سنجش از دور
و
GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران سال چهارم، شماره اول، بهار ۱۳۹۱
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.4, No.1, Spring 2012

۱-۱۸

شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه و تحلیل تأثیرات تغییر کاربری بهینه روی آن با استفاده از مدل WetSpa در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبریز مرک، استان کرمانشاه)

علی‌اکبر متکان[۱]، حسین زینی‌وند[۲]، باقر بیات*[۳]، عبدالمحمد غفوری روزبهانی[۴]، بابک میرباقری[۵]

۱. دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۲. استادیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد رشته سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۴. استادیار مرکز تحقیقات کم‌آبی و خشکسالی در کشاورزی و منابع طبیعی
۵. مربی گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۳/۲۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۴/۲۰

چکیده

ضرورت آگاهی از وضعیت منابع آب و نزولات جوی در حوضه‌های آبریز مختلف برای اجرای طرح‌های آبی از یک‌سو و وجود نداشتن شبکهٔ مناسبی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی و آبشناسی از سوی دیگر، اهمیت استفاده از روش‌های غیرمستقیم برای شبیه‌سازی جریان و محاسبه حجم رواناب در حوضه‌های آبریز را بیش از پیش آشکار می‌سازد. در بین روش‌های غیرمستقیم، فنون پیشرفته‌ای نظیر سنجش از دور (RS) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، که امکان اطلاع از شرایط حوضه از جنبه‌های مختلف و تجزیه و تحلیل سریع‌تر و دقیق‌تر این اطلاعات را میسر ساخته‌اند، جایگاه ویژه‌ای در مطالعات هیدرولوژیکی و منابع آب یافته‌اند. این موضوع بر تعداد مدل‌های فیزیکی توزیع‌یافتهٔ مکانی در بستر GIS که در آنها اطلاعات مکانی به صورت واحدهای در سطح پیکسل در کنار داده‌های هیدرولوژی قرار می‌گیرند و امکان درک و بیان فرایندهای پیچیده و پویا را فراهم می‌آورند، افزوده است. مدل WetSpa نمونه‌ای از این مدل‌های هیدرولوژیکی توزیع‌یافتهٔ مکانی است که با هدف رسیدن به راهبردهای مدیریت پایدار آبخیز طراحی و ساخته شد. WetSpa براساس شبکه سلولی و در مقیاس حوضه آبریز عمل می‌کند و در نتیجه عملکرد آن به صورت پیوسته است. در پژوهش حاضر ابتدا جریان روزانهٔ رودخانه حوضه مرک کرمانشاه ـ با مساحت ۱۳۸۰ کیلومترمربع ـ با استفاده از مدل WetSpa در محیط GIS و با شرایط کاربری اراضی فعلی شبیه‌سازی شده و بعد از کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل به تحلیل تأثیرات تغییرکاربری بر روی جریان ـ به‌ویژه دبی پیک جریان ـ پرداخته شد. برای این منظور نقشهٔ کاربری بهینه حوضه با استفاده از مدل آمایش سرزمین مخدوم تولید شد و مجدداً جریان رودخانه به‌وسیله مدل شبیه‌سازی گردید. نتایج حاصل از به‌کارگیری مدل WetSpa در حوضه آبریز مرک دقتی معادل ۷۷ درصد را براساس ضریب ناش ـ ساتکلیف (NS) نشان می‌دهد. همچنین شبیه‌سازی جریان رودخانه تحت سناریوی کاربری بهینه نشان داد که هیدروگراف جریان رودخانهٔ با تأخیر 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 بهینه پایین‌تر آمده است.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی جریان، آمایش سرزمین، مدل توزیع یافته، حوضه آبریز مرک، مدل WetSpa، GIS.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، گروه سنجش از دور و GIS، تلفن ۰۹۱۸۳۱۷۶۰۲۰

Email: Bagher.Bayat@gmail.com

۱- مقدمه

رواناب حاصل از بارندگی و ذوب برف از منابع عمده آب به شمار می‌آید که در کشور ایران با توجه به خصوصیات آب‌وهوایی (خشک تا نیمه‌خشک) از نظر تأمین آب مورد نیاز کشاورزی، صنعتی و شرب دارای اهمیت ویژه‌ای است. بخش زیادی از حجم نزولات جوی با توجه به شرایط و خصوصیات حوضه‌های آبریز و بارندگی‌ها به رواناب تبدیل می‌شود. آگاهی از میزان و حجم رواناب حاصل از بارش‌ها ـ به‌ویژه در مناطقی که آمار اندازه‌گیری از نزولات جوی و جریان آب‌های سطحی موجود نیست ـ برای مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح منابع آب کشور بسیار مهم است. با توجه به اهمیت و حساسیت مهار آب‌های سطحی ـ به‌ویژه در کشور ایران که مسئله کمبود آبی در پهنه وسیعی از کشور وجود دارد ـ نیاز به شناسایی و به مدل درآوردن رفتار رودها و شریان‌های آبی برای برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و استفاده بیشتر و بهتر از پتانسیل‌های آنها عمیقاً احساس می‌شود (بیات، ۱۳۸۹). جدیدالتأسیس بودن بیشتر ایستگاه‌های هیدرومتری، نواقص موجود در آمار اکثر این ایستگاه‌ها، قرار گرفتن بیشتر رودها در مناطق خشک، وضعیت بحرانی برداشت آب‌های زیرزمینی و لزوم توجه بیشتر به آب‌های سطحی همه و همه دلایلی است که شبیه‌سازی، پیش‌بینی و تولید آمار مصنوعی در حوضه‌های آبریز را بیش از پیش ضرورت می‌بخشد. به‌منظور مواجهه با این وضعیت، به برنامه جامع استفاده از سرزمین (آب و زمین) نیاز است که در آن کاربری‌ها در چارچوبی مشخص به صورت منطقی و متناسب با توان محیط انتخاب شوند. ارزیابی توان بالقوه منابع طبیعی (کاربری بهینه) برای برنامه‌ریزی‌های مختلف می‌تواند کمک مؤثری در دستیابی به برنامهٔ جامع مذکور باشد. پژوهش در زمینهٔ روش‌های مدیریت جامع منابع آب نیازمند فنونی است که توان و امکان دورنگری، پیش‌بینی و درک و بیان فرایندهای پیچیده و پویا را فراهم می‌آورد. تشخیص و تعیین بهترین وضعیتی که «می‌تواند و باید باشد» و یافتن پاسخ و راه‌حلی برای «چه اقداماتی برای دستیابی به چنین وضعیتی باید انجام داد؟» از مهم‌ترین مسائلی است که باید در برنامه‌ریزی و توسعه منابع آب برای توسعه پایدار در نظر گرفته شوند (امینی فسخودی، ۱۳۸۵).

توسعه تکنولوژی GIS شیوه‌های بسیار کارآمد، مؤثر و مقرون به صرفه‌ای را برای مطالعهٔ سیستم‌های هیدرولوژیک فراهم کرده است. این موضوع در گسترش مدل‌های توزیع‌یافتهٔ مکانی در بستر GIS که در آن اطلاعات مکانی به صورت واحدهای در سطح پیکسل در کنار داده‌های هیدرولوژی قرار می‌گیرند، سهم بسزایی دارد. مدل‌های توزیعی برای شناسایی تأثیر تغییرات مکانی خصوصیات فیزیکی آبریز بر فرایندهای هیدرولوژی شرح و بسط یافته‌اند. در اغلب مدل‌های توزیعی، حوضه به واحدهای کوچک سلولی تقسیم می‌شود و مدل‌سازی برای هر یک از سلول‌ها انجام می‌گیرد و به خروجی حوضه منتقل می‌شود. اگرچه شناسایی تغییرات مکانی تمامی خصوصیات آبریز نظیر جنس زمین، رطوبت خاک، شیب زمین، بارش و دیگر عوامل دشوار است، ولی امروزه با استفاده از اطلاعات رقومی ماهواره‌ها به همراه بهره‌گیری از سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی این امکان فراهم آمده است.

مدل هیدرولوژیکی توزیع‌یافتهٔ مکانی WetSpa[1] ـ که نخستین بار وانگ و همکارانش (۱۹۹۶) آن را ارائه کردند و سپس دوسمت و دیگران (۲۰۰۰) به تکمیل آن پرداختند ـ از مدل‌های توزیعی مناسبی است که در بسیاری از حوضه‌های آبریز در کشورهای مختلف برای شبیه‌سازی کلیه مؤلفه‌های هیدرولوژیکی از جمله شبیه‌سازی جریان رودخانه در سطح پیکسل به‌کار رفته است. توانایی مدل در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی پیچیدهٔ حوضه‌های آبریز از یک سو و پیش‌بینی و تحلیل مکانی ـ زمانی مؤلفه‌های

1. Water and Energy Transfer Between Soil, Plants and Atmosphere

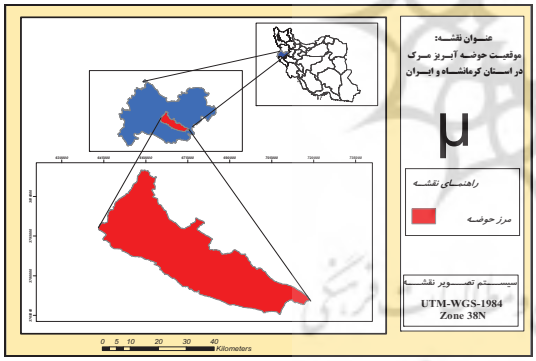
هیدرولوژیکی نظیر رواناب سطحی، رطوبت خاک، سرعت آب و جز آن از سوی دیگر، این مدل را از مدل‌های یکپارچه‌ای که در آنها واحدهای کاری بزرگ‌تر از پیکسل مبنای عمل هستند، متمایز ساخته است. مطالعات متفاوتی در مورد مدل‌سازی جریان رودخانه و نقشه‌بندی مؤلفه‌های بیلان آبی با استفاده از مدل WetSpa انجام شده است. وانگ و دیگران (۱۹۹۷) مدل توزیعی WetSpa را برای پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر برای نخستین بار در محیط GIS و در مقیاس پیکسل در حوضه آبریز ارائه کردند. آنها به منظور اعمال اثر متقابل رواناب سطحی و آب زیرزمینی در حوضه آبریز ترکلپ ـ مولنبیک در بلژیک، مدلی را پیشنهاد کردند. نتایج بیانگر این بود که مدل به‌خوبی قابلیت پیش‌بینی رواناب را داراست. گبرمسکل و دیگران (۲۰۰۲) در مقاله‌ای به برآورد سیلاب با استفاده از GIS و مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa در حوضه آلزیت پرداختند. آنها با استفاده از داده‌های ۶ ساله، دبی رودخانه را برآورد کردند و با مقایسهٔ آنها با دبی اندازه‌گیری‌شده نتایج خوبی به دست آوردند. لی‌یو و همکاران (۲۰۰۳) در مقاله‌ای به بررسی انتقال جریان براساس مدل‌سازی سیلاب در حوضه آلزیت در لوگزامبورگ پرداختند. آنها مدل را با داده‌های دبی و رواناب ساعتی مشاهده‌شده در ۳۰ ماه آزمون کردند و نتایج‌شان بیانگر توانایی بالای مدل به‌منظور بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی و پوشش خاک بر روی رفتار هیدرولوژی رودخانه بود. لی‌یو و همکاران (۲۰۰۴) به بررسی تأثیرات تغییر کاربری بر روی حوضه آبریز استینسل در لوگزامبورگ با استفاده از مدل WetSpa در محیط GIS پرداختند. آنها از داده‌های ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۹ برای کالیبراسیون مدل و از داده‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۱ برای واسنجی و ارزیابی مدل استفاده کردند. آنها در تحقیق مذکور ضمن استفاده از سناریوهای تغییر کاربری (افزایش مناطق شهری، جنگل‌کاری و جنگل‌زدایی) به شاخص آماری ناش ـ ساتکلیف ۸۱ درصد دست یافتند و نتیجهٔ تحقیق‌شان نشان داد که با اعمال سناریوهای تغییر کاربری، تغییرات محسوسی در حجم سیلاب، دبی پیک و زمان رسیدن به دبی پیک حاصل می‌شود. بهره‌مند (۲۰۰۶) در پایان‌نامه دکتری‌اش شبیه‌سازی جریان رودخانه را با مدل WetSpa در رودخانه هورنارد اسلواکی انجام داد. نتایج تحقیق وی انطباق خوبی را بین هیدروگراف حاصل از مدل و هیدروگراف مشاهداتی نشان داد و مدل با استفاده از معیار ناش ـ ساتکلیف، هیدروگراف‌های روزانه را با دقت ۷۵ تا ۸۵ درصد پیش‌بینی کرد. بهره‌مند همچنین تأثیرات تغییر کاربری اراضی را بر روی سیلاب آبریز مارگسانی ـ هورنارد در اسلواکی بررسی کرد و به این نتیجه رسید که اجرای سناریوهای جنگل‌کاری باعث کاهش ۱۲ درصدی دبی پیک شده است و زمان تا اوج هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده را ۲۰ ساعت طولانی‌تر از زمان تا اوج هیدروگراف‌های کاربری فعلی کرده است. نورمحمد و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیقی با عنوان مدل‌سازی هیدرولوژیک رودخانه حوضه بالایی سورینام با استفاده از مدل WetSpa و GIS با استفاده از نقشه‌های ورودی پایه و اطلاعات هواشناسی از سال ۱۹۷۸ تا ۱۹۸۳ به آزمون مدل در حوضه‌ای گرمسیری پرداختند. آنها بیلان آبی و هیدروگراف خروجی حوضه را شبیه‌سازی کردند. نتایج این تحقیق شاخص ناش ـ ساتکلیف ۸۵ درصد را به دست داد. زینی‌وند (۲۰۰۹) ماژول‌هایی را برای شبیه‌سازی ذوب برف و فرسایش خاک و انتقال رسوب مدل WetSpa ارائه کرد. ماژول ذوب برف در ۳ حوضه آبریز هورناد اسلواکی، حوضه مارگسانی ـ هورناد و حوضه آبریز سد لتیان به‌کار گرفته شد و با استفاده از معیار ناش ـ ساتکلیف به ترتیب ۷۹٪ ، ۷۹٪ و ۸۰٪ برای جریان رودخانه به دست آمد. ماژول فرسایش و انتقال رسوب هم در حوضه‌های آبریز مارک بک، هورناد و سد لتیان آزمون شد و نتایج، قابلیت بالای ماژول را در شبیه‌سازی جریان رودخانه و فرسایش و رسوب در حوضه‌های آبریز ذکرشده، نشان داد.

زینی‌وند و دوسمت (۲۰۰۹b) به شبیه‌سازی توزیع مکانی فرسایش خاک و رسوب در مقیاس حوضه پرداختند. آنها در ماژول فرسایش خاک، با استفاده از معادلات فیزیکی مربوط به تأثیرات قطرات باران بر روی خاک و نیروی برشی رواناب، فرسایش خاک حوضه هورناد اسلواکی را شبیه‌سازی کردند. در این مطالعه شاخص ناش ـ ساتکلیف برای دبی، رسوب معلق و بار رسوبی به ترتیب برابر ۹۶، ۴۶ و ۹۳ درصد به دست آمده است. صفری و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی که هم‌سو با فاز دوم ارزیابی مدل‌های توزیعی چند حوضه واقع در منطقه اوکلاهما، آرکانزاس و میسوری انجام دادند، به منظور آزمون مدل WetSpa به شبیه‌سازی جریان پرداختند. اطلاعات بارندگی در تحقیق ایشان، داده‌های رادار با مقیاس زمانی یک‌ساعته و داده‌های پایه (نقشه کاربری زمین، مدل رقومی ارتفاع و نقشه خاک‌شناسی) با دقت مکانی ۳۰ متر در دسترس بودند و برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل نیز از آمار ۱۷ ایستگاه هیدرومتری استفاده کردند. در پژوهش مذکور به منظور ارزیابی عملکرد مدل در حوضه‌های فاقد آمار ابتدا نتایج اجرای مدل بدون انجام مراحل کالیبراسیون ارزیابی گردید. هر چند بعد از انجام فرایند کالیبراسیون نتایج عملکرد مدل ارتقا می‌یابد اما اجرای مدل در این منطق حتی بدون کالیبراسیون آن رضایتبخش بوده است. در نتایج کالیبراسیون مدل، شاخص آماری ناش ـ ساتکلیف را ۷۰ تا ۹۰ و نتایج اعتبارسنجی آن را ۵۵ تا ۸۵ درصد محاسبه گردید. در مطالعه حاضر ابتدا جریان روزانه رودخانه حوضه مرک کرمانشاه ـ با مساحت ۱۳۸۰ کیلومتر مربع ـ با استفاده از مدل WetSpa در محیط GIS شبیه‌سازی شد و بعد از کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل به تحلیل تأثیرات تغییر کاربری بهینه بر روی جریان ـ به‌ویژه دبی پیک جریان ـ پرداخته شد. بدین صورت که ابتدا نقشه کاربری بهینه حوضه با استفاده از مدل آمایش سرزمین مخدوم تهیه شد و مجدداً جریان رودخانه به‌وسیلهٔ مدل کالیبره‌شده، شبیه‌سازی گردید. لازم به ذکر است که در اینجا برای نخستین بار در کشور از مدل توزیع‌یافتهٔ مکانی WetSpa برای شبیه‌سازی و تحلیل تأثیرات تغییر کاربری بهینه روی جریان روزانه، استفاده می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی

محدوده مورد مطالعه حوضه آبریز مرک به وسعت حدوداً ۱۳۸۰ کیلومتر مربع واقع در استان کرمانشاه است و از نظر هیدرولوژی، حوضه آبریزی مستقلی به شمار می‌آید. این منطقه بین ″55 ′21 °46 تا ″20 ′22 °46 طول شرقی و ″1 ′0 °34 تا ″25 ′53 °34 عرض شمالی واقع شده و منطقه‌ای کوهستانی است که دشت ماهیدشت در قسمت مرکزی آن قرار گرفته است. در شکل ۱ موقعیت حوضه آبریز مرک در ایران و استان کرمانشاه نمایش داده شده است.



شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز مرک در ایران و استان کرمانشاه

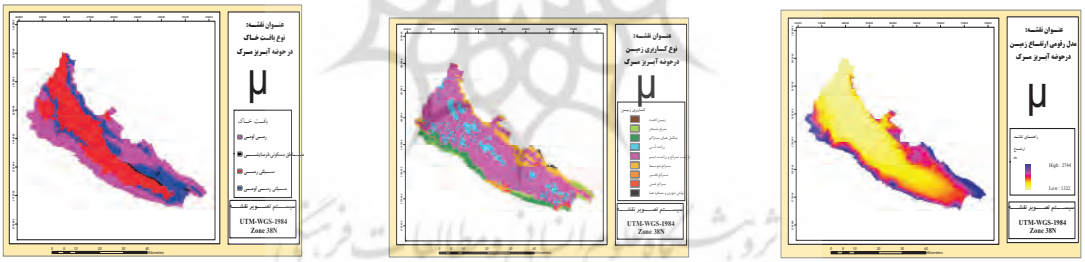
۲-۲- داده‌ها

در پژوهش حاضر به‌منظور شبیه‌سازی جریان رودخانه و بررسی تأثیر تغییر کاربری بهینه روی آن، از داده‌های زیر استفاده گردید:

الف) نقشه‌کاربری اراضی حوضه آبریز مرک تهیه‌شده در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور به‌منظور تولید نقشه‌های توزیعی پوشش گیاهی. طبق گزارش‌های موجود، این نقشه از تصویر ماهواره‌ای

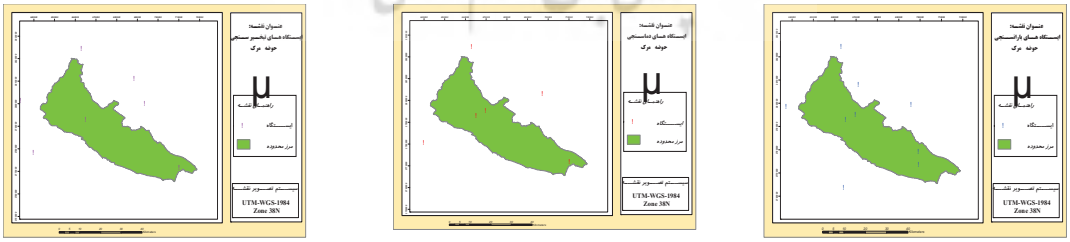
لندست سال ۲۰۰۵ با روش طبقه‌بندی نظارت‌شده[1] و تفسیر چشمی تهیه شده است. ب) نقشه بافت خاک حوضه مرک. در این حوضه، مطالعه خاک‌شناسی نیمه‌تفصیلی خاک‌شناسی به‌وسیلهٔ بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه انجام گرفت و نقشهٔ بافت خاک طبق این گزارش‌ها و نقشه‌های خاک‌شناسی منطقه تولید شد. ج) مدل رقومی ارتفاع راداری (SRTM[2]) حوضه آبریز مرک. د) نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ از سازمان نقشه‌برداری کشور به‌منظور کنترل دقت مدل رقومی ارتفاع راداری. هـ) نقشه حساسیت به فرسایش خاک حوضه تهیه‌شده در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور به منظور استفاده در مدل آمایش سرزمین. و) نقشه تراکم پوشش گیاهی حوضه تهیه‌شده در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور به منظور استفاده در مدل آمایش سرزمین. ز) داده‌های اقلیمی: در بررسی هوا و اقلیم حوضه مرک از دوره آماری ۱۵ساله (۲۰۰۵-۱۹۹۰) و ۲۵ ایستگاه باران‌سنجی، ۸ ایستگاه دماسنجی و ۱۱ ایستگاه تبخیرسنجی منطقه استفاده شد. سه نقشه پایه مدل رقومی زمین، کاربری اراضی و بافت خاک در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند.

برای انجام این تحقیق محدوده جغرافیایی بزرگ‌تری در اطراف حوضه مرک به نحوی انتخاب شد که به تعداد ایستگاه هواشناسی کافی و واجد آمار معتبر دسترسی حاصل شود. بعد از جمع‌آوری آمار و اطمینان از ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی دقیق ایستگاه‌ها با استفاده از تکنیک پلی‌گون‌های تیسن و مرز منطقه مطالعاتی، ایستگاه‌های مؤثر منطقه به‌منظور استفاده در مدل مشخص شدند و ایستگاه‌هایی که فاصله زیادی از منطقه داشتند حذف گردیدند. در نهایت ۹ ایستگاه باران‌سنجی، ۶ ایستگاه دماسنجی و ۷ ایستگاه تبخیرسنجی انتخاب شدند. موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده است.



الف- نقشه مدل رقومی ارتفاع زمین ب- نقشه نوع کاربری زمین ج- نقشه نوع بافت خاک

شکل ۲. نقشه‌های پایه حوضه آبریز مرک کرمانشاه



الف- نقشه موقعیت ایستگاه‌های بارانسنجی ب- نقشه موقعیت ایستگاه‌های دماسنجی ج- نقشه موقعیت ایستگاه‌های تبخیرسنجی

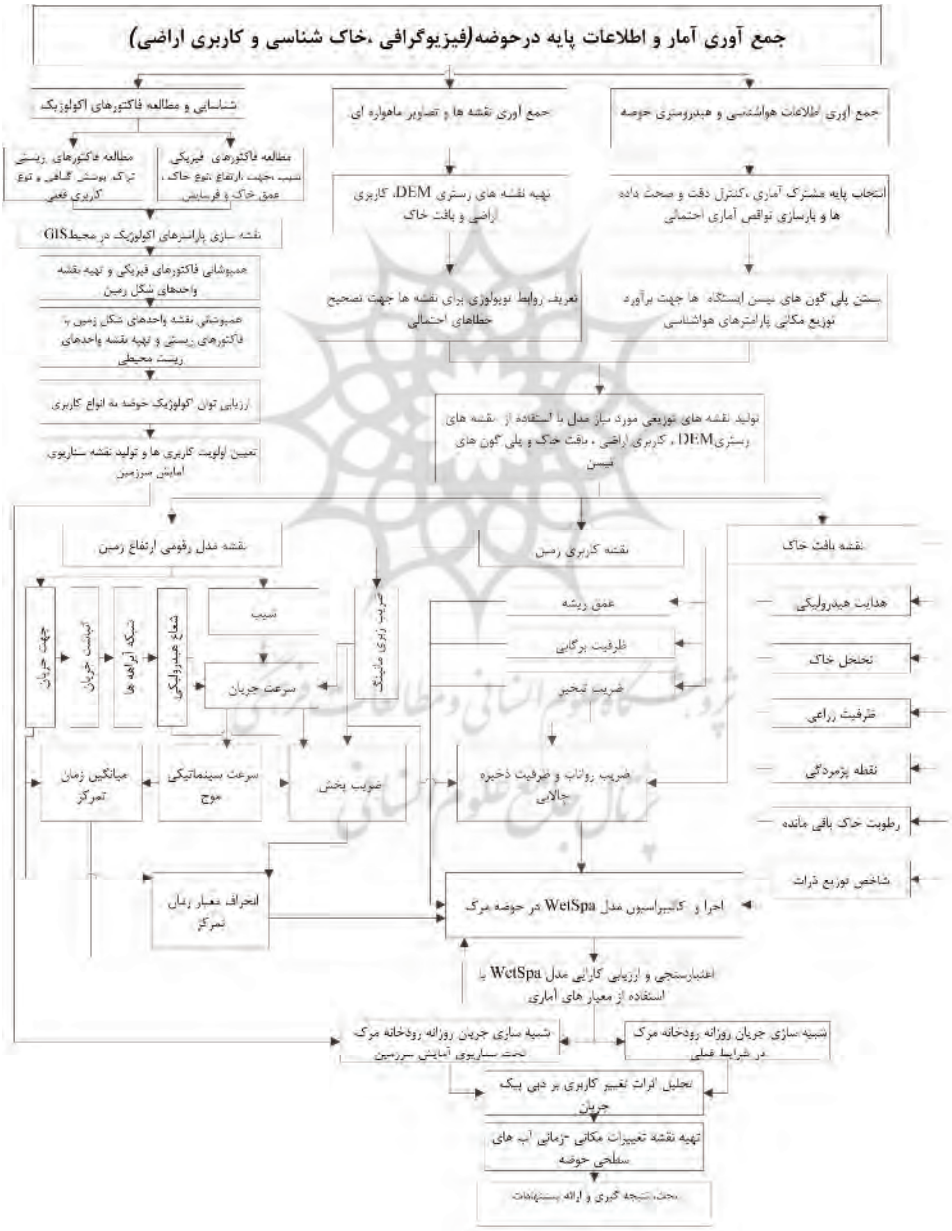
شکل ۳. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده

1. Supervised Classification
2. Shuttle Radar Topography Mission

در مطالعــه حاضــر ابتــدا آمــار پایــه هواشناســی جمع‌آوری گردید و مورد بازبینی لازم قرار گرفت و پس از اطمینان از صـحت و سـقم آنهـا، عملیـات تـصحیح، تکمیل و رفع نواقص بر روی آنها انجام شد. بـرای رفـع نـواقص آمـاری از روش همبـستگی و رگرسـیون بـین ایستگاه‌ها استفاده شد، با ایـن توضـیح کـه بـرای رفـع شکاف موجود در آمار بارندگی، از آمـار ایـستگاهی کـه بیشترین همبستگی را با ایستگاه ناقص داشت اسـتفاده شد. در موقع رفع نواقص آماری ایـستگاه‌هـای تبخیـر و تعرق نیز از همبستگی بین آمار دما و تبخیر بهره گرفته شد. بعد از این مرحله آمار هواشناسی مـورد نیـاز مـدل آماده گردید.

۲-۳- روش تحقیق

شکل ۴ روند نمای تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نمودار جریانی (روند نما) مراحل انجام تحقیق

۲-۳-۱- مدل Wetspa و مدل آمایش سرزمین مخدوم

الف) مدل WetSpa

مدل WetSpa را نخستین بار وانگ و همکارانش در سال ۱۹۹۶ ابداع کردند و سپس دوسمت (۲۰۰۰) و لی یو و دیگران (۲۰۰۳) و زینی‌وند و دوسمت (۲۰۰۹) آن را شرح و بسط دادند. این مدل نوعی مدل هیدرولوژیکی و فرسایش خاک است که باران اصلی‌ترین ورودی قیمت هیدرولوژیکی آن به شمار می‌آید. از آنجا که مدل براساس شبکهٔ سلولی طراحی شده است، برای هر شبکهٔ سلولی، ۴ لایه در جهت عمودی در نظر گرفته می‌شود (Liu et al. 2004) که عبارت‌اند از: لایه تاج پوشش، زون ریشه، زون انتقال و زون اشباع. مندل در هر شبکه سلولی با توجه به میزان بارش، دما و تبخیر و تعرق، مقدار ذخیره برگابی گیاهان، ذخیره چالابی، میزان نفوذ و رواناب تولیدی را شبیه‌سازی می‌کند. ساختار مفهومی مدل WetSpa در شکل ۵ نشان داده شده است. مدل مذکور ابتدا تعادل آب در زون ریشه را محاسبه می‌کند، چرا که مهم‌ترین بخش در نگه‌داشت آب به شمار می‌آید و همچنین کنترل‌کنندهٔ حجم رواناب سطحی و زیرسطحی، تبخیر و تعرق و دبی آب زیرزمینی است. در توصیف فرایندهای هیدرولوژیکی مدل از ترکیبی روابط فیزیکی و تجربی استفاده شده است.

محاسبه تعادل آب در زون ریشه برای هر شبکه سلولی مطابق رابطه (۱) صورت می‌گیرد:

$$D\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = P - I - S - E - F - R \qquad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن $D[L]$ عمق ریشه، $\Delta\theta[L^3L^{-3}]$ تغییرات رطوبتی خاک، $\Delta t[T]$ فواصل زمانی، $P[LT^{-1}]$ بارش، $I = Ia + Da[LT^{-1}]$ تلفات اولیه شامل ذخیره برگابی و ذخیره چالابی در گام زمانی، $S[LT^{-1}]$ رواناب سطحی یا بارش مازاد، $E[LT^{-1}]$ تبخیر و تعرق، $R[LT^{-1}]$ نرخ نفوذ عمقی از زون ریشه و $F[LT^{-1}]$ نرخ جریان زیرسطحی در زمان است. در این مدل بارش مازاد با استفاده از روش ضریب رواناب مبتنی بر رطوبت خاک و برمبنای خصوصیات هر شبکه شامل شیب، کاربری، نوع خاک، میزان بارش و رطوبت پیشین خاک محاسبه می‌گردد (رابطه ۲).

$$V = C(P - I)(\theta/\theta_S)^a \qquad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن θ_S پروزیته خاک، C ضریب پتانسیل رواناب و α ضریبی است که نماینده تأثیرات شدت بارندگی بر میزان بارش مازاد است. میزان نفوذ عمقی به خارج از زون ریشه به صورت تابعی از محتوای رطوبتی خاک، پروزیته خاک و میزان هدایت هیدرولیکی اشباع بیان می‌شود و میزان جریان زیرسطحی نیز براساس قانون دارسی و معادلات موج سینماتیکی محاسبه می‌گردد.

شکل ۵. ساختار مدل مفهومی WetSpa در مقیاس پیکسل

به این علت که جریان آب زیرزمینی بسیار آهسته‌تر از حرکت آب در سطح و نزدیک به سطح است، جریان آب زیرزمینی به صورت مخزن خطی یکپارچه در مقیاس زیرحوضه تعریف می‌گردد. در این مدل می‌توان به طور اختیاری از روش مخزن غیرخطی نیز استفاده کرد. 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 کل جریان به سمت خروجی کل حوضه روندیابی می‌شود.

روندیابی جریان سطحی و جریان آبراهه با استفاده از روش معادلات تقریب موج پخشی سنت ونانت انجام می‌گیرد (رابطه ۳).

رابطه (۳)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = d\frac{\partial^2 Q}{\partial X^2} - C\frac{\partial Q}{\partial X}$$

که در آن Q دبی برحسب مترمکعب بر ثانیه، t زمان، X مسافت در جهت جریان، و C سرعت موج سینماتیکی در پیکسل است.

برای تعیین تابع پاسخ جریان در انتهای مسیر از رابطه (۴) که تابع پاسخ خطی سنت ونانت است استفاده می‌گردد:

رابطه (۴)

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

که در آن U(t) تابع پاسخ مسیر جریان برای تعیین هیدروگراف واحد لحظه‌ای جریان است و روندیابی مسیر جریان تا خروجی حوضه را ممکن می‌سازد. t زمان جریان و σ انحراف استاندارد زمان جریان است که هر یک برطبق فرمول محاسبه می‌شوند. در نهایت هیدروگراف‌های رواناب مستقیم در خروجی حوضه یا هر نقطه در پایین‌دست که جریان به هم می‌پیوندد از رابطه (۵) (رابطه حلقه‌ای جریان) محاسبه می‌گردد:

رابطه (۵)

$$Q(t) = \int A \int_\circ^t V(\tau)U(T-\tau)d_z d_A$$

که در آن Q(t) میزان دبی خروجی، U(t) تابع پاسخ مسیر جریان، τ تأخیر زمانی و V حجم رواناب خروجی است.

ب) مدل آمایش سرزمین مخدوم

تولید نقشهٔ تغییر کاربری این تحقیق با شیوه تجزیه و تحلیل سیستمی (مخدوم، ۱۳۷۸) انجام شده است. این روش که در اصل روش ارزیابی منابع محیطی است، کاربری‌هایی نظیر جنگل، مرتع، کشاورزی، آبزی‌پروری، تفرج و گردشگری، و توسعه شهری و روستایی را تعیین و درجه‌بندی می‌کند. ارزیابی و تعیین سرزمین برای هر یک از کاربری‌های ذکرشده با مقایسهٔ پارامترهای زیستی و غیرزیستی هر نقطه از سرزمین و مدل‌ها از پیش ساخته شده برای هر یک از کاربری‌ها انجام می‌پذیرد. به همین دلیل وجود پارامتر اکولوژیکی در هر واحد (فضایی از سرزمین) دلیلی بر توان سرزمین برای انواع کاربری‌ها قلمداد می‌شود. از مهم‌ترین این موارد فاکتورهایی نظیر شیب، ارتفاع، جهت، بافت و عمق خاک، پوشش گیاهی، اقلیم و مانند اینهاست. تجزیه و تحلیل و جمع‌بندی داده‌ها در این روش با استفاده از نقشه و ترکیب آنها صورت می‌گیرد؛ بدین نحو که منابع اکولوژیکی حوضهٔ آبخیز نقشه‌سازی می‌شود و پارامترهای تشکیل‌دهندهٔ اکوسیستم به گونه‌ای با هم ترکیب می‌شوند که مرز اکوسیستم‌ها بر روی نقشه مشخص گردد. بدین ترتیب واحدها و یا یگان‌های به‌دست‌آمده در واقع اکوسیستم خرد را نشان می‌دهند و از آنجا که یگان‌های به‌دست‌آمده از ترکیب تعداد زیادی از پارامترهای اکولوژیکی به وجود می‌آیند، بهتر می‌توانند توان سرزمین را نمایان سازند ـ این قابلیت بر اصل ارجحیت روش‌های ارزیابی چندعامله به روش‌های تک‌عامله یا دوعامله استوار است. واحدهای فوق را واحدهای زیست‌محیطی می‌نامند (مخدوم، ۱۳۷۸). در پژوهش حاضر فقط از منابع اکولوژیک پایدار برای ارزیابی و طبقه‌بندی سرزمین استفاده شده و در ادامه مراحل نقشه‌سازی این منابع آورده شده است. به دلیل گستردگی زیاد طبقات هر مدل (هفت

طبقه در هر مدل) و شرایط پارامترهای محیطی آنها، از آوردن تمامی آنها در این بخش صرف‌نظر شده است. علاقه‌مندان می‌توانند برای مطالعه بیشتر مخدوم (۱۳۸۷) را مطالعه کنند. قابل ذکر است که در تحقیق حاضر، ارزیابی آمایش سرزمین به تمامی طبقات انجام شد اما با توجه به هدف (که بررسی تأثیرات تغییر کاربری روی رفتار هیدرولوژیکی رودخانه است) بیشترین تأکید روی مدل‌های کاربری جنگل‌داری، کاربری‌های کشاورزی و مرتع‌داری، حفاظت محیط زیست و توسعه شهری بوده است.

۲-۴- شبیه‌سازی جریان روزانه با کاربری فعلی

به‌منظور استفاده از مدل توزیعی، WetSpa و نقشه‌های بافت خاک و کاربری زمین به صورت نقشه‌های رستری ۶۰ متری درآمدند. در گام بعدی بایستی نقشه‌های پارامترهای فیزیکی ـ هیدرولوژیکی مورد نیاز برای شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از سه نقشه پایه (نقشه کاربری اراضی، بافت خاک و مدل رقومی ارتفاع) در محیط GIS و با استفاده از جداول مرجع مدل ساخته می‌شدند. در تحقیق حاضر تمامی این نقشه‌ها (حدود ۳۰ نقشه) تولید و در یک پایگاه داده ذخیره شدند. سپس با استفاده از آمار ۳ساله (از ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵) بارندگی، دما و تبخیر روزانه مدل WetSpa در منطقه مرک به اجرا درآمد و بعد از کالیبراسیون آن با استفاده از آمار سال ۲۰۰۵، مدل با استفاده از آمار ۲ سال باقی‌مانده (۲۰۰۳ و ۲۰۰۴) مورد ارزیابی (اعتبارسنجی) قرار گرفت.

۲-۵- ارزیابی کارایی مدل WetSpa

برای ارزیابی نتایج خروجی مدل از معیارهای آماری زیر استفاده می‌شود.

۲-۵-۱- معیار ناش ـ ساتکلیف[1] (NS)

ناش و ساتکلیف (۱۹۷۰) یک ضریب بی‌بعد به نام کارایی مدل NS ارائه کردند، که دقت شبیه‌سازی مدل را نشان می‌دهد و شامل استاندارد واریانس باقی‌مانده‌هاست (رابطه ۶). این معیار از مقادیر منفی تا ۱ تغییر می‌کند و هر چه به ۱ نزدیک‌تر می‌شود تناسب بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد (Nash and Sutcliffe, 1970).

رابطه (۶)
$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Qs_i - Qo_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(Qo_i - \overline{Qo}\right)^2}$$

۲-۵-۲- معیار ناش ـ ساتکلیف برای جریان‌های کم[2] (NSL)

این معیار لگاریتم ناش ـ ساتکلیف (رابطه ۱۰) است که برای جریان‌های کم مناسب است. در واقع با این معیار کیفیت شبیه‌سازی جریان‌های کم ارزیابی می‌گردد و بهترین مقدار آن ۱ است (Nash and Sutcliffe, 1970).

رابطه (۷)
$$NSL = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left[\ln\left(Qs_i + \varepsilon\right) - \ln\left(Qo_i + \varepsilon\right)\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}\left[\ln\left(Qo_i + \varepsilon\right) - \ln\left(\overline{Qo} + \varepsilon\right)\right]^2}$$

۲-۵-۳- معیار ناش ـ ساتکلیف برای جریان‌های زیاد[3] (NSH)

این معیار نیز همان ناش ـ ساتکلیف است که برای جریان‌های زیاد سازگار شده است. به این صورت که وزن بیشتری به جریان‌های بیشتر (زیادتر) اختصاص می‌دهد (رابطه ۸). بهترین مقدار این معیار ۱ است (Nash and Sutcliffe, 1970).

رابطه (۸)
$$NSH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Qo_i + \overline{Qo}\right)\left(Qs_i - Qo_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(Qo_i + \overline{Qo}\right)\left(Qo_i - \overline{Qo}\right)^2}$$

در این رابطه‌ها، Qs_i دبی شبیه‌سازی‌شده، Qo_i دبی مشاهداتی در گام زمانی i (m^3/s)، $\overline{Qo}$ نشان‌دهنده میانگین دبی مشاهداتی و N تعداد گام‌های زمانی است.

1. Nash Sutcliffe coefficient
2. Nash Sutcliffe coefficient for low flow
3. Nash Sutcliffe coefficient for high flow

ε مقدار قراردادی جزئی است که برای اجتناب از مقدار صفر در مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در نظر گرفته می‌شود.

۲-۶- تولید نقشهٔ کاربری بهینه با استفاده از مدل آمایش سرزمین مخدوم

بعد از تأیید عملکرد مدل، بایستی به تحلیل تأثیرات تغییر کاربری بهینه روی جریان روزانه با مدل کالیبره‌شده پرداخت. برای این منظور در این مرحله اقدام به تولید نقشه کاربری بهینه با مدل آمایش سرزمین مخدوم شد. پس از به‌کارگیری مدل‌های اکولوژیکی مخدوم برای تعیین تناسب عرصه به انواع کاربری‌های هفت‌گانهٔ جنگل‌داری، کشاورزی ـ مرتع‌داری، آبزی‌پروری، تفرج و گردشگری، توسعه شهری و روستایی و حفاظت، در نهایت مرحله دوم آمایش انجام پذیرفت که براساس آن بین گزینه‌های موجود، بهترین گزینه به عنوان کاربری پیشنهادی برای هر یک از واحدهای سرزمین براساس اولویت‌بندی کاربری به روش کیفی ـ قیاسی انتخاب گردید. ارزیابی و تعیین توان سرزمین برای هر یک از کاربری‌ها با مقایسهٔ پارامترهای زیستی و غیرزیستی هر نقطه از سرزمین، و مدل‌های از پیش ساخته‌شده برای هر یک از کاربری‌ها انجام می‌پذیرد. با این دیدگاه، کاربری مورد انتخاب طبیعی اکوسیستم ـ که کاربری بهینه است ـ حاصل می‌گردد. فرایند ارزیابی توان اکولوژیکی حوضه آبریز مرک مراحلی که در پی می‌آیند، انجام شد:

۲-۶-۱- تهیه نقشه‌های طبقات ارتفاعی، شیب و جهت

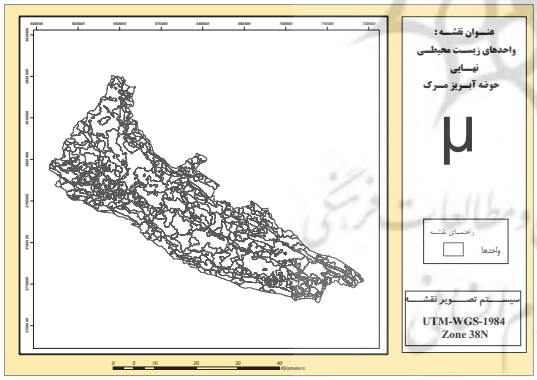
برمبنای مدل رقومی زمین‌نقشهٔ جهت‌های جغرافیایی با ۹ طبقه، نقشه طبقات ارتفاعی با ۸ طبقه پیشنهادی برای نیم‌رخ زاگرس (مخدوم، ۱۳۷۸) و نقشه شیب با تعداد ۹ طبقه، پیشنهادی مخدوم (مخدوم، ۱۳۷۸) تهیه گردید.

۲-۶-۲- تهیه نقشه‌های واحدهای شکل زمین

برای تهیه نقشه واحدهای شکل زمین نقشه‌های طبقات شیب، طبقات ارتفاعی و طبقات جهت‌های جغرافیایی به شیوهٔ دو ترکیبی با یکدیگر تلفیق شدند.

۲-۶-۳- تهیه نقشه واحدهای زیست‌محیطی پایه یک و نهایی

پس از روی‌هم‌گذاری نقشه واحد شکل زمین و نقشه طبقات خاک، واحد زیست‌محیطی پایه یک تهیه گردید. سپس نقشه تیپ (کاربری فعلی) و تراکم پوشش گیاهی تهیه‌شده در مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور با استفاده از اطلس کاربری اراضی و پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در نهایت از تلفیق نقشهٔ زیست‌محیطی پایه یک با نقشه تراکم، نقشه واحدهای زیست‌محیطی پایه ۲ و از تلفیق آن با نقشه تیپ پوشش گیاهی (کاربری فعلی) نقشه واحدهای زیست‌محیطی نهایی (شکل ۶) تهیه گردید.



شکل ۶. نقشه واحدهای زیست‌محیطی نهایی در منطقه مطالعاتی

۲-۶-۴- جمع‌آوری اطلاعات از منابع زیست‌محیطی و تنظیم جدول واحدهای زیست‌محیطی

برای تنظیم جدول ویژگی‌های واحدهای زیست‌محیطی و ارزیابی توان اکولوژیکی حوضه، علاوه بر اطلاعاتی که به صورت نقشه تهیه گردید، برخی دیگر از منابع

اکولوژیکی حوضه نظیر کاربری اراضی و حساسیت به فرسایش در جدولی مشابه جدول ۱ برای تمامی ۵۷۷ واحد زیست‌محیطی نهایی تنظیم گردید. در اینجا به عنوان نمونه تنها جدول مربوط به ۶ واحد زیست‌محیطی نهایی ارائه شده است.

۲-۶-۵- تعیین اولویت کاربری‌ها و تولید نقشه آمایش سرزمین

در نهایت کار ارزیابی توان اکولوژیکی تمام واحدهای نقشهٔ زیست‌محیطی نهایی، برای هفت کاربری جنگل‌داری، کشاورزی و مرتع‌داری، آبزی‌پروری، حفاظت محیط‌زیست، تفرج متمرکز، تفرج گسترده، و توسعه شهری، روستایی و صنعتی برای تمامی ۵۷۷ واحد زیست‌محیطی انجام گرفت؛ که نتایج مربوط به چند واحد کاری به عنوان نمونه در جدول ۲ آورده شده است.

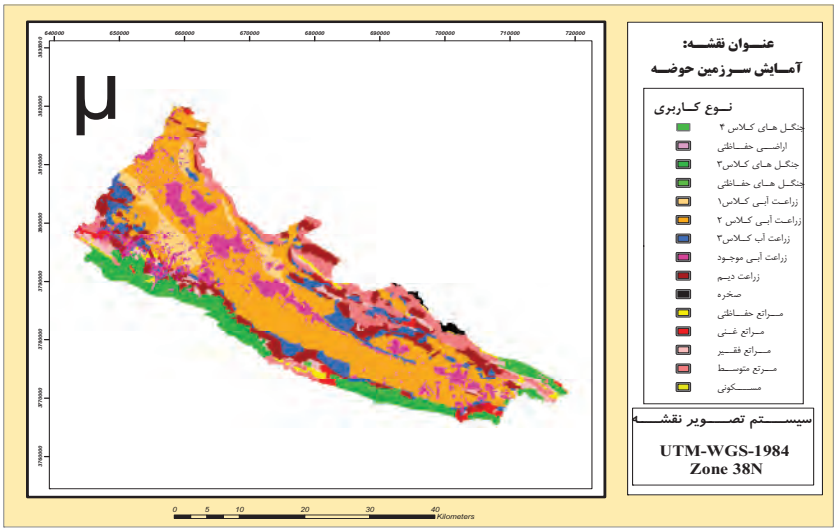
در این تحقیق از روش اولویت‌بندی قیاسی کیفی استفاده شد و با مقایسهٔ پیش‌فرض‌های مدل اکولوژیکی مخدوم توان اکولوژیکی برای هر ۵۷۷ واحد زیست‌محیطی تعیین و پس از ساماندهی منطقی کاربری‌های اولویت‌یافته در سطح حوضه آبریز مرک و انتخاب بهترین توان، نقشه آمایش سرزمین حوضه مرک تهیه گردید. در شکل ۷ نقشه آمایش حوضه آبریز مرک نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات واحدهای زیست‌محیطی نهایی در حوضه آبریز مرک

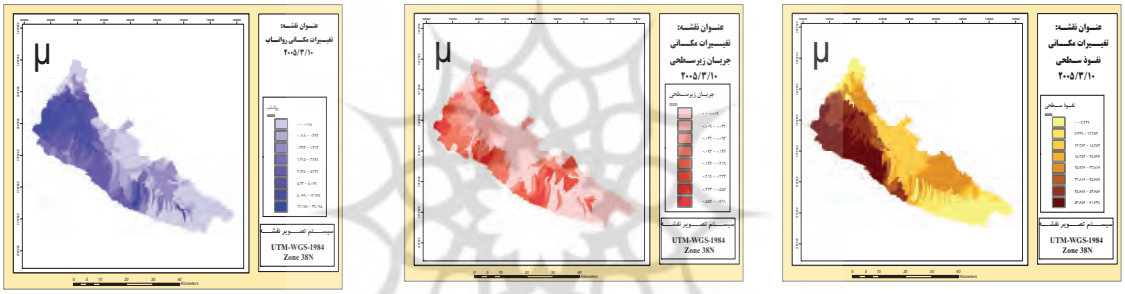
احتمال فرسایش	اقلیم	کاربری فعلی	تراکم پوشش گیاهی	واحدهای زیست محیطی پایه یک	تیپ خاک	واحدهای شکل زمین	جهات جغرافیایی	واحدهای مقدماتی شکل زمین	طبقات شیب (درصد)	طبقات ارتفاعی (متر)	واحدهای زیست محیطی نهایی
متوسط	مرطوب سرد	جنگل	زیاد	۱۱۷۳	۶ (لومی رسی نیمه عمیق)	۳۹۰	۳ (شمال شرقی)	۴۴	۸ (بیش از ۶۵)	۵ (۲۲۰۰ –۲۶۰۰)	۷۰۳۳
کم	نیمه‌مرطوب سرد	زراعت دیم	کم	۷۴۰	۸ (رسی لومی نیمه عمیق)	۲۴۵	۲ (شمالی)	۲۸	۱ (۰–۲)	۴ (۱۸۰۰ –۲۲۰۰)	۴۴۳۸
متوسط	مرطوب سرد	مرتع‌داری	متوسط	۷۸۰	۶ (لومی رسی نیمه عمیق)	۲۵۹	۷ (جنوب غربی)	۲۹	۲ (۲–۵)	۴ (۱۸۰۰ –۲۲۰۰)	۴۶۷۶
کم	نیمه‌مرطوب سرد	زراعت دیم	کم	۷۷۹	۸ (رسی لومی نیمه عمیق)	۲۵۸	۶ (جنوبی)	۲۹	۲ (۲–۵)	۴ (۱۸۰۰ –۲۲۰۰)	۴۶۷۲
متوسط	نیمه‌مرطوب سرد	زراعت دیم	کم	۵۲۵	۶ (لومی رسی نیمه عمیق)	۱۷۴	۳ (شمال شرقی)	۲۰	۲ (۲–۵)	۳ (۱۴۰۰–۱۰۰۰)	۳۱۴۸
خیلی کم	نیمه‌مرطوب سرد	زراعت آبی	متوسط	۵۱۵	۸ (رسی لومی نیمه عمیق)	۱۷۰	۸ (غربی)	۱۹	۱ (۰–۲)	۳ (۱۴۰۰–۱۸۰۰)	۳۰۸۷

جدول ۲. تعیین توان و اولویت کاربری‌ها در واحدهای زیست‌محیطی نهایی

تعیین اولویت (آمایش)	کاربری فعلی	توان کاربری شهری و صنعتی	توان کاربری حفاظت	توان کاربری گردشگری	توان کاربری آبزی‌پروری	توان کاربری کشاورزی و مرتع	توان کاربری جنگل	واحدهای زیست‌محیطی نهایی
حفاظت	جنگل	۰	۱	۰	۰	۷	۵	۷۰۳۳
زراعت آبی	زراعت دیم	۰	۰	۰	۰	۲	۵	۴۴۳۸
زراعت دیم	مرتعداری	۰	۰	۰	۰	۳	۴	۴۶۷۶
زراعت آبی	زراعت دیم	۰	۰	۰	۰	۲	۴	۴۶۷۲
زراعت دیم	زراعت دیم	۲	۰	۰	۰	۳	۳	۳۱۴۸
زراعت آبی	زراعت آبی	۲	۰	۰	۰	۲	۴	۳۰۸۷



شکل ۷. نقشه آمایش حوضه آبریز مرک



الف- نقشه تغییرات مکانی نفوذ سطحی ب- نقشه تغییرات مکانی جریان زیرسطحی ج- نقشه تغییرات مکانی رواناب سطحی

شکل ۸. الف) نقشه‌های تغییرات مکانی نفوذ سطحی، ب) جریان زیرسطحی، و ج) رواناب سطحی در روز ۲۰۰۵/۳/۱۰

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج حاصل از اجرای مدل برای کاربری فعلی

در پژوهش حاضر به‌منظور شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه، ابتدا تمامی مؤلفه‌های بیلان آبی نظیر بارش، ذوب برف، ذخیره برگابی، ذخیره چالابی، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیرسطحی و جریان آب زیرزمینی شبیه‌سازی شد و بعد از روندیابی جریان از تک‌تک پیکسل‌ها تا خروجی حوضه، دبی روزانه رودخانه در خروجی تمامی زیرحوضه‌ها و خروجی کل حوضه در گام زمانی روزانه به‌دست آمد. لازم به ذکر است که در مدل WetSpa، همهٔ مؤلفه‌های بیلان آبی و عوامل هیدرولوژیک مدل به‌صورت توزیعی ـ مکانی‌اند و به صورت نقشه می‌توان آنها را ارائه کرد. به‌عنوان نمونه، شکل ۸ نقشه تغییرات مکانی برخی مؤلفه‌های بیلان آبی را در روز ۲۰۰۵/۳/۱۰ نشان می‌دهد.

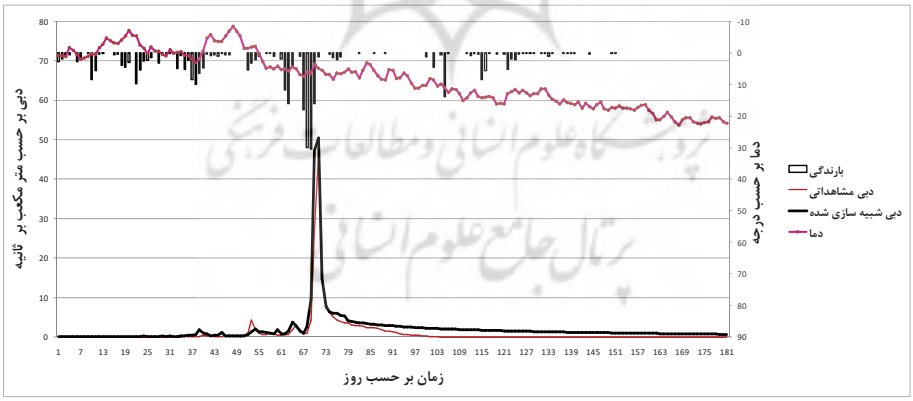
در شکل ۹ هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهداتی در زمانی که دبی جریان به بیشترین مقدار خود (دبی اوج) رسیده و فروکش کرده نشان داده شده است.

مقایسه ظاهری هیدروگراف‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی در دوره دبی اوج در حوضه آبریز مرک (شکل ۹) کارایی خوب مدل را برای شبیه‌سازی جریان نشان می‌دهد. وقتی بارندگی کم و خاک هنوز از آب

باران اشباع نشده است عکس‌العمل حوضه به بارندگی محسوس نیست و دبی رودخانه تغییر چندانی نمی‌کند و همین روند در هیدروگراف مشاهداتی و نیز هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده به‌وسیلهٔ مدل مشاهده می‌شود. با تداوم بارندگی و اشباع کامل خاک، حوضه به یک‌باره عکس‌العمل نشان می‌دهد که این امر موجب زیاد شدن شیب شاخه صعودی هیدروگراف‌ها می‌شود. همچنین مقایسه ظاهری هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی، یکسان بودن زمان رسیدن به دبی اوج در هر دو هیدروگراف را نشان می‌دهد، به طوری که زمان رسیدن به دبی اوج در هر دو هیدروگراف در یک روز بوده است.

۳-۲- کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل WetSpa

از آمار سه‌سالهٔ اندازه‌گیری شده (۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵) بارندگی، دما، تبخیر و دبی روزانه برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل استفاده شد. از آمار یک‌سالهٔ ۲۰۰۵ برای کالیبراسیون مدل بهره گرفته شد. در این مرحله بایستی به دفعات مختلف اقدام به اجرای مدل کرد و هر بار با توجه به شاخص‌ها و معیارهای آماری، نتایج را موررد ارزیابی قرار داد. در صورت رضایت‌بخش نبودن نتایج شبیه‌سازی، بایستی پارامترهای عمومی موجود در مدل بهینه شود و مدل مجدداً اجرا شود تا جریان شبیه‌سازی‌شده 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. از دلایل استفاده از آمار سال ۲۰۰۵ به منظور کالیبراسیون مدل، می‌توان به هم‌زمانی نقشهٔ کاربری زمین با این سال، رفع نسبی خشکسالی منطقه و نیز جدید بودن نسبی داده‌ها نام برد. در این مرحله با توجه به پارامترهای کالیبراسیون بهینه‌شده برای منطقه مطالعاتی، با استفاده از باقی‌ماندهٔ آمار (۲۰۰۴-۲۰۰۳) اقدام به شبیه‌سازی جریان رودخانه شد. میزان شاخص‌های ارزیابی مدل در مرحله کالیبراسیون و اعتبارسنجی در جدول ۳ ارائه گردیده است.



شکل ۹. مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی در زمان دبی اوج

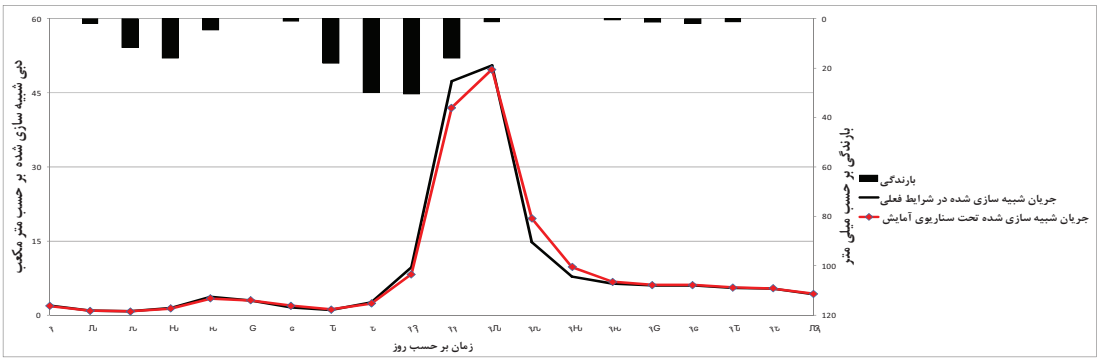
جدول ۳. ارزیابی کارایی مدل در مرحله کالیبراسیون

معیار ارزیابی	مشخصه	میزان در مرحله کالیبراسیون	میزان در مرحله اعتبارسنجی
معیار ناش- ساتکلیف	NS	۰/۸۱	۰/۷۷
معیار ناش- ساتکلیف برای جریان‌های کم	NSL	۰/۵۸	۰/۴۸
معیار ناش- ساتکلیف برای جریان‌های زیاد	NSH	۰/۸۸	۰/۸۶

همان‌طور که اشاره شد، شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از شیوه‌های سنتی (مدل‌های یکپارچه) به دلیل نادیده گرفتن تغییرات زمانی کوتاه‌مدت جریان (مثلاً روزانه) و ادغام این تغییرات طی عمل میانگین‌گیری، و همچنین به دلیل اینکه در مرحله ارزیابی نیز از میانگین داده‌های مشاهداتی استفاده می‌شود بدیهی است که به دقت‌های بالا (حتی ۹۵ درصد) برسد. اما در تحقیق حاضر به شبیه‌سازی تغییرات روزانه جریان پرداخته می‌شود که به پیچیده‌تر بودن فرایند را نشان می‌دهد. بنابراین رسیدن به دقت‌های بالای ۵۵ درصد در این مدل‌ها می‌تواند بسیار رضایت‌بخش باشد (صفری و همکاران، ۲۰۱۰)، چرا که دقت مکانی و زمانی‌ای که در این شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته می‌شود به مراتب سخت‌گیرانه‌تر از مدل‌های یکپارچه سنتی است. در مورد ویژگی‌های مهم هیدروگراف از قبیل دبی پیک لحظه‌ای، حجم رواناب و زمان رسیدن به دبی اوج، بین دو هیدروگراف تطابق مناسبی وجود دارد که با یافته‌های بهره‌مند و همکاران (۲۰۰۶)، لیو و همکاران (۲۰۰۵)، ریتابولا و همکاران (۲۰۰۷) که این مدل را به ترتیب در حوضه آبریز اسلواکی، حوضه آبریز سویی مویی در ویتنام و در رودخانه سیمیو در محدوده دریاچه ویکتوریا در تانزانیا با هدف شبیه‌سازی جریان به کار برده‌اند، مشابهت دارد. همچنین نتایج این تحقیق با یافته‌های نورمحمد و همکاران (۲۰۰۶) و زینی‌وند و همکاران (۲۰۰۹)، و صفری و همکاران (۲۰۱۰) که این مدل را با هدف شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آبی در نقاط مختلف دنیا به کار گرفته‌اند مطابقت دارد. از اعتبارسنجی نتایج تحقیق با بررسی سوابق کاربرد مدل WetSpa در نقاط مختلف دنیا و نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان به توانایی مدل برای شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه پی برد.

۳-۳- نتایج و تحلیل تغییر کاربری (برنامه آمایش سرزمین) بر جریان شبیه‌سازی‌شده

به منظور ارزیابی تأثیرات تغییر کاربری حوضه بر روی جریان، به‌ویژه مقدار جریان پیک، از سناریوی تغییر کاربری تحت برنامه آمایش سرزمین (مدل دکتر مخدوم) استفاده شد. بعد از کالیبراسیون نهایی مدل، اقدام به اجرای مجدد آن و شبیه‌سازی جریان با فرض کاربری بهینه شد. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است نتایج این شبیه‌سازی با جریان شبیه‌سازی‌شدهٔ مدل برای کاربری فعلی مقایسه گردید. با مقایسهٔ درصد مساحت کاربری‌های فعلی و کاربری بهینه می‌توان پی برد که مساحت جنگل‌های منطقه از مقدار ۷ درصد کاربری فعلی به حدود ۱۲ درصد در کاربری بهینه افزایش می‌یابد. در کاربری مرتع نیز از حدود ۱۲ درصد در شرایط فعلی به حدود ۱۵ درصد در شرایط تغییر بهینه دست می‌یابیم و در طبقه مربوط به زراعت آبی نیز ۴۸ درصد به وسعت این طبقه در مقایسه با شرایط فعلی افزوده می‌شود. علاوه بر این تغییرات عمدهٔ کاربری، برخی تغییرات جزئی نیز حاصل شده است. با توجه به تغییرات ایجادشده در شرایط کاربری می‌توان چنین استدلال کرد که حجم و عمق ریشه‌دوانی در منطقه افزایش می‌یابد و این عامل باعث افزایش نفوذ آب در خاک، افزایش هدایت هیدرولیکی و افزایش ظرفیت ذخیره آب در خاک می‌شود که در نتیجهٔ آن حجم رواناب کاهش می‌یابد. با بالارفتن کسر پوشش زمین، ضریب زبری دامنه‌ها نیز بالا می‌رود که در نتیجهٔ آن، زمان تمرکز جریان افزایش می‌یابد و شکل هیدروگراف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، در کاربری فعلی دو مورد دبی پیک مشاهده می‌گردد که بعد از اجرای سناریوی تغییر کاربری بهینه، یکی از آنها پایین‌تر آمده اما دیگری تغییر چندانی نکرده است. دلیل این تفاوت آن است که با وجود بارندگی‌های متوالی در چند روز پیاپی، ابتدا پوشش گیاهی توانسته است تا حدودی از جاری شدن سیل ممانعت کند اما بایستی توجه داشت که ظرفیت نگه‌داشت پوشش گیاهی نیز محدود است و بعد از مدتی یک‌باره دبی اوج دوم حادث می‌شود.



شکل ۱۰. منحنی تأثیر تغییر کاربری روی جریان شبیه‌سازی شده

بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با افزایش پوشش گیاهی و سطوح جنگلی می‌توان حادث شدن دبی اوج را به تأخیر انداخت و با این عمل از خسارت شرایط سیلابی تا حدود زیادی در امان بود و فرصت کافی برای انجام اقدامات مدیریتی در حوضه را داشت. ضمن این که با این عمل می‌توان برای تغذیهٔ آب زیرزمینی نیز اقدامات مؤثری انجام داد. با توجه به شکل ۱۰ اختلاف چندانی در شرایط دیگر هیدروگراف (غیر از محدوده دبی اوج) دیده نمی‌شود. این وضعیت می‌تواند به چند دلیل باشد، یکم، در مقایسهٔ کاربری‌های فعلی و کاربری‌های بهینه تغییرات عمده‌ای دیده نمی‌شود چرا که سطح وسیعی از منطقه دشتی است و کاربری فعلی آن نزدیک به کاربری بهینه است ـ جز موارد اندکی که بیان شد. دوم، این شرایط می‌تواند نشان‌دهندهٔ تأثیرات هم‌زمان عوامل محیطی در بروز جریان خروجی باشد؛ یعنی علاوه بر نوع کاربری، عواملی نظیر خاک‌شناسی و شرایط هیدرولوژیکی نیز در تغییرات جریان مؤثرند و نباید انتظار داشت که با تغییر فقط یک پارامتر به تغییرات عمده‌ای در کل جریان نایل آمد. سوم، در مدل WetSpa طبقه زراعت آبی و زراعت دیم در یک دسته قرار می‌گیرند و نمی‌توان تغییرات بین‌دسته‌ای را بررسی کرد. در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که دبی اوج هیدروگراف بعد از تغییر کاربری بهینه پایین‌تر آمده است. مهندسان هیدرولوژی در اکثر حوضه‌های آبریز سیلابی به دنبال چنین شرایطی هستند، تا بتوانند با اعمال سناریوهای مختلف در حوضه‌ها دبی اوج و در واقع پتانسیل سیل‌خیزی حوضه‌ها را کاهش دهند.

۴- نتیجه‌گیری

در قرنی که در پیش رو داریم بشر با بحران‌های ناشی از کمبود آب روبه‌رو خواهد بود. برای استفاده و مدیریت بهینه منابع آب می‌بایست از فرایندها، پتانسیل‌ها و ویژگی‌های منابع آب کشور آگاهی کافی داشت. به همین دلیل، شناخت و به مدل درآوردن رفتار رودها و شریان‌های آبی به منظور برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و استفاده بیشتر و بهتر از پتانسیل‌های آنها ضرورتی جدی می‌یابد. جدیدالتأسیس بودن بیشتر ایستگاه‌های هیدرومتری، نواقص موجود در آمار اکثر این ایستگاه‌ها، قرار گرفتن بیشتر رودها در مناطق خشک، وضعیت بحرانی برداشت آب‌های زیرزمینی و لزوم توجه بیشتر به آب‌های سطحی، همگی دلایل بیشتر و ظریف‌تری را برای بیان ضرورت مدل‌سازی، پیش‌بینی و تولید نقشه‌های تغییرات مکانی ـ زمانی مؤلفه‌های بیلان آبی در حوضه‌های آبریز کشورمان در اختیار می‌نهند. در ارزیابی و بررسی حوضه‌های آبریز، اندازه‌گیری ـ که قابل اعتمادترین وسیله به شمار می‌آید ـ به تنهایی نمی‌تواند در کشف روابط پیچیدهٔ موجود در سیستم آبریزها مؤثر باشد و به همین دلیل مدل‌سازی مطرح می‌شود. در اینجا فنون و روش‌های «شبیه‌سازی این

سیستم‌ها با بهره‌گیری از مدل‌ها در محیط توانمند GIS» اهمیت ویژه‌ای می‌یابند.

در تحقیق حاضر پس از اجرای کامل مدل WetSpa و کالیبراسیون و اعتبارسنجی آن در حوضه آبریز مرک، جریان روزانهٔ این حوضه با دقت بالایی شبیه‌سازی شد و سپس اقدام به شبیه‌سازی و تحلیل تأثیرات تغییر کاربری روی آن با استفاده از مدل توزیع‌یافتهٔ مکانی WetSpa گردید. مدل توزیع‌یافتهٔ مکانی WetSpa، از مدل‌های توزیعی مناسبی است که در بسیاری از حوضه‌های آبریز در کشورهای مختلف برای شبیه‌سازی تمامی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی از جمله شبیه‌سازی جریان رودخانه در سطح پیکسل به‌کار گرفته شده است. توانایی مدل در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی پیچیدهٔ حوضه‌های آبریز در محیط GIS از یک سو و پیش‌بینی و تحلیل مکانی ـ زمانی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی نظیر رواناب سطحی، رطوبت خاک، سرعت آب و مانند اینها از سوی دیگر، این مدل را از مدل‌های یکپارچه که در آنها واحدهای کاری بزرگ‌تر از پیکسل مبنای عمل‌اند، متمایز ساخته است. از دیگر مزیت‌های مدل WetSpa این است که کلیه فرایندهای هیدرولوژیک در آن، نظیر بارش، ذوب برف، ذخیره برگابی، ذخیره چالابی، روانآب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیرسطحی و جریان آب زیرزمینی را می‌توان به صورت نقشه با گام زمانی روزانه ارائه کرد و امکان بررسی تغییرات روزانه، ماهانه و سالانهٔ مؤلفه‌های بیلان آبی را در تمام نقاط حوضه فراهم آورد. این ویژگی مدل برای مدیران و کارشناسان این امکان را فراهم می‌آورد که مناطق مختلف را از نظر پتانسیل ایجاد رواناب و رسوب شناسایی کنند و با تعریف سناریوهای مختلف مدیریتی برای آن عرصه‌ها، قبل از اجرای هرگونه عملیات نتایج آن را شبیه‌سازی و پیش‌بینی کنند و از بین سناریوهای مختلف بهترین سناریوی مدیریتی را برگزینند.

لازم به ذکر است که مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی پیچیده‌ای نیز ساخته شده‌اند که به داده‌ها و اطلاعات اندازه‌گیری‌شدهٔ فراوانی نیاز دارند و در بسیاری از حوضه‌های آبریز بسیاری از کشورها ـ از جمله ایران ـ چنین داده‌های اندازه‌گیری‌شده‌ای وجود ندارد و همین مسئله، به کارگیری این مدل‌ها را با مشکل مواجه ساخته است. بنابراین در انتخاب مناسب‌ترین مدل به منظور شبیه‌سازی فرایندهای حوضه آبریز، باید به مؤلفه‌هایی نظیر ویژگی‌های حوضه آبریز مورد مطالعه، توزیعی یا یکپارچه بودن، فیزیکی یا تجربی بودن ساختار آن، ساده یا پیچیده بودن و در دسترس بودن یا نبودن داده‌های مورد نیاز به عنوان ورودی مدل و یا واسنجی آن، توجه داشت.

در این مطالعه برای نخستین بار شبیه‌سازی جریان روزانهٔ رودخانه و تحلیل تأثیرات تغییر کاربری بهینه و جامع با مدل WetSpa در ایران صورت گرفته است و لذا نتایج این تحقیق می‌تواند برای مطالعات مختلف در حوضه‌های آبریز کشور ـ به‌ویژه مطالعات هیدرولوژی حوضه‌ای ـ بسیار راه‌گشا باشد و همچنین برای مدیریت و برنامه‌ریزی در زمینه منابع طبیعی، محیط زیست و منابع آب به کار گرفته شود.

۵- منابع

Ashour, R.A., 2000, **Description of a Simplified GIS-based Surface Water Model for an Arid Catchment in Jordan,** In: Proceeding of the 2000 ESRI user Conference, ESRI, San Diego, USA.

Amini Faskhudi, M., 2006, **Assessment Decision Models Using Fuzzy Programming Prioritized Group Model**, Esfahan University Journal.

Bahremand A., 2006, **Simulating the Effects of Reforestation on Floods Using Spatially Distributed Hydrologic Modeling and GIS,** Ph.D. thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

Batelaan, O., Wang, Z.M. & De Smedt, F., 1996, **An Adaptive GIS Toolbox for Hydrological Modelling**, 3-9, eds. Kovar, K. & Nachtnebel, H.P., Application of geographic information systems in hydrology and water resources management, IAHS Publ.

Bahremand, A., De Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y.B., Poorova, J., Velcicka, L. and Kunikova, E., 2007, **WetSpa Model Application for Assessing Reforestation Impacts on Floods in Margecany Hornad Watershed**, Slovakia,Water Resource Management, 21, 1373-1391.

Bayat, B., 2010, **Simulation of Daily Stream Flow and the Effects of Land Use Changes Using WetSpa Model in GIS (Case Study: Merek Watershed, Kermanshah Province)**, M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University, RS & GIS Department.

De Smedt, F., Liu, Y.B. & Gebremeskel, S., 2000, **Hydrological Modelling on a Catchment Scale Using GIS and Remote Sensed Land Use Information**, ed. Brebbia, C.A., 295-304, Risk Analyses II, WIT press, Southampton, Boston.

Farajzade, M., Karami, T., 2004, **Land Use Planning Using RS and GIS**, Journal of Geographical Research, Tehran University.

Gebremeskel, S., Liu Y.B., De Smedt, F., 2002, **GIS Based Distributed Modeling for Flood Estimation**, Proceeding of the Twenty_Second Annual American Geophysical Union Hydrology Days, 98-109.

Jansen, Hans G.P., Bas A.M. Bouman, Johan Bouman, Roberta. Schipper, Huib Hengsdijk, and Aandere Nieuwenhuyse, 2000, **On Tools for Land Use Analysis,** Paper for the mini-symposium "Integrating approaches for natural resource management and policy analyses," XXIV International conference of Agricultural Economists, Berlin, August, 13-19.

Kumar Shrestha, N., Neale, CH., Maidment, D., 2007, **Simulation of Stream Runoff Using WetSpa Model**, GIS in Water Resources Conference, Utah State University.

Liu, Y.B., De Smedt, F., Hoffmann L., Pfister L., 2004, **Assessing Land Use Impacts on Flood Processes in Complex Terrain by Using GIS and Modeling Approach**, Luxembourg, Environmental Modeling and Assessment, 9: 227-235.

Liu, Y.B., De Smedt, F., 2004, **WetSpa Extension, A GIS-based Hydrologic Model for Flood Prediction and Watershed Management Documentation and User Manual,** Department of Hydrology and Hydraulic Engineering Vrije Universiteit Brussel, Pleinlaan 2, 1050 Brussel, Belgium.

Liu, Y.B., Gebremeskel, S., De Smedt, F., Pfister L., 2003, **A Diffusive Transport Approach for Flow Routing in GIS-based Flood Modeling**, Journal of Hydrology, 283, 91-106.

Matkan, A.A., Zeinivand, H., Bayat, B., Mirbagheri, B,. Ghafouri, A.M., 2010, **Investigating the Capabilities, Advantages**

and Restrictions of Spatial-distributed Hydrologic Models in Iran, The First International Conference on Soil, Water and Plant Modeling, Kerman University.

Makhdum, M., 2008, **Land Use Planning Foundation**, Tehran University Publications.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970, **River Flow Forecasting though Conceptual Models, Part 1-A Discussion of Principles,** Journal of hydrology, 10: 282-290.

Nurmohamad, R., Naipal, S., De Smedt, F., 2006, **Hydrologic Modeling of the Upper Suriname River basin Using WetSpa and Arcview GIS**, Journal of Spatial Hydrology, Vol. 6, No. 1, Spring 2006.

Perera, A. and Thillanadarajan V., 1991, **GIS for Land Use Planning**, Asia Pacific Remote Sensing, No. 2.

Safari, A., De Smedt, F., and Moreda, F., 2009, **WetSpa Model Application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2),** Journal of Hydrology.

Wang, Z.M., Batelaan, O. & De Smedt, F., 1997, **A Distributed Model for Water and Energy Transfer Between Soil, Plants and Atmosphere (WetSpa)**, Phys. Chem. Earth, 21(3), 189-193.

Walling, D.E. and Hadely, R.F., 1984, **Dissolved load and Their Measurement in Erosion and Sediment Yield: Some Method of Measurement and Modeling**, GEO-Book, Norwich, England, 133-157.

Zeinivand H., and De Smedt, F. 2009, **Prediction of Snowmelt Floods with a Distributed Hydrological Model Using a Physical Snow Mass and Energy Balance Approach,** Natural Hazards Journal, DOI 10, 1007/s11069-009-9478-9.

Zeinivand H., 2009, **Development of Spatially Distributed Hydrological WetSpa Modules for Snowmelt, Soil Erosion, and Sediment Transport**, Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

Zeinivand, H., 2010, **Simulation of Spatial Distribution of Soil Erosion and Sediment on Watershed Scale**, Sixth National Conference on Watershed Management Science and Engineering, Tarbiat Modares University.