که به ترتیب در شکل‌های ۷-۴ و ۸-۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۷-۴ نقشه حداکثر ظرفیت نفوذ خاک حوضه بار اریه

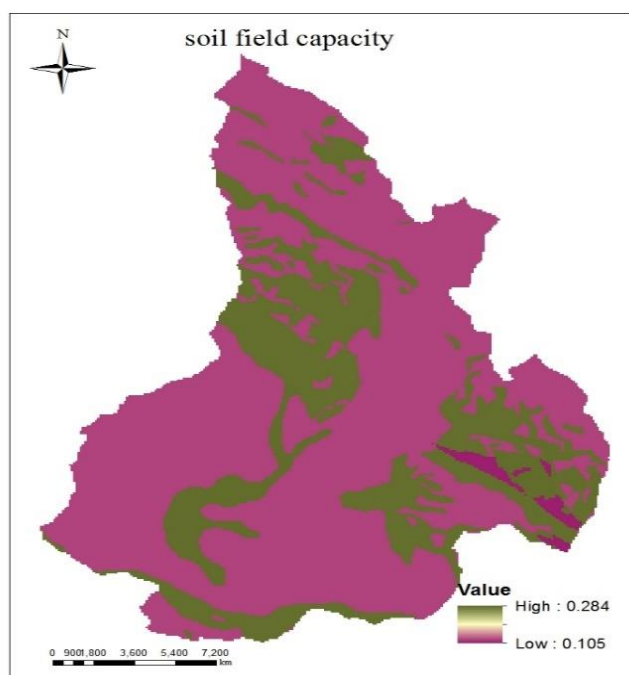


شکل ۸-۴ نقشه حداقل ظرفیت نفوذ خاک حوضه بار اریه

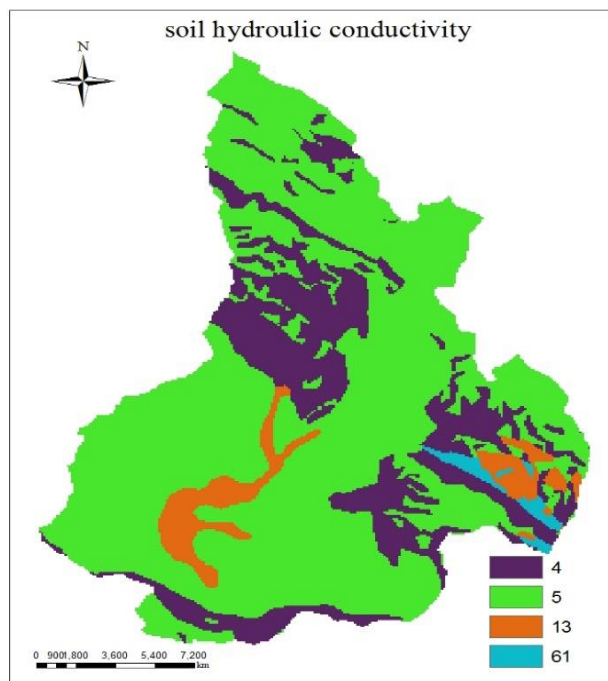
#### ۴-۲-۱-۳- نقشه‌های پارامترهای توزیعی- مکانی حوضه مستخرج از نقشه بافت خاک

نقشه واحد اراضی خاک با دقت ۱:۱۰۰۰۰۰ می‌باشد. طبقه‌بندی‌های بافت خاک در مدل بر مبنای مثلث بافت خاک آمریکا می‌باشد. این مثلث بر مبنای درصد رس، سیلت و ماسه به ۱۲ طبقه تقسیم‌بندی می‌شود. نقشه‌هایی مانند هدایت هیدرولیکی، تخلخل، ظرفیت زراعی، رطوبت باقیمانده، شاخص توزیع اندازه ذرات، نقطه پژمردگی و حداکثر میزان اشباع، نقشه‌های تولید شده از بافت خاک می‌باشند.

نقشه ظرفیت زراعی: این پارامتر بیانگر گنجایش نگهداری آب در خاک می‌باشد که در شکل ۴-۹ نشان داده شده است.



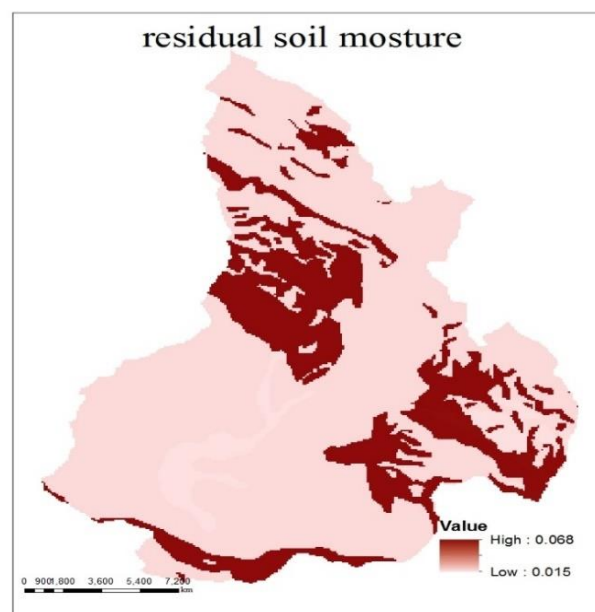
شکل ۴-۹ نقشه ظرفیت زراعی خاک حوضه بار اریه



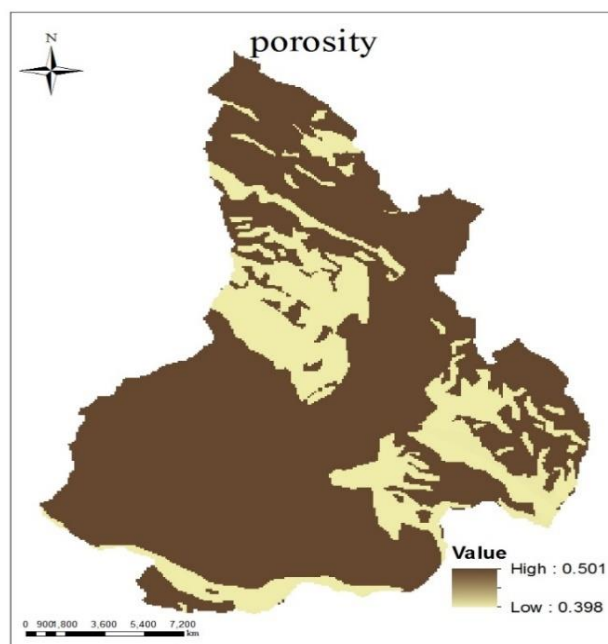
شکل ۴-۱۰ نقشه هدایت هیدرولیکی در حوضه بار اریه

پارامتر هدایت هیدرولیکی: این پارامتر در محاسبه مقدار نفوذ و جریان زیرسطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نقشه در شکل ۴-۱۰ نمایانگر است.

پارامتر رطوبت باقیمانده: نقشه رطوبتی که مدل در شرایط رطوبت باقیمانده استخراج می‌کند در تعیین نفوذ عمقی و جریان زیرسطحی نقش دارد. این نقشه در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است.



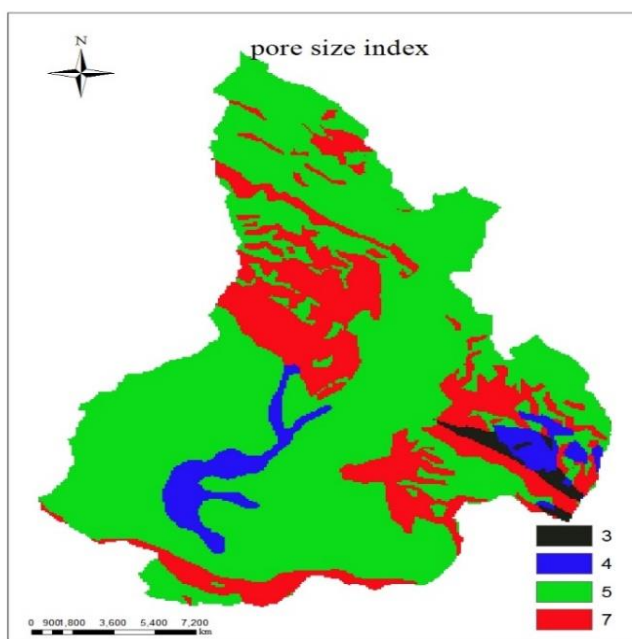
شکل ۴-۱۱ نقشه رطوبت باقیمانده خاک حوضه بار اریه



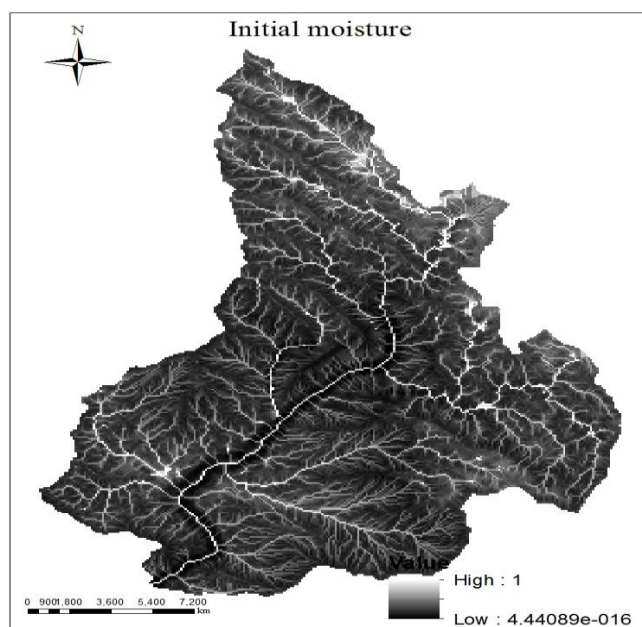
شکل ۴-۱۲ نقشه تخلخل خاک حوضه بار اریه

پارامتر تخلخل خاک: از این پارامتر برای محاسبه فرآیندهای هیدرولوژیکی از قبیل بارش مازاد، نفوذ و جریان زیرسطحی استفاده می‌شود. این نقشه در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است.

شاخص توزیع اندازه منافذ: این شاخص در محاسبه نفوذ عمقی و جریان زیرسطحی استفاده می‌شود. این نقشه در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳ نقشه توزیع منافذ خاک حوزه بار اریه

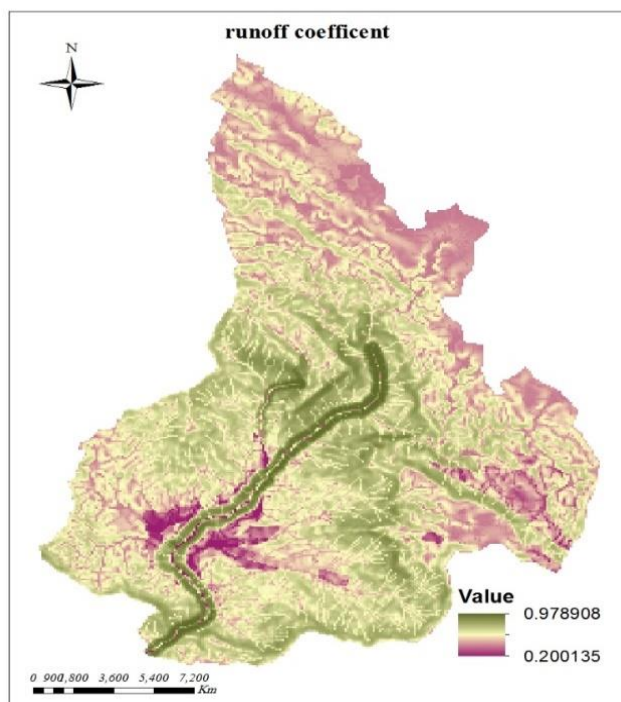


شکل ۴-۱۴ نقشه توزیع رطوبت اولیه خاک حوضه بار اریه

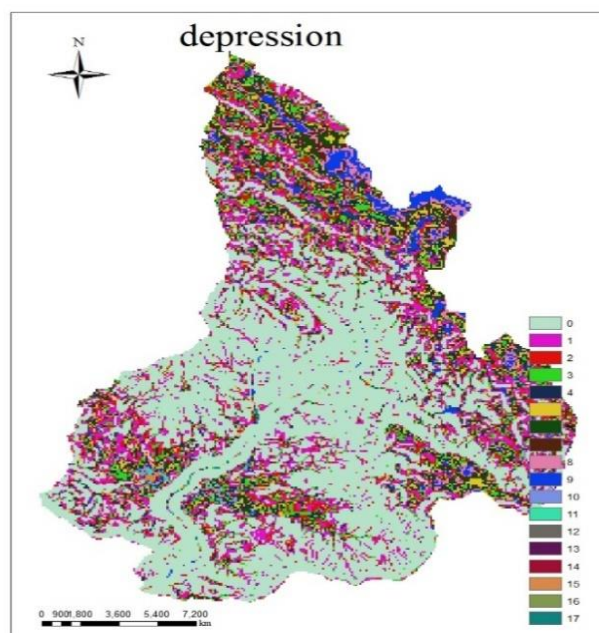
پارامتر رطوبت اولیه: این پارامتر در تعیین مقدار بارش مازاد، نفوذ، تبخیر - تعرق، نفوذ عمقی و جریان سطحی نقش دارد. این نقشه در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است.

#### ۴-۱-۲-۴- نقشه‌های توزیعی - مکانی ضریب رواناب پتانسیل و ظرفیت ذخیره چالابی

در محیط ArcView با استفاده از سه نقشه رستری اولیه و پارامترهای توزیعی ایجاد شده و جداول مرجع مربوط به ضریب رواناب پتانسیل و چالاب، دو نقشه توزیعی ضریب رواناب پتانسیل و ظرفیت ذخیره چالابی ایجاد می‌شود که به ترتیب در شکل‌های ۴-۱۵ و ۴-۱۶ نشان داده شده است.



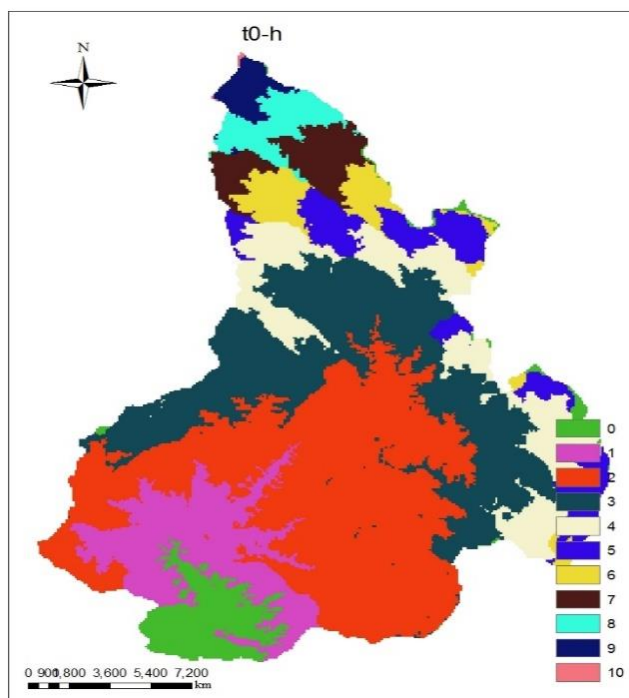
شکل ۴-۱۵ نقشه ضریب رواناب پتانسیل حوضه باراریه



شکل ۴-۱۶ نقشه ظرفیت ذخیره چالابی حوضه باراریه

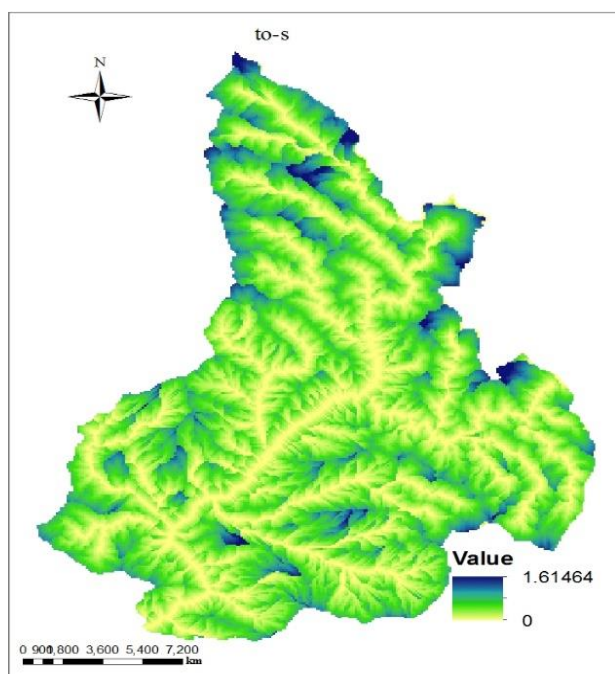
#### ۴-۲-۱-۵- نقشه توزیعی - مکانی پارامترهای روندیابی جریان

در مرحله بعد با استفاده از نقشه‌های تولید شده اقدام به ایجاد نقشه‌های متوسط زمان تمرکز جریان تا خروجی حوضه، نقشه زمان تمرکز در خروجی زیرحوضه‌ها، نقشه انحراف معیار زمان تمرکز تا خروجی حوضه و زیرحوضه-های جریان می‌شود که به ترتیب در شکل‌های ۴-۱۷، ۴-۱۸، ۴-۱۹ و ۴-۲۰ نشان داده شده‌اند.

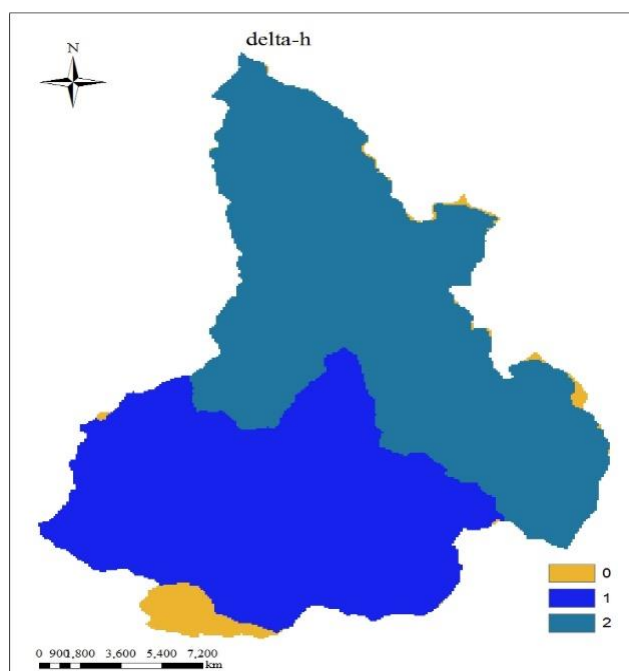


شکل ۴-۱۷ نقشه زمان تمرکز جریان

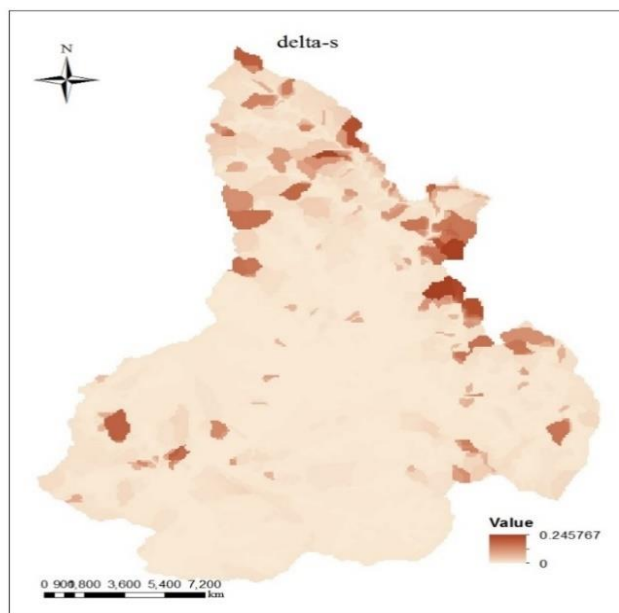




شکل ۴-۱۸ نقشه زمان تمرکز جریان در خروجی زیرحوضه‌ها



شکل ۴-۱۹ نقشه انحراف معیار زمان پیمایش جریان تا خروجی حوضه آبریز بار اریه

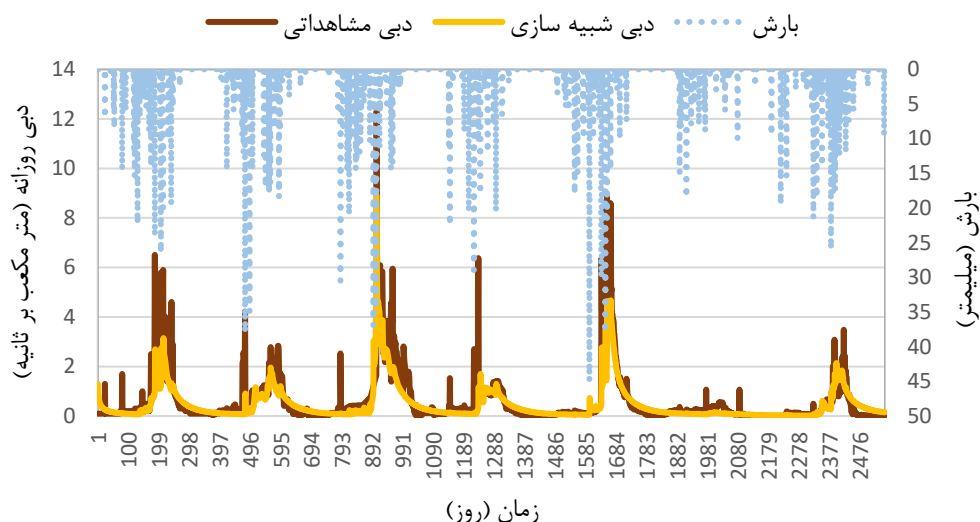


شکل ۴-۲۰ نقشه انحراف معیار زمان پیمایش جریان تا خروجی زیرحوضه‌های آبریز حوضه بار اریه

پس از تولید نقشه‌های ثانویه در ArcView اطلاعات هیدرولوژی مانند باران، تبخیر- تعرق پتانسیل، دما و دبی از شرکت منابع آب ایران و اداره هواشناسی نیشابور تهیه شده بود که شامل داده‌های روزانه ۷ ساله از سال ۱۳۹۰/۷/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱ مربوط به یک ایستگاه باران‌سنجی و یک ایستگاه سینوپتیک که در خروجی حوضه قرار دارند، که پس از وارد کردن این اطلاعات، مدل WetSpa اجرا گردید.

#### ۴-۲-۲- نتایج شبیه‌سازی هیدروگراف جریان حوضه

بین مقادیر دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مقایسه گرافیکی صورت گرفت که در برخی موارد اختلافاتی مشاهده گردید که در این تحقیق با عمل واسنجی سعی بر به حداقل رساندن میزان این اختلافات شده است.



شکل ۴-۲۱ مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده قبل از واسنجی (۱۳۹۰/۷/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱) در مدل WetSpa

در شکل ۴-۲۱، با مقایسه هیدروگراف روزانه شبیه‌سازی و مشاهداتی، مشاهده می‌شود که در ماه‌های سرد سال (ماه آذر و دی) به دلیل بارش برف، در آغاز شاخه بالارونده تغییرات چندانی در دبی جریان رودخانه مشاهده نشده است. همچنین در ماه‌های اسفند و فروردین بارش باران و ذوب برف، تولید رواناب و پرشدن رودخانه‌ها را در پی داشته است. زیرا مدل برای شبیه‌سازی فرآیند تجمع و ذوب برف از روش درجه -روز حرارت استفاده می‌کند که این روش بعضی از پارامترهای موثر بر فرآیند تجمع و ذوب برف را در نظر نمی‌گیرد به همین دلیل شبیه‌سازی رواناب خطای بیشتری را نسبت به سایر ماه‌ها دارد و همچنین این مدل در فصل‌های تابستان و پاییز نسبت به برخی رخداد‌های بارش واکنش نشان نمی‌دهد که می‌توان اشاره کرد که مدل، مقدار بارش صورت پذیرفته در سطح حوضه آبریز را شبیه‌سازی نموده ولی به دلیل تلفات مقدار رواناب را صفر برآورد کرده است.

برای سهولت واسنجی مدل WetSpa، ۱۱ پارامتر کلی در نظر گرفته شده است که در جدول ۴-۱ آمده است. این پارامترها دارای ماهیت فیزیکی بوده و در کنترل رواناب و خروجی حوضه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند.

برای دخالت اثر این پارامترها در شبیه‌سازی، سعی شده است با انتخاب مقادیری متناسب با شرایط فیزیوگرافی هیدرولوژی حوضه، واسنجی و اعتبارسنجی مدل صورت گیرد.

جدول ۴-۱ مقادیر پارامترهای عمومی مدل WetSpa

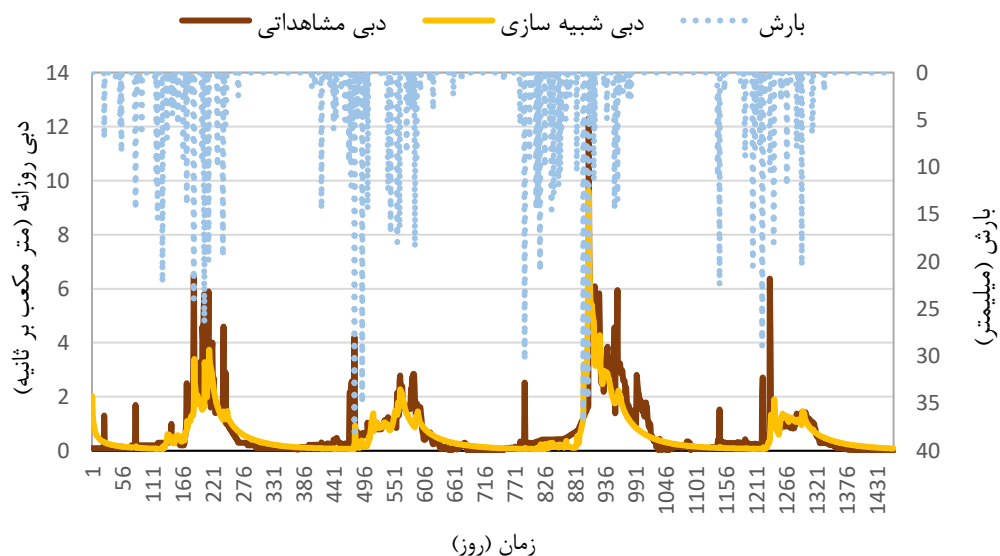
علامت	پارامتر	مقدار پارامتر بعد از واسنجی	حداقل	حداکثر
$K_i$	فاکتور بی بعد جریان زیرسطحی (-)	۰/۳۵۰۱	۰/۱۲۷	۰/۹۸۲۷
$K_g$	ضریب افت آب زیرزمینی ( $T^{-1}$ )	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵۲۹
$K_{ss}$	رطوبت اولیه خاک (L)	۰/۹۹۰۱	۰/۱۲۷۳	۱/۹۷۴۱
$K_{ep}$	فاکتور تصحیح تبخیر- تفرق پتانسیل (L)	۰/۲۲۰۶	۰/۱۱۳	۲/۴۷
$G_0$	ذخیره اولیه آب زیرزمینی (L)	۴۲/۳	۹/۳۱۷۵	۷۵/۳۱
$G_{max}$	حداکثر ذخیره آب زیرزمینی (L)	۸۷۵	۸۰/۵۲	۹۷۸
$T_0$	ضریب درجه حرارت آستانه ( $C^{\circ}$ )	۰/۹۶	۰/۰۴	۱/۰۱۲
$K_{snow}$	ضریب روز درجه حرارت ( $L.C^{\circ}.T^{-1}$ )	۱/۶۰۳	۰/۴	۱/۸۷
$K_{rain}$	ضریب روز درجه بارش ( $C^{\circ}.T^{-1}$ )	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۸۹
$K_{run}$	توان رواناب سطحی (-)	۴/۷۶۷۳	۲/۶۷	۱۰/۹۷۸
$P_{max}$	حداکثر شدت بارش ( $L.T^{-1}$ )	۱۶۷/۳	۱۲۴/۵	۱۷۷

در این تحقیق برای شبیه‌سازی دبی جریان، دوره آماری چهار ساله ۱۳۹۰/۷/۱ تا ۱۳۹۴/۶/۳۱ برای واسنجی انتخاب شد. در شروع عملیات بهینه‌سازی لازم است برای ۱۱ پارامتر به کار رفته در مدل مقدار اولیه اتخاذ شود. عملیات واسنجی با حصول بهترین تطبیق بین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای به اتمام می‌رسد. برای

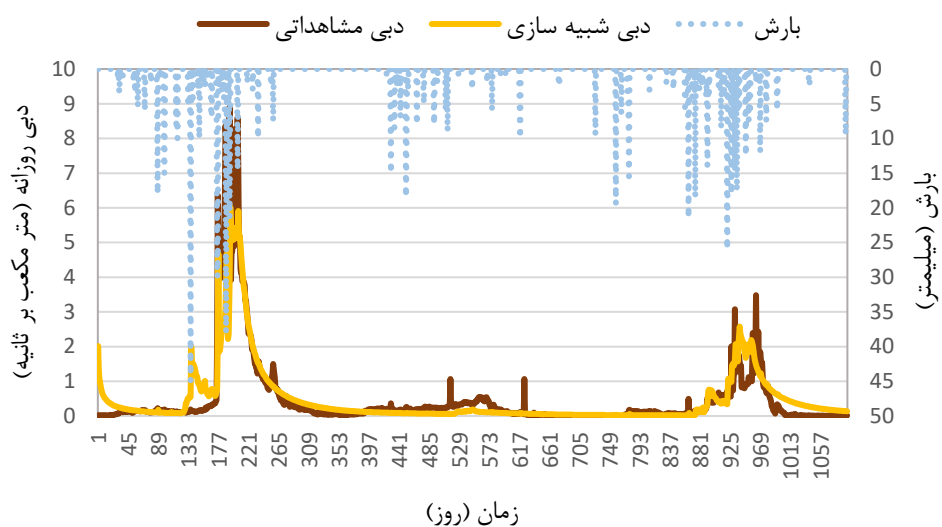
آزمون مناسب بودن پارامترهای واسنجی شده مدل در دوره مورد نظر در مرحله واسنجی و آزمون کارایی مدل در دوره‌های آماری دیگر، آزمون اعتبارسنجی مدل صورت گرفت. برای این مرحله دوره ۳ سال آبی آماری ۱۳۹۴/۷/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱ مورد استفاده قرار گرفت.

#### ۴-۲-۳- نتایج مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی دوره واسنجی و اعتبارسنجی

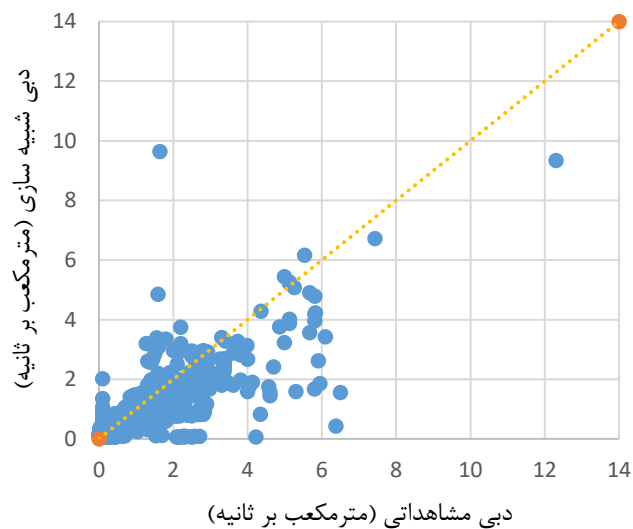
به‌منظور ارزیابی کارایی مدل WetSpa، نتایج هیدروگراف دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴-۲۲ و ۴-۲۳ نشان‌دهنده وضعیت عملکرد مدل WetSpa در دوره واسنجی و اعتبارسنجی، شکل ۴-۲۴ و ۴-۲۵ نمودار نقطه‌ای برآورد رواناب جهت ترسیم بهترین برازش در دوره واسنجی و اعتبارسنجی در حوضه آبریز بار اریه را نشان می‌دهد. همچنین در این تحقیق میزان کارایی مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان، براساس چند معیار مورد ارزیابی قرار گرفته است. که نتایج آن در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی در جدول ۴-۲ ارائه شده است.



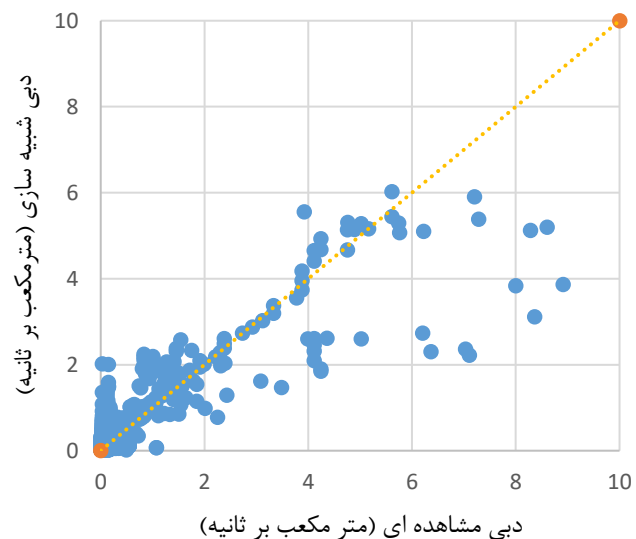
شکل ۴-۲۲ مقایسه هیدروگراف روزانه شبیه‌سازی و مشاهداتی در دوره واسنجی (۱۳۹۰/۷/۱ تا ۱۳۹۴/۶/۳۱) مدل WetSpa



شکل ۴-۲۳ مقایسه هیدروگراف روزانه شبیه‌سازی و مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی (۱۳۹۴/۷/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱) مدل WetSpa



شکل ۴-۲۴ نمودار نقطه‌ای برآورد رواناب در دوره واسنجی



شکل ۴-۲۵ نمودار نقطه‌ای برآورد رواناب در دوره اعتبارسنجی

#### ۴-۲-۴- نتایج حاصل از معیارهای کارایی مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی

نتایج حاصل از کارایی مدل WetSpa در جدول ۴-۲ ارائه گردیده است.

جدول ۴-۲ مقادیر معیارهای کارایی مدل در دو مرحله واسنجی (۱۳۹۰/۷/۱ تا ۱۳۹۴/۶/۳۱) و اعتبارسنجی (۱۳۹۴/۷/۱ تا

(۱۳۹۷/۶/۳۱)

معیار ارزیابی	دوره واسنجی (درصد)	دوره اعتبارسنجی (درصد)
اریبی مدل	۱۰/۶-	۱/۷
نمایه ناش- ساتکلیف	۶۵/۸	۷۶
نمایه ناش- ساتکلیف جریان‌های کم	۵۹/۶	۵۷/۱
نمایه ناش- ساتکلیف جریان‌های زیاد	۷۱/۳	۷۷/۸
ضریب همبستگی اصلاح شده	۶۵/۴	۷۰/۶
معیار جمعی	۵۴/۸	۴۶/۸

با توجه به معیارهای ارزیابی مدل (جدول ۴-۲) و براساس طبقه‌بندی جدول ۳-۱، مدل قادر به شبیه‌سازی خوب الگوی تغییرات رواناب حوضه بار اریه با معیار ناش-ساتکلیف برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۶۵/۸ و ۷۶ درصد بوده است. در این مدل در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی میزان کارایی شبیه‌سازی جریان‌های زیاد به ترتیب ۷۱/۳ و ۷۷/۸ درصد و برای جریان‌های کم ۵۹/۶ و ۵۷/۱ درصد محاسبه گردید، که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل می‌باشد. با توجه به این نتایج مشخص شد که این مدل در این حوضه برای دبی‌های سیلابی نتایج مطلوب‌تری نسبت به دبی‌های کمینه برآورد می‌نماید که می‌توان علت عملکرد نامطلوب مدل در مورد جریان‌های کمینه را در ساده‌سازی تشریح جریان آب‌زیرزمینی دانست. با توجه به معیار ناش-ساتکلیف در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، نتیجه به‌دست آمده با نتایج تحقیقاتی که از این مدل استفاده کرده‌اند از جمله، پوریتا برن‌دیک (۲۰۱۰) ۰/۶۹ و ۰/۶۶، عزیزی (۲۰۱۸) ۰/۶۲ و ۰/۷۴ و (دهم‌رده، ۲۰۱۸) ۰/۵۷ و ۰/۸۴، در خارج از کشور و در ایران با نتایج تحقیقاتی همچون الماسی (۱۳۹۵) ۰/۶۳ و ۰/۶۵، (دهقانی ۱۳۹۶) ۰/۶۵ و ۰/۶۳ و پژوهش (۱۳۹۷) ۰/۵۷ و ۰/۶۱ مطابقت داشته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان به این جمع‌بندی رسید که مدل هیدرولوژیکی توزیعی بارش-رواناب WetSpa، توانایی خوبی در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در حوضه آبریز مطالعاتی داشته است و همچنین این مدل از نظر مساحت و گام زمانی اطلاعات مورد استفاده، محدودیتی ندارد. بنابراین مدل WetSpa جهت شبیه‌سازی جریان و پیش‌بینی سیل در این حوضه مناسب می‌باشد و همچنین می‌توان از نتایج این تحقیق جهت مطالعات رواناب و شناخت از شرایط حوضه برای ساخت سازه‌ها و بندها در مدیریت منابع آب استفاده نمود.



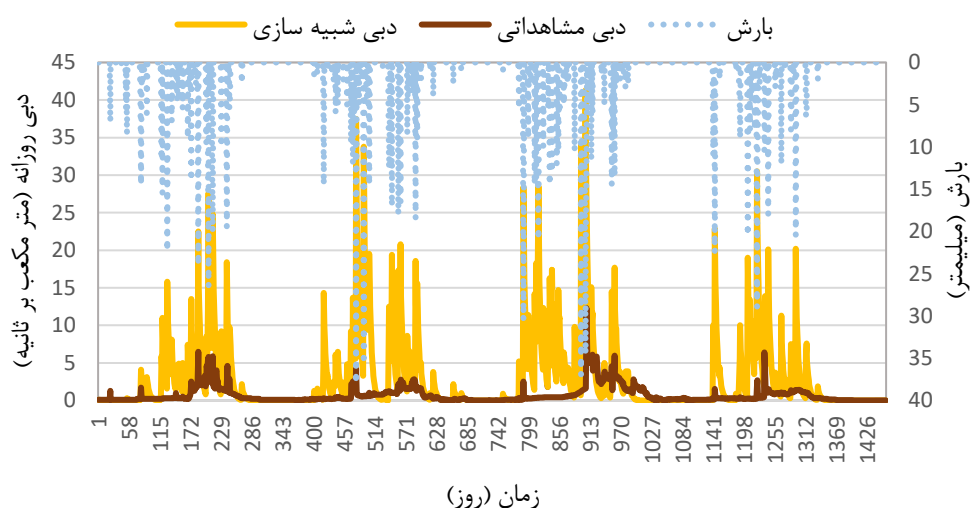
#### ۴-۳- نتایج حاصل از مدل HEC-HMS

در این تحقیق فرآیند بارش-رواناب در حوضه آبریز بار اریه با استفاده از مدل یکپارچه HEC-HMS شبیه‌سازی شد. این مدل دارای سه بخش اصلی شامل: مدل حوضه، مدل هواشناسی و مدل کنترل زمانی می‌باشد. گام اول برای اجرای این مدل ابتدا یک حوضه به‌صورت یکپارچه به مدل معرفی گردید و پارامترهای مورد نیاز اجرای مدل حوضه شامل روش تلفات، روش انتقال و روندیابی جریان می‌باشند. در این مدل روش‌های متعددی برای محاسبه تلفات و روش انتقال وجود دارد که هر کدام شامل تعدادی پارامتر می‌باشند و در مدل اعمال گردید. برای محاسبه تلفات و روش انتقال به‌ترتیب از روش شماره‌منحنی SCS و هیدروگراف واحد SCS استفاده گردید و سپس پارامترهای مورد نیاز این روش‌ها شامل پارامترهای نگهداشت اولیه، زمان تاخیر، نفوذناپذیری و شماره‌منحنی که به‌ترتیب برابر ۱۶/۹۳، ۷۲ دقیقه، ۰/۱۵ و ۷۵ محاسبه و در مدل اعمال گردید. در گام بعدی مدل هواشناسی به‌منظور تعریف زمانی و مکانی بارش اعمال گردید. در این قسمت نیز روش‌های متعددی در مدل HEC-HMS وجود دارد که در این تحقیق روش هیدروگراف مشخص شده مورد استفاده قرار گرفت. سپس مدل کنترل زمانی برای وارد کردن گام زمانی و زمان شروع و پایان برای شبیه‌سازی اعمال می‌گردد و در گام آخر داده‌های روزانه ۷ ساله بارش از سال ۱۳۹۰/۷/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱ مربوط به یک ایستگاه باران‌سنجی و یک ایستگاه سینوپتیک واقع در خروجی حوضه در جدول مدل وارد گردید که پس از وارد کردن این اطلاعات مدل اجرا گردید.

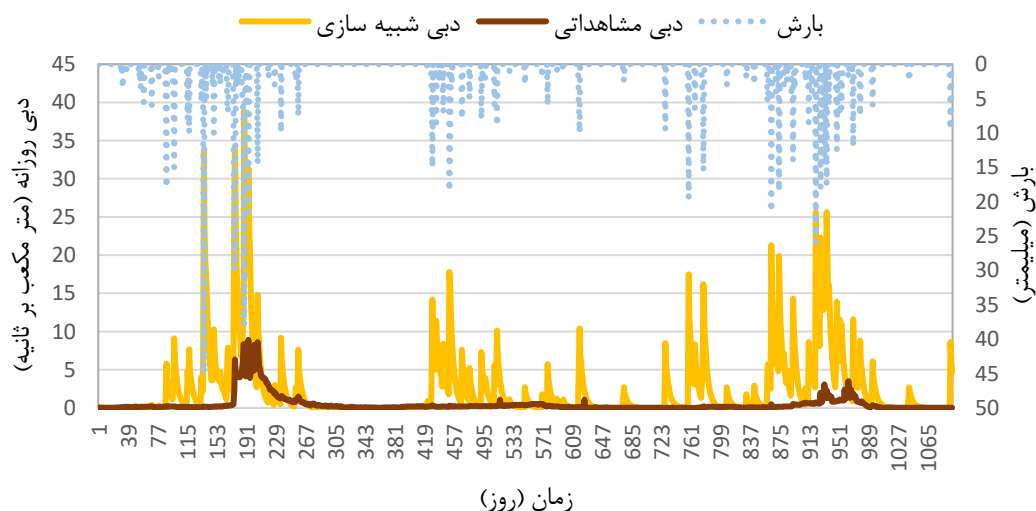
#### ۴-۳-۱- نتایج مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی دوره واسنجی و اعتبارسنجی

به‌منظور دقت بیشتر مدل در برآورد رواناب پارامتر شماره‌منحنی در حوضه مورد مطالعه برای دوره آماری ۱۳۹۰/۷/۱ تا ۱۳۹۴/۶/۳۱ مورد واسنجی قرار گرفت و سپس از دوره آماری ۱۳۹۴/۷/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱ برای اعتبارسنجی استفاده شد، سپس مقایسه گرافیکی بین هیدروگراف‌ها صورت گرفت که در شکل‌های ۴-۲۶ و ۴-۴

۲۷ نشان داده شده‌اند. با توجه به این هیدروگراف‌ها مشهود است اختلاف زیادی بین دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی وجود دارد که حاکی از عدم توانایی مدل در برآورد رواناب می‌باشد.



شکل ۴-۲۶ مقایسه هیدروگراف روزانه شبیه‌سازی و مشاهداتی در دوره واسنجی (۱۳۹۰/۷/۱ تا ۱۳۹۴/۶/۳۱) مدل HEC-HMS



شکل ۴-۲۷ مقایسه هیدروگراف روزانه شبیه‌سازی و مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی (۱۳۹۴/۷/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱) مدل HEC-HMS

#### ۴-۳-۲- نتایج کارایی مدل HEC-HMS

در این تحقیق برای ارزیابی عملکرد مدل HEC-HMS از شاخص‌هایی مانند ضریب همبستگی (R)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدرمطلق خطا (MAE) استفاده شد، که روابط آن‌ها به ترتیب در فرمول‌های ۳-۱۹، ۳-۱۸ و ۳-۱۷ بیان شده است.

جدول ۴-۳ مقادیر معیارهای کارایی مدل HEC\_HMS

مراحل اجرا	R	$(\frac{m^3}{s})MAE$	$(\frac{m^3}{s})RMSE$
واسنجی	۰/۴۵۷	۲/۵۳	۵/۲
اعتبارسنجی	۰/۵۱۶	۲/۱۸۷	۴/۶۱۶

با توجه به جدول ۴-۳ معیارهای کارایی با استفاده از مدل HEC-HMS در حوضه آبریز بار اریه به ترتیب برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی با ضریب همبستگی کم ۰/۴۵۷ و ۰/۵۱۶، میانگین خطای مطلق بالا ۲/۵۳ و ۲/۱۸۷ و ریشه میانگین مربعات خطای ۵/۲ و ۴/۶۱۶ گویای این مطلب می‌باشد که مدل عملکرد خوبی در برآورد رواناب در این منطقه را نداشته است.

اساس کار HEC-HMS که در راهنمای استفاده از مدل ارائه شده است استفاده از پارامترهای نیمه توزیعی می‌باشد. در این راهنما برای مدل حوضه از حوضه آبریزی که شامل چند زیر حوضه می‌باشد استفاده شده است (مرکز مهندسی هیدرولوژیکی آمریکا، ۲۰۱۳). در تحقیقات انجام شده از جمله، امیدوار (۱۳۹۱) با ضریب تبیین ۰/۸۲، اولیبلو (۲۰۱۰) با ضریب ناش- ساتکلیف بالای ۰/۷۴ و گامیندوگا (۲۰۱۶) با ضریب ناش- ساتکلیف ۰/۶۱ و ۰/۶۸ به ترتیب در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی از مدل نیمه توزیعی استفاده شده است که با توجه به نتایج آن‌ها این مدل از دقت بالایی برخوردار بوده است. گراو و همکاران (۱۹۹۸) به این نتیجه رسیدند که رواناب محاسبه

شده بر اساس CN نیمه توزیعی دقت بیشتری نسبت به مواردی که CN یکپارچه مورد استفاده قرار گرفته بود دقت بالاتری داشته است. در تحقیق انجام شده توسط بهیان مطلق (۱۳۹۷) که از مدل یکپارچه برای برآورد رواناب استفاده کرده بودند با معیار ناش- ساتکلیف ۰/۳۱ در مرحله واسنجی از نتایج خوبی برخوردار نبوده است و همچنین مرادی (۱۳۹۷)، در تحقیقی به این نتیجه رسیدند که عملکرد بروآرد رواناب با کاهش تعداد ایستگاه باران سنجی، کاهش می‌یابد. در نتیجه عملکرد مدل HEC-HMS به تعداد ایستگاه‌های ورودی وابسته می‌باشد، به‌طوری که در اکثر تحقیقات انجام شده با تعداد ایستگاه‌های باران سنجی بیشتر، عملکرد این مدل رضایت‌بخش بوده است.

#### ۴-۴- نتایج حاصل از روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

در این تحقیق از برنامه GeneXproTools ([www.gepsoft.com](http://www.gepsoft.com)) به منظور مدل‌سازی بارش-رواناب حوضه بار اریه در مقیاس زمانی روزانه به کار گرفته شد. یکی از مزیت‌های این روش توانایی تغییر و تنظیم برنامه برای حالت‌های مختلف، یا توسعه کدها به صورت دلخواه می‌باشد. همچنین این نرم‌افزار قابلیت به کارگیری هرگونه تابع، عبارت و پارامتر را در سیستم و فرآیند حل دارد. فرآیند اجرای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن عبارت از:

گام اول: انتخاب تابع برازش مناسب که در این مطالعه، ضریب تبیین به عنوان تابع برازش انتخاب گردید. گام دوم: انتخاب مجموعه متغیرهای ورودی و مجموعه توابع به منظور تولید کروموزوم‌ها، که این متغیرهای ورودی در گام زمانی روزانه در ترکیب‌های مختلف استفاده شده که در جدول ۴-۴ ارائه گردیده است. در این ترکیب‌ها مؤلفه‌های  $R$ ،  $T$ ،  $ET$ ،  $Q_0$ ،  $Q_{0-1}$  و  $R-1$  به ترتیب معرف بارش، دما، تبخیر-تعرق، دبی مشاهداتی، دبی مشاهداتی با گام زمانی یک روز قبل و بارش با گام زمانی یک روز قبل می‌باشند. همچنین در این مطالعه برای مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب از متغیرهای معنی‌دار، دو مجموعه از عملگرهای ریاضی که مجموعه یک، شامل چهار عمل اصلی و مجموعه دو، عملگرهای پیش فرض نرم‌افزار می‌باشند مورد استفاده قرار گرفت که در جدول ۴-۵ نشان داده شده است.

جدول ۴-۴ ترکیب پارامترهای ورودی مدل برنامه‌ریزی بیان ژن

ترکیب	پارامتر ورودی
۱	R, ET, T, $Q_0$
۲	R, $Q_{0-1}$ , $Q_0$
۳	R, T, $Q_{0-1}$ , $Q_0$
۴	R, ET, $Q_{0-1}$ , $Q_0$
۵	R, ET, T, $Q_{0-1}$ , $Q_0$
۶	R, R-1, ET, T, $Q_{0-1}$ , $Q_0$

جدول ۵-۴ عملگرهای ریاضی مورد استفاده در برنامه‌ریزی بیان ژن

مجموعه	عملگرهای ریاضی
۱	+, -, *, /
۲	+, -, *, /, ^۳, ^۲, √, ∛, Exp, cos, sin, Ln, Atan

گام سوم: انتخاب ساختار و معماری کروموزوم‌ها می‌باشد. اندازه طول هر رأس ۸ و تعداد ژن‌ها ۳ عدد انتخاب شد. گام چهارم: انتخاب تابع پیوندی است که در این مطالعه عمل جمع برای ایجاد پیوند بین زیرشاخه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. گام پنجم: عملگرهای ژنتیک و انتخاب نرخ هر یک از آن‌ها. در جدول ۴-۶، پارامترهای مورد استفاده و مقادیر آن‌ها در برآورد رواناب ایستگاه بار اریه با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن نشان داده شده است. این پارامترها به کمک سعی و خطا تعیین می‌گردند.

جدول ۴-۶ مقادیر پارامترهای برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در پیش‌بینی رواناب

پارامتر	مقدار
اندازه سر (Head Size)	۸
تعداد کروموزوم‌ها (Number of Chromosomes)	۳۰
تعداد ژن‌ها در هر کروموزوم (Number of Genes)	۳
نرخ جهش (Mutation Rate)	۰/۰۴۴
نرخ وارون‌سازی (Inversion Rate)	۰/۱
نرخ ترکیب تک‌نقطه‌ای (One-Point Recombination Rate)	۰/۳
نرخ ترکیب دو نقطه‌ای (Two-Points Recombination Rate)	۰/۳
نرخ ترکیب ژن (Gene Recombination Rate)	۰/۱
نرخ ترانهش (IS Transposition Rate)	۰/۱
نرخ ترانهش ریشه درج متوالی (RIS Transposition Rate)	۰/۱
نرخ ترانهش ژنی (Gene Transposition Rate)	۰/۱
معیار خطای تابع برازش (Fitness Function Error Type)	$R^2$
تابع پیوند (Linking Function)	جمع (+)

در این تحقیق سعی شده است که با استفاده از پارامترهای مذکور فرمولی جهت شبیه‌سازی رودخانه ارائه گردد که در هر گام زمانی، هیدروگراف مشاهداتی بیشترین انطباق را با هیدروگراف شبیه‌سازی داشته باشد. با مقایسه توابع برازش، ضرایب همبستگی و خطای محاسبه شده برای هر ترکیب، مدل مطلوب برگزیده شد. پس از انتخاب بهترین ترکیب، نمودارهای مربوط به مراحل آموزش و آزمون، جدول مقادیر ثابت، ساختار ORF ژن‌ها و نیز بیان درختی الگوی مذکور ارائه گردید.

برای معرفی الگوها و شناسایی مناسب‌ترین الگوی حاکم بر ماهیت جریان، از توابع برازش و انجام فرآیندهای توسعه‌ای و تکرار به‌منظور یافتن تعداد تکرار بهینه استفاده گردید. برای این منظور ابتدا داده‌های دوره آماری به دو دسته آموزش و آزمون تقسیم گردید. سپس برنامه برای ۱۰۰۰ تکرار اجرا و مشاهده گردید که پس از ۵۸۰ تکرار، مقدار ضریب همبستگی تقریباً ثابت شده و شیب تغییرات صفر گردید. این تعداد تکرار همان تعداد بهینه برای تکرارهای مدل شبیه‌ساز می‌باشد.

#### ۴-۴-۱- نتایج نمایه کارایی مدل برای دوره آموزش و آزمون

برای ارزیابی روابط حاصله از برنامه‌ریزی بیان ژن، از شاخص‌های ضریب همبستگی ( $R$ )، میانگین خطای مطلق ( $MAE$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) استفاده شده است که به‌ترتیب از روابط ۳-۱۹، ۳-۱۷ و ۳-۱۸ قابل محاسبه‌اند. نتایج کارایی مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در جدول ۴-۷ ارائه شده است.

جدول ۴-۷ پارامترهای آماری دقت مدل‌های حاصله از برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

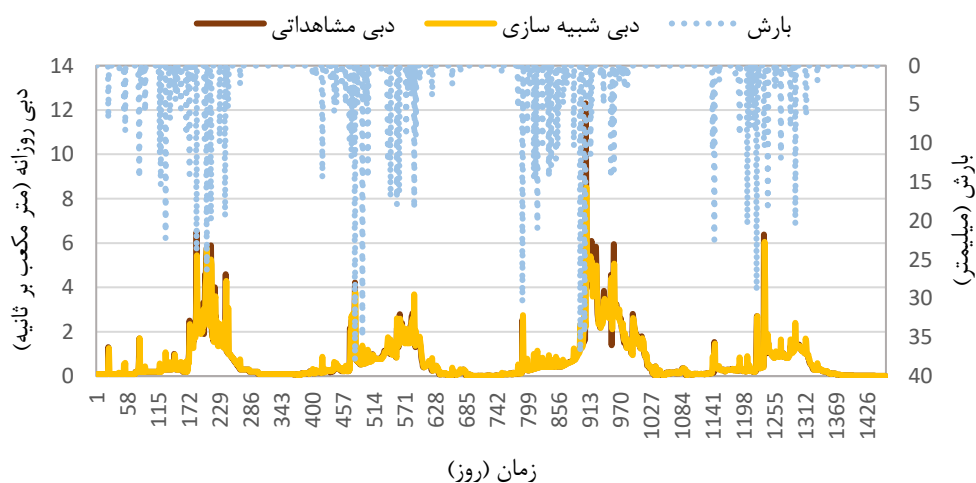
الگو	مراحل اجرا	مقدار تابع برازش	R	$(\frac{m^3}{s})$ MAE	$(\frac{m^3}{s})$ RMSE
۱	آموزش	۵۲۷/۷	۰/۴۴۶	۰/۵۸	۰/۹۶۴
	آزمون	۵۰۷/۶۵	۰/۳۳	۰/۶۸	۱/۰۷۶
۲	آموزش	۶۹۴/۳۶	۰/۹	۰/۱۹۱	۰/۴۷۴
	آزمون	۷۲۴/۸۲	۰/۹۲	۰/۱۷۸	۰/۴۱۶
۳	آموزش	۶۸۸/۵۷	۰/۸۹۴	۰/۱۶۶	۰/۴۸۷
	آزمون	۷۵۹/۵۴	۰/۹۴۹	۰/۱۲۳	۰/۳۴۷
۴	آموزش	۶۹۲/۰۱	۰/۸۹۵	۰/۱۹۳	۰/۴۷۹
	آزمون	۷۲۱/۰۳	۰/۹۳۲	۰/۱۹	۰/۴۲۴
۵	آموزش	۷۰۲/۴۳	۰/۹۰۶	۰/۱۳۵	۰/۴۵۶
	آزمون	۷۷۰/۷۷	۰/۹۵۶	۰/۱۰۳	۰/۳۲۶
۶	آموزش	۶۷۴/۵	۰/۸۸۳	۰/۱۲۷	۰/۵۲
	آزمون	۷۵۸/۵۹	۰/۹۴۲	۰/۰۸	۰/۳۴۹

نتایج نشان‌دهنده برتری الگوی ۵ با ورودی‌های  $Q_0$ ,  $Q_{0-1}$ ,  $T$ ,  $ET$ ,  $R$  که دارای بیشترین ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۰۶ و ۰/۹۵۶، بیشترین تابع برازش ۷۰۲/۴۳ و ۷۷۰/۷۷ و کمترین میزان میانگین قدر مطلق خطا ۰/۱۳۵ و ۰/۱۰۳ به ترتیب برای مرحله آموزش و آزمون می‌باشد. نتایج این ترکیب نشان داد که الگوی مذکور با دقت بیشتر و خطای کمتری میزان رواناب ایستگاه بار اریه را ارزیابی کرده است.

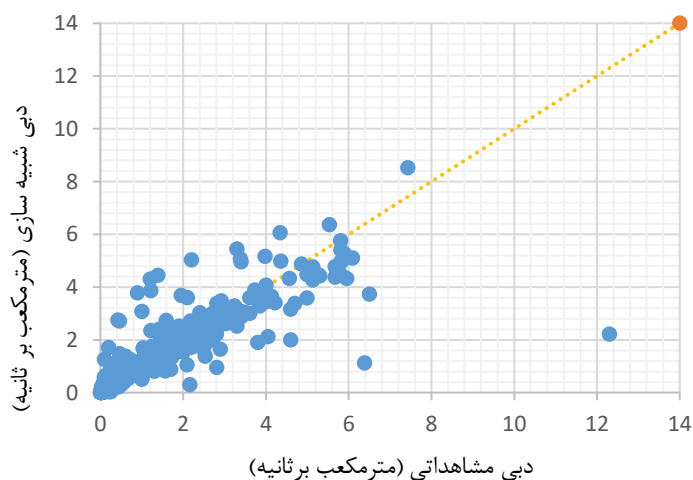


#### ۴-۴-۲- نتایج گرافیکی مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در مرحله آموزش

در این تحقیق از داده‌های روزانه آب‌سنجی و هواشناسی مربوط به دوره آماری ۱۳۹۰/۷/۱ تا ۱۳۹۴/۶/۳۱ جهت آموزش مدل برنامه‌ریزی بیان ژن استفاده گردید که هیدروگراف و نمودار نقطه‌ای مربوط به این مرحله در شکل‌های ۴-۲۸ و ۴-۲۹ نمایان است.



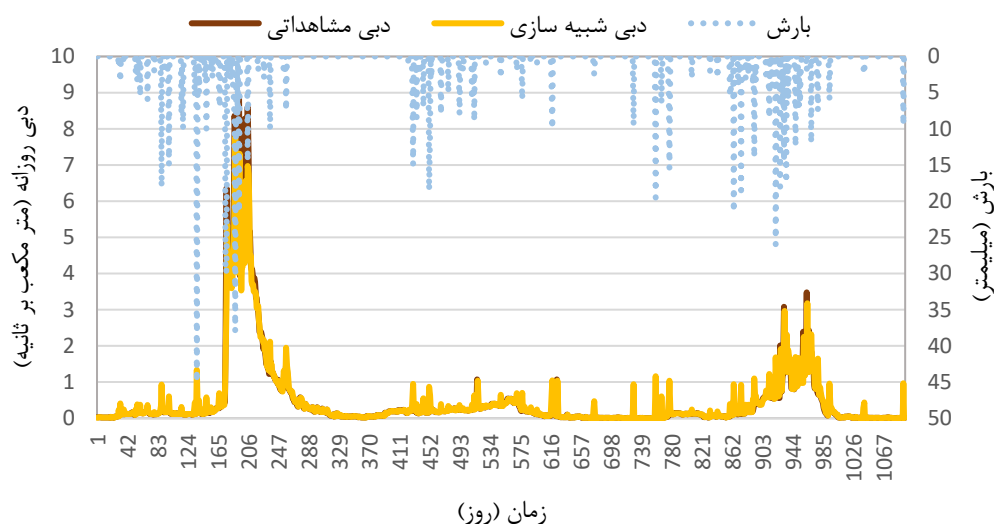
شکل ۴-۲۸ مقایسه هیدروگراف دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در مرحله آموزش (۱۳۹۰/۷/۱ تا ۱۳۹۴/۶/۳۱)



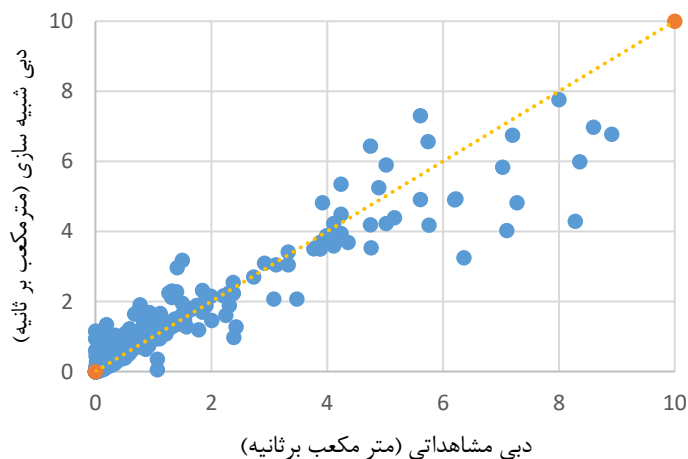
شکل ۴-۲۹ نمودار نقطه‌ای ترکیب پنجم روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در مرحله آموزش

#### ۴-۳-۳- نتایج گرافیکی برنامه‌ریزی بیان ژن در مرحله آزمون

مرحله آزمون این مدل با دوره آماری ۱۳۹۴/۷/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱ اجرا گردید که شکل‌های ۴-۳۰ و ۴-۳۱ زیر نمایانگر نتایج این مرحله می‌باشند.



شکل ۴-۳۰ مقایسه هیدروگراف دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در مرحله آزمون (۱۳۹۴/۷/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱)

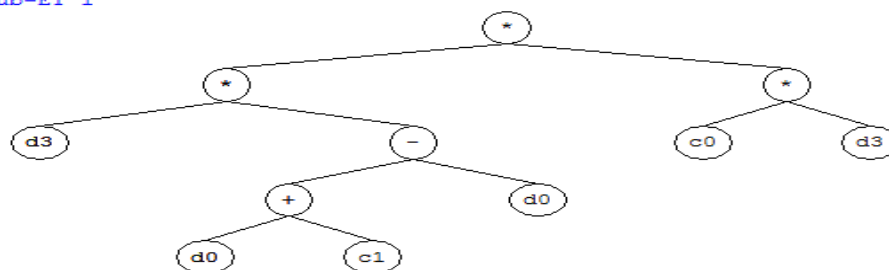


شکل ۴-۳۱ نمودار نقطه‌ای ترکیب ۵ به روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در مرحله آزمون

#### ۴-۴-۴- ساختار درختی مدل

شکل ۴-۳۲، ساختار مدل خروجی را به صورت درختی نشان می‌دهد و معادله‌ای از این ساختار حاصل شده است. از آنجایی که سه ژن در اینجا تشکیل شده، هر یک از ژن‌ها یک زیر درخت و معادله مربوط به خود را دارد که در نهایت با توجه به تابع پیوند معادله نهایی حاصل می‌شود.

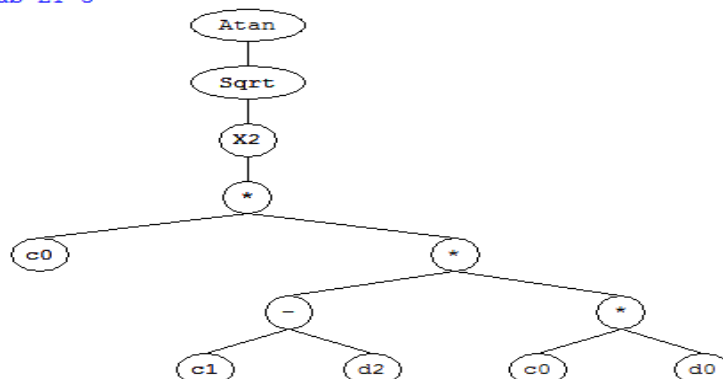
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



شکل ۴-۳۲ بیان درختی ژن‌های ۱، ۲، ۳ توسط مدل GEP در پیش‌بینی رواناب

جدول ۴-۸ مقادیر ثابت در بیان درختی مدل GEP برای پیش‌بینی میزان رواناب

G3C1	G3C0	G2C1	G2C0	G1C1	G1C0
-۵/۴۷۰۱۸۴	-۰/۰۷۴۵۲۴	-۶/۱۶۱۰۷۱	-۱/۷۸۴۷۲۹	۰/۳۳۵۵۱	-۰/۰۷۴۵۲۴

در ادامه ساختار ORF ژن‌های مدل برتر به زبان کاروا، نشان داده شده است. در این ساختار، d0، d1، d2 و d3 به ترتیب عبارت از بارندگی، تبخیر- تعرق، دما و دبی جریان با یک گام تاخیر زمانی می‌باشد.

$$\begin{aligned}
 & * . * . * . d^3 . - . c^0 . d^3 . + . d^0 . d^0 . c^1 . c^1 . d^0 . d^1 . c^1 . c^0 . c^0 \\
 & + \\
 & d^3 . - . - . d^3 . + . d^0 . Ln . c^0 . d^2 . c^0 . d^1 . d^0 . c^1 . d^1 . d^3 . c^0 \\
 & + \\
 & Atan . Sqrt . X^2 . * . c^0 . * . - . * . c^1 . d^2 . c^0 . d^0 . d^1 . c^0 . d^0 . d^3 . d^2
 \end{aligned}$$

با توجه به نمودار درختی شکل ۴-۳۲، رابطه ریاضی GEP به زبان  $C^{++}$  برای پیش‌بینی رواناب در رابطه ۴-۱ ارائه گردیده است. در این رابطه منظور از  $Q_s$ ، دبی شبیه‌سازی می‌باشد.

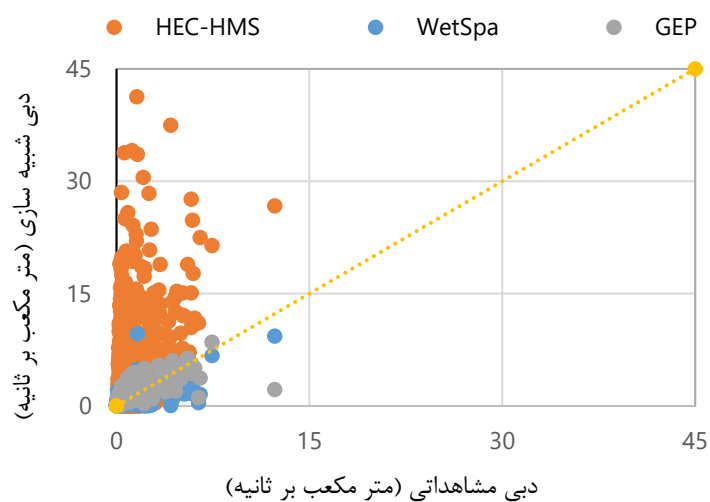
$$\begin{aligned}
 Q_s = & (Q_{0-1} ((R + 0.3355) - R)) (-0.074524 + Q_{0-1} + \\
 & (\arctan \sqrt{(-0.074524(-5.470184 - T))} (-0.074524(R))) \quad ۴-۱
 \end{aligned}$$

در این تحقیق شاخص‌های آماری مربوط به فرمول شماره ۴-۱، متعلق به الگوی شماره ۵ با کمترین میزان میانگین خطای مطلق و بیشترین مقدار ضریب همبستگی، بهترین کارایی و تطابق را در شبیه‌سازی این فرآیند داشته است

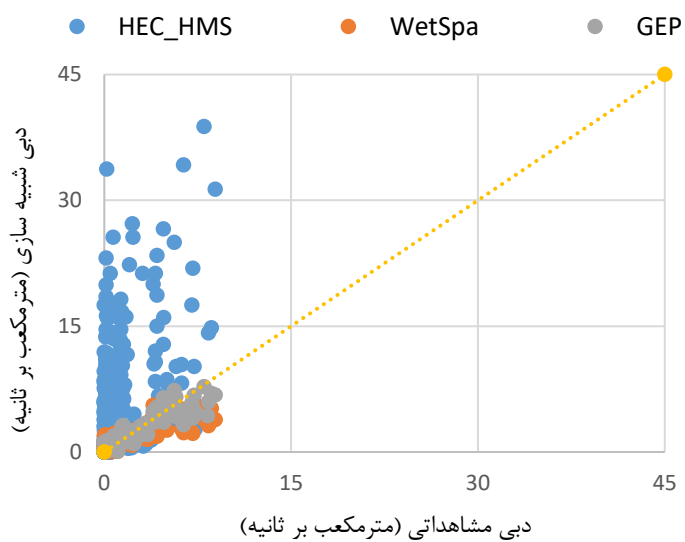
در نتیجه این تحقیق، مدل برنامه‌ریزی بیان ژن را یک روش صریح و دقیق برای پیش‌بینی جریان رودخانه حوضه آبریز بار اریه پیشنهاد می‌نماید. همچنین توصیه می‌گردد جهت مطالعه بارش-رواناب این حوضه از فرمول ذکر شده ۴-۱ استفاده گردد. نتایج موفق این روش در دوره واسنجی مؤید توانایی GEP در تعمیم و مدل‌سازی غیرخطی مهندسی رودخانه از جمله برآورد رواناب می‌باشد. طبق معیار ضریب همبستگی در مرحله آموزش و آزمون، نتیجه حاصل از این تحقیق با نتایج تحقیقاتی همچون سلگی و همکاران (۱۳۹۶) ۰/۹۷ و ۰/۹۵، فرناندو و همکاران (۲۰۱۱) ۰/۹۸ و ۰/۹۷ و سلگی (۲۰۱۷) ۰/۹۸ و ۰/۹۷، برای پیش‌بینی جریان رودخانه مطابقت دارد.

#### ۴-۵- مقایسه گرافیکی نتایج اجرای سه مدل WetSpa، HEC-HMS و GEP

به‌منظور بررسی توانایی مدل‌های WetSpa، HEC-HMS و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) از معیارهای  $MAE$ ،  $R$  و  $RMSE$  استفاده شده است. به‌منظور مقایسه سه روش مذکور، نمودارهای پراکنش سه مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب در شکل‌های ۴-۳۳ و ۴-۳۴ نشان دهنده خط برازش  $x=y$  است. همانطور که از این شکل‌ها مشخص است مقادیر تخمینی و مشاهداتی روش برنامه‌ریزی بیان ژن به غیر از چند نقطه که روی خط نیمساز قرار نگرفته در سایر نقاط بر روی خط برازش قرار دارد که این امر دلالت بر برابری مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌ای نسبت به سایر مدل‌ها براساس خط  $x=y$  است. با توجه با نتایج به‌دست آمده عملکرد مدل‌ها در دوره اعتبارسنجی نسبت به دوره واسنجی بهتر بوده است که به کیفیت داده‌های اندازه‌گیری مرتبط می‌باشد.



شکل ۴-۳۳ نتایج برآورد رواناب مدل های WetSpa، HEC-HMS و برنامه ریزی بیان ژن در دوره واسنجی



شکل ۴-۳۴ برآورد رواناب مدل های WetSpa، HEC-HMS و برنامه ریزی بیان ژن در دوره اعتبارسنجی

#### ۴-۶- نتایج کارایی سه مدل مورد استفاده در تحقیق

جدول ۴-۹ نتایج مدل‌های WetSpa، HEC-HMS و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

مدل	مراحل اجرا	R	$(\frac{m^3}{s})$ MAE	$(\frac{m^3}{s})$ RMSE
WetSpa	واسنجی	۰/۸۱۷	۰/۳۱۸	۰/۶۳
	اعتبارسنجی	۰/۸۷۴	۰/۲۴۴	۰/۵۳
HEC-HMS	واسنجی	۰/۴۵۷	۲/۵۳	۵/۲
	اعتبارسنجی	۰/۵۱۶	۲/۱۸۷	۴/۶۱۶
GEP	واسنجی	۰/۹۰۶	۰/۱۳۵	۰/۴۵۶
	اعتبارسنجی	۰/۹۵۶	۰/۱۰۳	۰/۳۲۶

نتایج موید آن است که روش برنامه‌ریزی بیان ژن و مدل WetSpa به خوبی توانستند رواناب حوضه را با ضریب همبستگی بیشتر از ۰/۸۱ پیش‌بینی نمایند. اما مدل HEC-HMS با ضریب همبستگی پایین (۰/۴۵۷ و ۰/۵۱۶) توانایی برآورد رواناب در این حوضه را نداشته است. روش برنامه‌ریزی بیان ژن، ضریب همبستگی بالایی (۰/۹۰ و ۰/۹۵) به ترتیب برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی) در مقایسه با دو روش WetSpa و HEC-HMS داشته است. همچنین مقایسه MAE و RMSE سه مدل مذکور نشان می‌دهد که مدل برنامه‌ریزی بیان ژن توانسته است مقدار خطای کمتری را برآورد نماید. همچنین با توجه به اینکه پارامترهای مورد نیاز (پارامترهای هیدرولوژیکی و هواشناسی) برای اجرای مدل WetSpa بیشتر از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن می‌باشد و اندازه‌گیری آن‌ها هزینه‌بر و گاهی اوقات در برخی از حوضه‌ها ممکن است وجود نداشته باشد، بنابراین نتایج نشان‌دهنده برتری روش برنامه‌ریزی بیان ژن نسبت به دو مدل دیگر در شبیه‌سازی رواناب در این تحقیق بوده است.

#### ۷-۴ شبیه‌سازی رسوب با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن

در پژوهش حاضر از برنامه‌ریزی بیان ژن برای پیش‌بینی بار رسوب معلق حوضه بار اریه استفاده گردیده است. در مدل ارائه شده توسط GEP، علاوه بر داده‌های متناظر دبی جریان و دبی رسوب، از اطلاعات متناظر باران، دما و تبخیر- تعرق نیز بهره گرفته شده است. این در حالی است که بیشتر مدل‌های مشابه، تنها از اطلاعات دبی جریان و دبی رسوب استفاده می‌نمایند و تاثیر ارتفاع باران را در میزان رسوب‌گذاری، نادیده می‌گیرند. برای برآورد رسوب، داده‌های ورودی در ۵ ترکیب مختلف به مدل معرفی گردیده است که در این ترکیب‌ها در جدول ۴-۱۰ مشهود است، مدل برای هر ترکیب اجرا می‌گردد.

جدول ۴-۱۰ ترکیب پارامترهای ورودی مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد رسوب معلق

ترکیب	پارامتر ورودی
۱	$Q_o, Q_s$
۲	$R, Q_o, Q_s$
۳	$R, ET, T, Q_o, Q_s$
۴	$R, ET, T, Q_{o-1}, Q_o, Q_s$
۵	$R, ET, T, Q_{o-1}, Q_o, Q_{s-1}, Q_s$

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



رسوب، از ۳ ژن و ۳۰ کروموزوم استفاده گردید. همچنین پارامتر اندازه سر با سعی و خطا ۷ انتخاب شد و مقدار عملگرهای ژنتیکی مطابق با پیش فرض مدل تعیین شد.

برای برآورد رسوب نیز از دوره آماری ۱۳۹۰/۷/۱ تا ۱۳۹۷/۶/۳۱ با گام زمانی روزانه استفاده گردید که از ۴ سال اول برای مرحله آموزش و ۳ سال آخر برای مرحله آزمون مورد استفاده قرار گرفت.

به منظور مقایسه نتایج پیش بینی بار رسوب معلق به روش برنامه ریزی بیان ژن، شاخص های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، متوسط خطای مطلق (MAE) و ضریب همبستگی (R) استفاده شد که به ترتیب در روابط ۱۸-۳، ۱۷-۳ و ۱۹-۳ تعریف شده اند.

جدول ۴-۱۱ پارامترهای آماری دقت مدل های حاصله از برنامه ریزی بیان ژن در برآورد رسوب معلق

الگو	مراحل اجرا	مقدار تابع برازش	R	MAE (ton/day)	RMSE (ton/day)
۱	آموزش	۶۷۳/۰۱	۰/۹۰۸	۱۵۴/۶۱	۱۶۸۴/۹۱
	آزمون	۳۵/۵	۰/۰۲	۶۵/۷۲۷	۲۴۴/۰۷
۲	آموزش	۶۰۱/۰۳۲	۰/۷۵	۲۲۳/۹۵	۲۳۰۲/۰۵
	آزمون	۲/۷	۰/۰۰۱	۲۱۴/۷	۳۳۰۸/۴۹
۳	آموزش	۷۱۶/۵۱	۰/۹۱۸	۱۴۶/۴	۱۳۷۲/۰۵
	آزمون	۰/۶۲۴	۰/۰۰۲	۷۷۵/۴۷	۱۴۴۰۰
۴	آموزش	۶۸/۲۸	۰/۸۸۶	۱۸۶/۲۶	۱۶۲۲/۳۹
	آزمون	۰/۶۷	۰/۰۰۲	۷۳۹/۳۴	۱۳۳۳۰/۶۶
۵	آموزش	۶۴۴/۱۲۹	۰/۸۵۷	۱۹۳/۸۹	۱۹۱۵/۹۹
	آزمون	۲/۸۲	۰/۰۰۴	۲۶۰/۷۵۹	۳۱۷۳/۸۲

با مقایسه کارایی ترکیب‌های مختلف مدل، مشاهده می‌شود که الگوی سه با ورودی‌های  $Q_o$  و  $Q_s$ ،  $T$ ،  $ET$ ،  $R$  با دارا بودن بیشترین ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۱۸، بیشترین توابع برازش برابر با ۷۱۶/۵۱ و کمترین میزان معیار ریشه میانگین مربعات خطا برابر با ۱۳۷۲/۰۵ ( $\text{ton/day}$ ) در بخش آموزش، بهترین نتیجه را به خود اختصاص داد. اما تمامی الگوها در مرحله آزمون با ضریب همبستگی بسیار کم و خطای بالا، از نتیجه خوبی برخوردار نبوده است.

مدل برنامه‌ریزی بیان ژن توانایی برآورد رسوب حوضه بار اریه را نداشته است و این ممکن است به دلیل عدم کفایت داده‌ها، خطای دستگاه‌ها در اندازه‌گیری داده‌های ورودی و یا خطای انسانی در جمع‌آوری داده‌ها باشد. بنابراین امکان بررسی رسوب در این منطقه مطالعاتی (حوضه بار اریه) وجود ندارد.

## فصل پنجم

### نتیجہ گیری و ارائهٔ مشاہدات

## ۵-۱- مقدمه

ضرورت آگاهی از وضعیت منابع آب و نزولات جوی در حوضه‌های آبریز مختلف برای اجرای طرح‌های آبی از یک سو و نبود شبکه‌های مناسب از ایستگاه‌های اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی و آب‌شناسی از سوی دیگر، اهمیت استفاده از روش‌های غیرمستقیم برای شبیه‌سازی بارش-رواناب و محاسبه حجم جریان در حوضه‌های آبریز را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

## ۵-۲- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به مقایسه مدل‌های WetSpa، HEC-HMS، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و شبیه‌سازی رسوب معلق با مدل برنامه‌ریزی بیان ژن پرداخته شد که نتایج نشان‌دهنده:

۱- ضریب همبستگی مدل WetSpa در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب  $0/817$  و  $0/874$  می‌باشد که بیانگر توانایی این مدل در شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌باشد. همچنین معیار کارایی ناش-ساتکلیف برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر  $65/8$  و  $76$  درصد می‌باشد که حاکی از عملکرد خوب مدل در این حوضه می‌باشد.

۲- ضریب همبستگی مدل HEC-HMS برابر  $0/457$  و  $0/516$  و میانگین خطای مطلق  $2/53$  و  $2/187$  به ترتیب برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی، بیانگر عدم توانایی مدل در برآورد بارش-رواناب می‌باشد.

۳- برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) با ضریب همبستگی  $0/906$  و  $0/956$  و میانگین خطای مطلق  $0/135$  و  $0/103$  برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی نشانگر توانایی بالای این مدل در شبیه‌سازی بارش-رواناب است.

با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی سه مدل مذکور، مدل‌های WetSpa و GEP با مقدار ضریب همبستگی بیشتر از  $0/81$  و میانگین قدرمطلق خطای کمتر از  $0/31$  نشان داد که این مدل‌ها قابلیت بالایی در برآورد رواناب دارند و از بین این دو مدل، مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) برآورد بهتری از رواناب داشته است و مدل HEC-HMS برای برآورد رواناب منطقه مطالعاتی کارایی خوبی نداشته است.

۴- پیش‌بینی رسوب با روش برنامه‌ریزی بیان ژن صورت گرفت. این روش در مرحله آموزش با ضریب همبستگی ۰/۹۱۸ و میانگین خطای مطلق ۱۴۶/۴ (تن بر روز) از نتایج خوبی برخوردار می‌باشد ولی در مرحله آزمون با ضریب همبستگی ۰/۰۰۲ و میانگین خطای مطلق ۷۷۵/۴۷ (تن بر روز) توانایی برآورد رسوب را نداشته است.

### ۵-۳- پیشنهادات

به‌منظور افزایش دقت در شبیه‌سازی بارش- رواناب پیشنهاد می‌گردد:

۱- بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی و تغییر اقلیم بر تولید رواناب، با استفاده از مدل WetSpa در حوضه آبریز بار آریه.

۲- تحلیل حساسیت پارامترهای مدل هیدرولوژیکی WetSpa، در برآورد جریان روزانه.

۳- برای برآورد رواناب با مدل HEC-HMS از مدل و پارامترهای نیمه توزیعی استفاده گردد.

۴- در برآورد رواناب با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن، پیشنهاد می‌شود از ترکیب‌های بیشتری از پارامترها به‌عنوان ورودی استفاده گردد و همچنین به‌منظور افزایش دقت، تاثیر دیگر پارامترهای هواشناسی از جمله ساعات آفتابی و سرعت باد و.... به‌کار گرفته شود.

۵- سایر روش‌های هوشمند مانند ماشین بردار پشتیبان، سیستم استنتاجی تطبیقی- عصبی فازی، برنامه‌ریزی ژنتیک و دیگر الگوریتم‌های تکاملی در برآورد رواناب به‌کار گرفته شوند.

## فهرست منابع

- (۱) اکبری ح. و بهرمند ع.ا.، (۱۳۹۱) "مقایسه روش‌های شبیه‌سازی هدر رفت خاک و تولید رسوب در مدل‌های SWAT و WetSpa" نشریه حفاظت و بهره‌برداری از منابع طبیعی، جلد اول، شماره چهارم، ص ۷۷-۶۳.
- (۲) امیراحمدی ا. و شیران م.، (۱۳۸۸) "کاربرد مدل HEC-HMS در تحلیل حساسیت متغیرهای ژئومورفولوژی موثر بر سیلاب دشت کرون" مجله جغرافیا و توسعه، شماره شانزدهم، ص ۱۷۳-۱۵۳.
- (۳) ابراهیمیان ص. و قادری س.ج.، (۱۳۹۳) "ارزیابی و واسنجی مدل WMS/HEC-HMS در حوضه آبریز سد مهاباد"، فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال چهارم، شماره شانزدهم، ص ۸۰-۷۰.
- (۴) امیدوار ک. و اژدرپور م.، (۱۳۹۱) "مقایسه شبکه عصبی مصنوعی و مدل HEC-HMS در برآورد بارش-رواناب در حوضه آبریز رودخانه اعظم هرات" فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال بیست و هفت، شماره چهارم، ص ۱۶۰-۱۴۰.
- (۵) الماسی پ.، سلطانی س.، گودرزی م. و مدرس ر.، (۱۳۹۵) "بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب سطحی در حوضه آبخیز بازفت" نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، سال بیستم، شماره هفتاد و هشتم، ص ۵۱-۳۹.
- (۶) امامقلی‌زاده ص.، کریمی دمنه ر. و مهدی پناه ح.، (۱۳۹۵) "برآورد رواناب حوضه آبریز کسلیان با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن" مطالعات منابع طبیعی، محیط زیست و کشاورزی، جلد سوم، شماره چهار و پنج، ص ۷-۱.

- ۷) آذین مهر م.، بهرمند ع.ا. و کبیر آ.، (۱۳۹۴) "مدل سازی هیدروگراف جریان با استفاده از GIS و مدل هیدرولوژیکی توزیعی در حوضه دینور کرخه" دو فصلنامه تخصصی علوم و مهندسی آب- دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، سال پنجم، شماره یازدهم، ص ۲۲-۷.
- ۸) آذین مهر م.، بهرمند ع. و کبیر ا.، (۱۳۹۵) "آنالیز حساسیت و عدم قطعیت مدل WetSpa در شبیه سازی هیدروگراف جریان با استفاده از PEST در حوضه آبخیز دینور کرخه" پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، سال هفتم، شماره سیزدهم، ص ۸۲-۷۲.
- ۹) بهرامی س.ع.، (۱۳۸۸)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر خصوصیات هیدرولوژیک حوضه آبخیز سد بوستان استان گلستان با استفاده از مدل HEC-HMS" دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ص ۱۷۷.
- ۱۰) بهیان مطلق س.، پژوهش م.، هنربخش ا. و صالحی هفشجانی ن.، (۱۳۹۷) "سنجش عملکرد مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای حوضه های نیمه توزیعی و یکپارچه (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کوه سرخه)" پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، سال نهم، شماره ۱۷، ص ۳۹-۴۷.
- ۱۱) پژوهش م.، طهماسبی ط. و عبدالمهی خ.، (۱۳۹۷) "شبیه سازی رواناب و رسوب با استفاده از مدل WetSpa" فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال هشتم، شماره سی و دوم، ص ۳۰-۴۶.
- ۱۲) تلوری ع.، (۱۳۷۵) "مدل های هیدرولوژی به زبان ساده" چاپ اول، انتشارات موسسه تحقیقات جنگل ها و مراتع، ص ۱۹.
- ۱۳) جعفرنیا ج. و امامقلی زاده.، (۱۳۹۲) "برآورد سیلاب حوضه آبریز رودخانه تلار (زیرحوضه کسلیان) با استفاده از مدل HEC-HMS"، کنفرانس ملی مدیریت سیلاب تهران

۱۴) جاویدان ن.، بهرمنده.ا.، جاویدان ر.، اونق م. و بایرام کمکی چ.، (۱۳۹۷) "بررسی تاثیر سناریوهای تغییر کاربری اراضی بر روی مؤلفه‌های بیلان آبی با استفاده از مدل WetSpa (مطالعه موردی: حوضه آبخیز زیارت استان گلستان)" **پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز**، سال نهم، شماره هفده، ص ۱۶۸-۱۸۱.

۱۵) حسین‌زاده م.م و ایمنی س.، (۱۳۹۴) "مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز قوچک-رودک با استفاده از مدل HEC-HMS **پژوهش‌های دانش زمین**، سال هفتم، شماره بیست و پنجم، ص ۴۳-۳۱.

۱۶) خالقی م.، زینی‌وند ح. و حق‌زاده ع.، (۱۳۹۵) "تحلیل حساسیت پارامترهای مدل هیدرولوژیکی توزیعی مکانی WetSpa در برآورد جریان روزانه رودخانه خرم‌آباد" **مجله پژوهش آب ایران**، جلد ده، شماره چهار، پیاپی بیست و سوم، ص ۱۴۳-۱۴۸.

۱۷) دستورانی م.، خداپرست ت.، طالبی ر.، وفاخواه ع. م. و دشتی ج.، (۱۳۸۹) "ارزیابی و واسنجی پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد طرق مشهد)" **ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری و چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب**، ص ۸-۱.

۱۸) دهقانی ر.، قربانی م.ع.، تشنه‌لب م.، ریخته‌گر غیاثی ا. و اسدی ا.، (۱۳۹۴) "مقایسه و ارزیابی مدل‌های شبکه عصبی بیزین، برنامه‌ریزی بیان ژن، ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون خطی در تخمین بده جریان (مطالعه موردی: حوضه صوفی چای)" **فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب**، سال پنجم، شماره بیستم، ص ۸۵-۶۶.

۱۹) دهقانی ر.، یونسی ح.ا. و ترابی پوده ح.، (۱۳۹۶) "مقایسه عملکرد مدل‌های ماشین بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه بیزین در پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه کشکان)" **نشریه پژوهش-های حفاظت آب و خاک**، جلد بیست و چهارم، شماره چهارم، ص ۱۷۷-۱۶۱.



۲۰) دهقانی ن.، قاسمیه ه.، ساداتی نژاد ج. و قربانی خ.، (۱۳۹۶) "ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیک (مطالعه موردی: حوضه آبخیز بازفت صمصامی)" **اکوهیدرولوژی**، دوره چهار، شماره یک، ص ۸۹-۱۰۲.

۲۱) دهقانی جبارلو م.، نظرنژاد ح. و محمودزاده ا.، (۱۳۹۴) "پهنه‌بندی ضریب رواناب پتانسیل و ظرفیت ذخیره چالابی حوضه آبخیز نازلوچای با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa" **همایش ملی پژوهش‌های محیط زیست و کشاورزی**، سال سوم، ص ۹-۱.

۲۲) زمانی ر.، احمدی ف. و رادمنش ف.، (۱۳۹۳) "مقایسه روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن، سری زمانی غیرخطی، خطی و شبکه عصبی مصنوعی در تخمین دبی روزانه (مطالعه موردی: رودخانه کارون)" **نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)**، جلد بیست و هشت، شماره ششم، ص ۱۱۸۲-۱۱۷۲.

۲۳) سلگی ا.، زارعی ح. و گلابی م.ر.، (۱۳۹۶) "بررسی عملکرد مدل برنامه‌ریزی بیان ژن با روش‌های پیش پردازش داده‌ها جهت مدل‌سازی جریان رودخانه" **نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک**، جلد بیست و چهارم، شماره دوم، ص ۲۰۱-۱۸۵.

۲۴) سالاری جزی م.، قربانب خ.، سهرابیان ع. و عبدالحسینی م.، (۱۳۹۵) "پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه با استفاده از مدل‌های داده محور" **نشریه آبیاری و زهکشی ایران**، جلد ۱۰، شماره ۴، ص ۴۷۹-۴۸۸.

۲۵) سلطانی م.، (۱۳۸۹)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "ارزیابی اقدامات آبخیزداری بر سیل‌خیزی با استفاده از مدل HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز منشاد)"، دانشگاه یزد،

۲۶) شکری کوچک س.، بهنیا ع. ا.، رادمنش ف. و آخوندعلی ع. م.، (۱۳۹۰) "تخمین آبنمود سیلاب حوضه آبخیز با استفاده از مدل HMS-HEC و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه ایدنک)" **پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز**، سال سوم، شماره پنجم، ص ۸۸-۶۳.

۲۷) شریفی م.ب. و صالحی م. (۱۳۸۴) "کاربرد شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی جریان رودخانه در حوضه معرف

کارده" خلاصه گزارش نهایی طرح تحقیقاتی شرکت آب منطقه‌ای خراسان.

۲۸) عباس‌زاده م.، یزدانی م.ر.، ذوالفقاری ع.ا.، محمدی م.، صادقی‌پور ا. (۱۳۹۷) "اثر تغییرات کاربری زمین بر

تولید رواناب با استفاده از مدل وتسپا در حوضه آبخیز فیروزکوه" پژوهش‌های آبخیزداری، شماره ۱۱۷، دوره،

ص ۳۵-۴۶.

۲۹) علیزاده ا. (۱۳۹۱) "اصول هیدرولوژی کاربردی" چاپ سی و پنجم، مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس

رضوی، ص ۵۳۲

۳۰) فروتن م.، الوندی ا.، بهرمند ع.ا.، زینی‌وند ح. و میرزایی ق. (۱۳۹۶) "شبیه‌سازی اثرات سناریوهای بهینه

توسعه مناطق مسکونی بر هیدروگراف جریان و غلظت رسوب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز زیارت استان

گلستان)" پژوهش‌های فرسایش محیطی، سال بیست و هفت، شماره چهار، ص ۴۴-۵۷.

۳۱) قربانی م.ع. و دهقانی ر. (۱۳۹۴) "کاربرد شبکه عصبی بیزین، ماشین بردار پشتیبان و برنامه‌ریزی بیان ژنی

در تحلیل بارش-رواناب ماهانه (مطالعه موردی: رودخانه کاکارضا)" علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی-

پژوهشی)، جلد ۳۹، شماره ۲، ص ۱۳۸-۱۲۵.

۳۲) قلخانی ح.، هوشیاری پور ف.، کوهیان افضل ف. و شفیع حسن آبادی م. (۱۳۹۷) "مدل هیدرولوژیکی

WetSpa را با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه‌ی NSGA-II و PSO" مجله مهندسی منابع آب، سال

یازدهم، ص ۱۵-۳۴.

۳۳) قربانی م.ع.، ازانی ع. و نقی‌پور ل. (۱۳۹۵) "مقایسه عملکرد ماشین‌بردار پشتیبان با سایر مدل‌های هوشمند

در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب" پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، سال هفتم، شماره سیزدهم،

ص ۱۰۳-۹۲.

۳۴) کریمی م.، غفاری گ. و عزیزیان م.، (۱۳۹۰) "شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب با استفاده از مدل HEC- HMS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز ليقوان)" همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال هفتم، ص ۱۲-۱.

۳۵) مزیدی ا. و کوشکی س.، (۱۳۹۲) "شبیه‌سازی رواناب و تخمین سیل در حوضه آبریز خرم‌آباد با مدل HEC- HMS " فصلنامه جغرافیا و توسعه، سال سیزدهم، شماره ۴۱، ص ۱۰-۱.

۳۶) مشاری عشق‌آباد س.، نوحه‌گر ا.، باباییان ا. و ارشادی س.، (۱۳۹۶) "بررسی قابلیت مدل هیدرولوژیک پیوسته WetSpa در شبیه‌سازی جریان‌های بیشینه با گام زمانی کوتاه مدت (مطالعه موردی: حوضه زشک- مشهد)" پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، سال هشتم، شماره شانزدهم، ص ۱۰-۱.

۳۷) مرادی م.، دین‌پژوه ی. و عزیزی س.، (۱۳۹۷) "مقایسه سه روش مختلف برآورد تلفات بارش در مدل HEC- HMS در شبیه‌سازی رواناب (مطالعه موردی: حوضه قره‌سو در کرمانشاه)" اکوهیدرولوژی، سال پنجم، شماره دوم، ص ۴۴۷-۴۳۳.

۳۸) متکان ع.ا.، زینی‌وند ح.، بیات ب.، غفوری روزبهانی ع.ا. و میرباقری ب.، (۱۳۹۱) "شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه و تحلیل تاثیرات تغییر کاربری بهینه روی آن با استفاده از مدل WetSpa در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبریز مرک، استان کرمانشاه)" سنجش از دور و GIS ایران، سال چهارم، شماره اول، ص ۱۸-۱.

۳۹) نوری ف.، بهمنش ج.، محمدنژاد ب. و رضایی ح.، (۱۳۹۱) "ارزیابی مدل WMS/HEC-HMS در پیش‌بینی سیلاب حوضه آبریز قروه" مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد نوزدهم، شماره چهارم، ص ۲۱۰-۲۰۱.

۴۰) نصری م. و سلیمانی ف.، (۱۳۹۰) "شبیه‌سازی جریان با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه سد شیخ بهایی)" **هفتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران**، ص ۲۶-۱۳.

۴۱) یعقوبی م. و مساح بوانی ع.ر.، (۱۳۹۳) "تحلیل حساسیت و مقایسه عملکرد سه مدل مفهومی HBV، IHARCES و HEC-HMS در شبیه‌سازی بارش-رواناب پیوسته در حوضه‌های نیمه خشک (بررسی موردی: حوضه اعظم هرات-یزد)" **مجله فیزیک زمین و فضا**، دوره چهارم، شماره دوم، ص ۱۷۲-۱۵۳.

- 42) Adib A., Mahmoudian Kafshgar Kalae M., Mahmoudian Shoushtari M. and Khalili M.K. (2017) "Using of gene expression programming and climatic data for forecasting flow discharge by considering trend, normality and stationarity analysis" **Arabi. Journal of Geology sciences.**, 10: 208-221.
- 43) Andersen J., Refsgaard J. and Jensen K.H. (2001) "Distributed hydrological modelling of the senegal river basin model construction and validation" **Journal of Hydrology.**, 247: 200-214.
- 44) Azizi M., Mohajerani A. and Akhavan M.R. (2018) "Simulating and Prediction of Flow Using by WetSpa Model in Ziyarat River Basin, Iran" **Journal of Geology.**, 8: 298-312.
- 45) Bayat B., (2009) "Simulated river flow and analysis Use change effects on river flow using WetSpa models in GIS environment, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of M. Sc Remote sensing and GIS", Shahid Beheshti university, School of Geosciences. (in Persian)., p 142
- 46) Bahremand A., De Smedt F., Corluy J. and Liu Y.B. (2005) "Stream flow simulation by wetspa model in Hornad river basin, Slovakia" In: J. van Alphen, E van Beek, M. Taal (eds.), **Floods from defence to management**, Teylor & Francis Group, London., 415-422.
- 47) Bahremand A., De Smedt F., Corluy J., Liu Y.B., Poorova J., Velcicka L. and Kunikova E. (2007) "Wetspa Model Application for Assessing Reforestation Impact on Floods in Margecany\_Hornad Watershed, Slovakia" **Water Resour Manage.**, 21: 1373-1391.
- 48) Bahremand A., De Smedt F., Corluy J., Liu Y.B., Poorova J., Velcicka L. and Kunikova E. (2007) "Wetspa Model Application for Assessing Reforestation Impact on Floods in Margecany\_Hornad Watershed, Slovakia" **Water Resour Manage.**, 21: 1373-1391.

- 49) Bahremand A. and De Smedt F. (2010) “predictive analysis and simulation uncertainty of a distributed hydrological model” **Water Resource Management.**, 24: 2869-288.
- 50) Beven K. J. (2000) “Rainfall-runoff modeling” **John Willey and Sons Ltd**, England., p 200.
- 51) Chormanski J. and Batelaan O. (2011) “Application of the WetSpa distributed hydrological model for catchment with significant contribution of organic soil. Upper Biebrza case study” **Land Reclamation.**,43(1): 25-35.
- 52) Dahmarde Ghaleno M.R. (2018) “Runoff Simulation using WetSpa Distributed Hydrological Model in Ziarat Watershed of Golestan Province, Iran” **Journal of Department Range and Watershed Management.**, 6(1): 11-20.
- 53) Dariane A.B., Javadianzadeh M.M. and James L.D. (2016) “Developing an efficient auto-calibration algorithm for HEC-HMS program” **Water Resources Management.**, 30(6): 1923-1937.
- 54) Desta Y., Haddush G. and Gebremeskel A. (2019) “Investigation of runoff response to land use/land cover change on the case of Aynalem catchment, North of Ethiopia” **Journal of African Earth Sciences.**, (2): 1-39.
- 55) Ferreira, C. (2001) “Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems” **Complex Systems.**, 13(2): 87-129.
- 56) Feldman A.D. (2000) “Hydrologic modelling system HEC-HMS, technical reference manual. U.S. Army Corps of Engineers” **Hydrologic Engineering Center**, HEC, Davis, CA, USA, p 1
- 57) Fernando K.A., Shamseldin A.Y. and Abrahart R.J. (2011) “Comparison of two data-driven approaches for daily river flow forecasting” **International Congress on Modelling and Simulation.**, Perth, Australia.,19: 1077-1083.
- 58) Fernando K.A., Shamseldin A.Y. and Abrahart R.J., (2012) “River Flow Forecasting Using Gene Expression Programming Models”, 10th International Conference on Hydro informatics, Hamburg, Germany
- 59) Gebremeskel G. and Kebede A. (2018) “Estimating the effect of climate change on water resources: Integrated use of climate and hydrological models in the Werii watershed of the Tekeze river basin, Northern Ethiopia” **Journal of Agriculture and Natural Resources.**, 52: 195-207.

- 60) Gebremeskel S., (2002), PhD. Thesis, “Modelling the effect of climate and land-use changes on hydrological processes: An integrated GIS and distributed modelling approach”, Brussel Belgium. Vrije Universiteit,
- 61) Gumindoga W., Rwasoka D.T., Nhapi I. and Dube T., (2016) “Ungauged runoff simulation in Upper Manyame catchment, Zimbabwe: Application of the HECHMS model” **Physics and Chemistry of the Earth**., Parts A/B/C., 1-12.
- 62) Grove M., Harbor J. and Engle B. (1998) “Composite vs. distributed curve numbers: effects on estimates of storm runoff depths” **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**., 35(5): 1015 – 1023.
- 63) Ghorbani M.A., Kisi O., and Aalinezhad M. (2010) “A probe into the chaotic nature of daily streamflow time series by correlation dimension and largest Lyapunov methods” **Applied Mathematical Modelling**., 34: 4050–4057.
- 64) Hsu K.L., Hoshin V.G. and Sorooshian S. (1995) “Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process” **Water Resources Research**., 31: 2517-2530.
- 65) Henriksen H. J., Troldborg L., Nyegaard P., Sonnenborg T. O., Refsgaard J. C. and Madsen B. (2003) “Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark” **Journal of Hydrology**., 280: 52-71.
- 66) Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modelig System, (2013), “Hydrologic Engineering CenterHydrologic Modelig System (HEC-HMS) Users manual (Version )”, US Army Corps of Engineers.
- 67) Haregeweyn N., Tesfaye S., Tsunekawa A., Tsubo M., Meshesha D.T., Adgo E. and Elias A. (2015) “Dynamics of land use and land cover and its effectson hydrologic responses: case study of the Gilgel Tekeze catchment in the highlands of Northern Ethiopia” **Environ Monit Assess**., 187: 4090.
- 68) Hawkins R.H. (1982) “Interpretations of variable source area variability in rainfall-runoff relationships” In V.P.S (Ed.) Rainfall-runoff Relationships. **Water Resources Publications**., Littleton,CO, 303-324
- 69) Imani R., Ghasemieh H. and Ouri A. E. (2016) “Application and Calibration of WetSpa Hydrological Model for Daily Runoff Simulation for 2007-2008 to 2011 -2012 Water years: A

Case Study: Balokhluchay Watershed, Ardabil, and Northwestern Iran” **International Bulletin of Water Resource & Development.**, 3(4): 140-152.

- 70) Jaroslaw C. and Batelaan O. (2011) “Application of the WetSpa distributed hydrological model for catchment with significant contribution of organic soil. Upper Biebrza case study Annals of Warsaw University of Life Sciences” **Journal Ann. Warsaw Univ. of Life Sci. – SGGW. Land Reclam.**, 43: 25–35.
- 71) Karamage F., Zhang C., Fang X., Liu T., Ndayisaba F., Nahayo L., Kayiranga A. and Nsengiyumva J.B. (2017) “Modeling Rainfall-Runoff Response to Land Use and Land Cover Change in Rwanda (1990–2016)” **journal of water.**, 9: 147.
- 72) Karimi H., Zeynivand H., Tahmasebipour N., Haghizadeh A. and Miryahjoubzade M. (2016) “Comparison of SRM and WetSpa models efficiency for snowmelt runoff simulation” **Environ Earth Sci.**, 75: 664.
- 73) Kisi O., Shiri J. and Tombul M. (2013) “Modeling rainfall-runoff process using soft computing techniques” **Computers & Geosciences.**, 51: 108 –117.
- 74) Liu Y. B., De Smedt F., Hoffmann L. and Pfister L. (2004) “Assessing landuse impacts on flood processes in complex terrain by using GIS and modelling approach (Case Study: Luxembourg)” **Environmental Modeling and Assessment.**, 2(9): 227 -235.
- 75) Liu Y.B. and De Smedt F. (2004) “WetSpa extension. A GIS-based hydrologic model for flood prediction and watershed management”, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering Vrije Universiteit Brussel, Belgium
- 76) Liu Y. B., Corluy J., Bahremand A., and De Smedt F. (2005) “Modelling Flow and Phosphorus Transport to the Ruzin Reservoir from the Margecany Catchment, Hornad, Slovakia the Tisza River Project”, ANNEX 2B: Vrije Universiteit Brussel, Belgium
- 77) Liu Y. B., Corluy j. Y. B., Bahremand A., De Smedt F., Poorova j. and Velcicka L. (2006) “Simulation of runoff and phosphorus transport in a Carpathian catchment, Slovakia” **J. River Res. And Applications.**, 22: 1009-1022.
- 78) Mohamadi M., Zeinivand H., Morady H., Purqasemi H. and Farazjoo H. (2016) “Impacts of Land Use Changes Scenarios on Runoff generation Using WetSpa Model (Case Study: Baqesalian)” **Journal of Ecohidrology.**, 2(4): 357 -369.

- 79) Moradipour Sh., Bahremand A., Zeinivand H. and Najafinejad A. (2013) "Simulation of water balance components using a distributed hydrological of Environ" **1 Resour. Res.**, 1(1): 51-64.
- 80) Nash J.E. and Sutcliffe J.V. (1970) "River flow forecasting through conceptual models part I- A discussion of principles" **Journal of hydrology.**, 10(3): 282-290.
- 81) Nikpour M.R., Sani Khani H., Mahmodi Babelan S. and Mohammadi A. (2017) "Application of LS-SVM, ANN, WNN and GEP in Rainfall- Runoff Modeling of Kiyav-Chay River" **Iranian Journal of Eco Hydrology.**, 40(2): 627-639.
- 82) Nurmohamed R., Naipal S. and De Smedt F. (2006) "Hydrologic modeling of the Upper Suriname River basin using WetSpa and ArcView GIS" **Journal of Spatial Hydrology** 6(1): 1-17.
- 83) Nurani V. (2017) "An Emotional ANN (EANN) approach to modeling rainfall-runoff process" **Journal of Hydrology.**, 544: 267-277.
- 84) Oleyiblo J.O. and Li Z.J. (2010) "Application of HECHMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China" **Water Science and Engineering.**, 3(1): 14-22.
- 85) Porretta-Brandyk L., Chormanski J., Ignar S., Okruszko T., Szymczak T. and Krezalek K. (2010) "Evaluation and verification of the wetspa model based on selected rural catchments in Poland" **J. Water Land Dev.**, 14: 115-133.
- 86) Rahman K.U., Balkhair K.S., Almazroui M. and Masood A. (2017) "Sub-catchments flow losses computation using Muskingum–Cunge routing method and HEC-HMS GIS based techniques, case study of Wadi Al-Lith, Saudi Arabia Modeling" **Earth Systems and Environment.**, 3(1): 4.
- 87) Rwetabula J., De Smedt F. and Rebhun M. (2007) "Prediction of runoff and discharge in the Simiyu River (tributary of Lake Victoria, Tanzania) using the WetSpa model" **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.**, (4): 881–908.
- 88) Refsgaard J.C. (1996). Terminology, Modelling protocol and classification of hydrological model codes, pp 17-40, In: **"Distributed hydrological modelling"**, Abbott M.B. and Refsgaard J.C. Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark



- 89) Roshangar K., Vojoudi Mehrabani F. and Alami M.T. (2013) "Forecasting daily stream flows of vaniar river using genetic programming and neural networks approaches" **J. Civil Engin. Urban.**, 4(3): 197-200.
- 90) Solgi A., Zarei H., Shehnidarabi M. and Alidadis A. (2017) "Monthly precipitation forecast using gene expression and backup vector machine programming models" **Journal of Applied Geosciences Research.**, 50: 91 -103.
- 91) Safari, A. and De Smedt, F. (2009) "Streamflow simulation using radarbased precipitation applied to the Illinois River basin in Oklahoma, USA", The Third International Scientific Conference BALWOIS, Balkan Institute for Water and Environment, Ohrid, Macedonia
- 92) Safari A., De Smedt F. and Moreda F. (2012) "WetSpa model application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2)" **Journal of Hydrology.**, 418–419: 78–89.
- 93) Safari A. and De Smedt F. (2014) "Improving WetSpa model to predict streamflows for gaged and ungaged catchments" **Journal of Hydroinformatics.**, 16(4): 758-771.
- 94) Singh R. and Ajmera S. (2020) "Rainfall Runoff Modeling using Gene Expression Programming and Artificial Neural Network" **International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT).**, 9(3): 978-983.
- 95) Tam V.T. and Viet Vga T.T. (2018) "Assessment of urbanization impact on groundwater resouces in Hanoi, Vietnam" **Journal of Environmental Management.**, 227: 107-116.
- 96) Tavakoli M., De Smedt F. (2013) "Validation of soil moisture simulation with a distributed hydrologic model(wetspa)" **Journal of Environ Earth Sci.**, 69: 739-747.
- 97) Tavakoli M., De Smedt F., Vansteenkiste Th. and Willems P. (2014) "Impact of climate change and urban development on extreme flows in the Grote Nete watershed, Belgium" **Natural Hazards.**, 71: 2127–2142.
- 98) Verma A.K., Jha M.K. and Mahana R.K. (2010) "Evaluationof HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using remote sensing andgeographical information system" **Paddy and Water Environment.**, 8: 131 –144.
- 99) Vansteenkiste T., Tavakoli M., Steenbergen N.V., De Smedt F., Batelaan O., Pereira F., Willems. (2014) "Intercomparison of five lumped and distributed models for catchment runoff and extreme flow simulation" **Journal of Hydrology.**, 511: 335-342.

- 100) Verbeiren B., Van De Voorde T., Canters F., Binard M., Cornet Y. and Batelaan O. (2013) “Assessing urbanisation effects on rainfall-runoff using a remote sensing supported modelling strategy” **Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.**, 21: 92-102.
- 101) Wang Z.M., Batelaan O. and De Smedt F. (1996) “A Distributed Model for Water and Energy Transfer Between Soil, Plants and Atmosphere (wetspa)” **Phys. Chem. Earth.**, 21(3): 189-193.
- 102) Yuan Z., Chu Y. and Shen Y. (2015) “Simulation of surface runoff and sediment yield under different Land-use in a Taihang Mountains Watershed, North China” **Soil and Tillage Research.**, 153: 7-19.
- 103) Yenehun A., Walraevens K. and Batelaan o. (2017) “Spatial and Temporal Variability of Groundwater Recharge in Geba Basin, Northern Ethiopia” **Journal of African Earth Sciences.**, (2): 1-51.
- 104) Yaghubi F. (2010) “Simulated river flow using WetSpa models (Case Study: Chehe Chai watershed, Golestan Province” **Journal of Soil and Water Conservation.**, 24(3): 185 – 207.
- 105) Zeinivand H., (2009), PHD. Thesis, “Development of Spatially Distributed Hydrological Wetspa Modules for Snowmelt, Soil Erosion, and Sediment Transport”, faculty of engineering. vrije universiteit Brussel, Brussels, Belgium, P 238,
- 106) Zeinivand H. and De Smedt F., (2009) “Spatially distributed modeling of soil erosion and sediment transport at watershed scale In starrett”, S. (Ed.), Proceedings World Environmental and water Resources Congress, American Society of civil Engineers, Kansas City, Missouri
- 107) Zeynivand H. (2015) “Comparison of Interpolation Methods for Precipitation Fields Using the Physically Based and Spatially Distributed Model of River Run off on the Example of the Gharesou Basin, Iran” **Russian Meteorology and Hydrology.**, 40(7): 480-488.

## **Abstract**

Accurate forecasting of river flows is one of the most important pillars in surface water resources management, especially taking appropriate measures in times of floods and droughts. With the development of computers and their computational capabilities and their rational decision-making, researchers have developed new methods for solving problems and phenomena more accurately and optimally. In this study, hydrological models of Wetsps, HEC\_HMS and Gene expression Planning Model (GEP) were used to simulate rainfall-runoff of Barareh watershed. The Wetspa model was simulated using Meteorology and Hydrometry data as well as data integration of the three main model maps of hydrological processes including runoff. HEC-HMS model simulation process using SCS curve number to calculate loss and SCS unit hydrograph method to estimate runoff, also to run Gene expression programming model used hydrometry and meteorological data in the form of 6 proposed models. Comparison of model results showed that HEC-HMS model did not have good ability to estimate runoff in the region. Gene expression programming methods with the highest correlation coefficient (R) of 0.9 and 0.95 and the root-mean-square error (RMSE) Equal to 0.45 and 0.32, respectively, were superior to the WetSpa model for calibration and validation, respectively. also Gene expression programming method was used to simulate suspended sediment, The results showed that this method with correlation coefficients of 0.918 and 0.002, root-mean-square error of 1372.05 and 14400 ton/day Respectively, in the training and test phase, there is no proper performance in estimating the sediment in the area.

**Keywords:** Bar arie Watershed, Gene expression Programming, HEC-HMS, Runoff Simulation, sediment, WetSpa.



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Agriculture**

**M.Sc. Thesis in Water Structures Engineering**

**Simulation of runoff and sediment using WetSpa model**

**Roghayeh Jafarpour**

**Supervisor:**  
**Dr. Samad Emamgholizadeh**

**Advisor:**  
**Dr. Hoseyn Rahmati**

**January 2020**