

ارزیابی آثار تناسب اراضی روی مقادیر رواناب با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کارده)

مریم آذرخشی^{۱*}، محمد رستمی خلج^۲

۱. استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربت حیدریه

۲. مدرس آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه تربت حیدریه

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۴/۱۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۸/۱۳)

چکیده

استفاده صحیح از اراضی با توجه به قابلیت‌ها که دارند، یکی از راه‌کارهای مناسب برای مدیریت رواناب حوضه آبخیز است. مدیر حوضه می‌تواند با در نظر گرفتن قابلیت‌ها و محدودیت‌های حوضه، از بین ترکیبات مختلف و متنوع کاربری‌ها، کاربری بهینه را به منظور بهره‌برداری صحیح از رواناب پیشنهاد دهد. هدف از مطالعه حاضر، رتبه‌بندی تناسب کاربری اراضی با استفاده از روش Fuzzy-AHP در حوضه سد کارده مشهد و تأثیر آن روی مقادیر دبی خروجی از حوضه با استفاده از مدل SWAT است. به این منظور ابتدا نقشه کاربری فعلی منطقه مطالعه شده با استفاده از فن سنجش از دور و بازدید میدانی تهیه شد. مدل SWAT با استفاده از نقشه کاربری موجود واسنجی و ارزیابی شد. سپس، معیارها و محدودیت‌ها برای چهار کاربری مرتع، کشاورزی، جنگل و شهری تعیین شد. نقشه تناسب اراضی برای کاربری‌های یادشده با استفاده از ترکیب روش‌های فازی و AHP با استفاده از روش MCD در نرم‌افزار EDRI SI تهیه شد. نقشه تناسب اراضی تهیه شده به جای نقشه کاربری موجود وارد مدل SWAT شد و نتایج بررسی شد. نتایج نشان داد ۱۳/۹۸ درصد مساحت حوضه برای کاربری جنگل مناسب بوده و همچنین وسعت مراتع در کاربری بهینه کاهش یافته است. نتایج مدل SWAT نشان داد با کاربری بهینه اراضی در حوضه سد کارده به ترتیب دبی متوسط و حداکثر روزانه ۱۶/۲۵ و ۴ درصد نسبت به شرایط فعلی کاهش پیدا می‌کند. کاهش مقادیر دبی خروجی می‌تواند به کاهش سیلاب در منطقه و تغذیه سفره آب زیرزمینی کمک کند.

کلیدواژه‌گان: تناسب اراضی، روش Fuzzy-AHP، کاربری اراضی، مدل SWAT.

مقدمه

کاربری اراضی و میزان آب مصرفی و نوع مصرفی و واحدهای مختلف زمین را می‌توان با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی بهینه کرد. با استفاده از برنامه‌ریزی سرزمین، می‌توان به‌طور مؤثری در منطقه مطالعه‌شده سناریوهای بهینه و یا نزدیک به بهینه را با توجه به اهداف مد نظر ارائه کرد [۱]. از آنجا که عدم استفاده بهینه از سیلاب‌ها و فرسایش خاک یکی از موانع مهم دستیابی به توسعه پایدار کشاورزی و منابع طبیعی است، بهینه‌سازی استفاده از زمین رویکردی مؤثر در تحقق هدف استفاده پایدار از زمین و تخصیص منابع محدود زمین خواهد بود [۲].

تجزیه و تحلیل و ارزیابی الگوهای کاربری اراضی از اهداف اصلی مدیریت منابع طبیعی‌اند [۳]. این الگوها به‌واسطه افزایش فعالیت‌ها و دخل و تصرف‌های بشر در زمین به‌منظور تأمین نیازهای مختلف، مدام در حال تغییرند. رشد سریع جمعیت، صنعت و شهرسازی دلایل اصلی این تغییرات‌اند [۴]. آثار تغییرات کاربری اراضی روی منابع آبی اصولاً در تغییرات وضعیت هیدرولوژیکی، کمیت و کیفیت آب منعکس شده‌اند [۵]. بنابراین، باید یک سیستم مدیریت کاربری اراضی مؤثر برای مدیریت تغییرات الگوی کاربری اراضی به‌منظور توسعه پایدار جامعه ایجاد شود [۶]. یکی از راه‌های استفاده بهینه از اراضی و جلوگیری از تخریب آنها، انتخاب کاربری متناسب با ظرفیت تولید اراضی است [۷].

برای مدیریت بهینه اراضی، باید آثار تغییر کاربری اراضی در پاسخ هیدرولوژیکی حوضه بررسی شود. روابط بارش- رواناب حوضه نتیجه اثر متقابل بسیاری از فرایندها مانند اقلیم، کاربری اراضی و عوامل آدافیکی هستند. پاسخ هیدرولوژیکی حوضه، شاخص جامعی از شرایط فعلی حوضه آبخیز و پیش‌بینی‌کننده آثار تغییرات کاربری اراضی بر کمیت و کیفیت آب و رسوب خروجی از حوضه است. تغییرات کاربری اراضی با تغییر در سیکل هیدرولوژیکی حوضه سبب به‌هم‌خوردن تعادل آب بین بارش، تبخیر، نفوذپذیری و پاسخ رواناب - رسوب می‌شود. درک رابطه بین تغییرات کاربری اراضی و عوامل به‌وجودآورنده آن و آثار ثانوی آن بر رژیم هیدرولوژیکی، اطلاعات ضروری برای برنامه‌ریزی استفاده از زمین و مدیریت پایدار منابع طبیعی را فراهم می‌کند [۸]. هر چند تغییرات کاربری اراضی یک حوضه آشکار است، تعیین دقیق مقدار کمیت این پیامدها بسیار دشوار خواهد بود [۹].

تغییرات شدید کاربری اراضی در کوتاه‌مدت سبب اختلال در سیستم هیدرولوژیکی هم به‌صورت افزایش مقدار آب از طریق سیلاب و هم کاهش آب از طریق کاهش و یا حذف جریان کمینه می‌شود [۱۰]. تغییرات کاربری اراضی علاوه بر تغییر جریان سطحی، بر جریان زیرسطحی و آب زیرزمینی نیز تأثیر می‌گذارند [۸]. با توجه به اینکه امروزه بدون توجه به استعداد اراضی برای تولید محصول خاص، تغییراتی در آنها به وجود می‌آورند، تعیین کاربری متناسب با نوع محدودیت‌های موجود در منطقه و نشان‌دادن تأثیر کاربری بهینه روی مقادیر رواناب امری ضروری است.

استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی برای بهینه‌سازی کاربری اراضی شهرستان یزد به‌منظور کاهش مقدار آب مصرفی، نشان داد مساحت فعلی کاربری‌ها، با توجه به آب مصرفی بهینه نیست و در صورت لحاظ کردن راندمان فعلی مصرف آب در مقادیر آب تخصیصی به کاربری‌ها برای رفع تنش آبی واردشده بر گیاهان، باید مساحت بعضی از کاربری‌ها تا ۴۰ درصد کاهش یابد [۱]. طی پژوهشی، پاسخ هیدرولوژیکی حوضه بر اثر تغییر کاربری اراضی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در حوضه رودخانه‌ای در چین بررسی شد. در مطالعه یادشده برای مدل‌سازی تغییرات کاربری از مدل Dyna-CLUE¹ استفاده شده و سناریوهای تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی وارد مدل SWAT شدند و پاسخ هیدرولوژیکی حوضه ارزیابی شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد تغییر اقلیم تأثیر بیشتری نسبت به تغییر کاربری اراضی روی پاسخ هیدرولوژیکی دارد و اثر تغییر کاربری در مناطق مختلف متفاوت است [۱۱]. برای بهینه‌سازی چندهدفه کاربری اراضی در منطقه بابل دشت اصفهان از الگوریتم ژنتیک NSGA-II برای به حداکثر رساندن تراکم، سازگاری، سود اقتصادی و استفاده ترکیبی از کاربری‌ها استفاده شد [۱۲]. طی پژوهشی از مدل SWAT برای شبیه‌سازی مقادیر رواناب و کیفیت آب تحت شرایط تغییر در کاربری و پوشش سطح زمین در حوضه ساحلی آلابامای آمریکا استفاده شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد مدل SWAT کارایی زیادی در پیش‌بینی مقادیر رواناب و پارامترهای کیفیت آب دارد. همچنین، استفاده از اطلاعات تغییر کاربری به‌روز تأثیر زیادی در مقادیر کیفی آب دارد [۱۳]. در تحقیقی دیگر، برای درک بهتر فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه رودخانه زیانگ

1. Dynamic Conversion of Land-Use and its Effects

روش کار

منطقه مطالعه شده

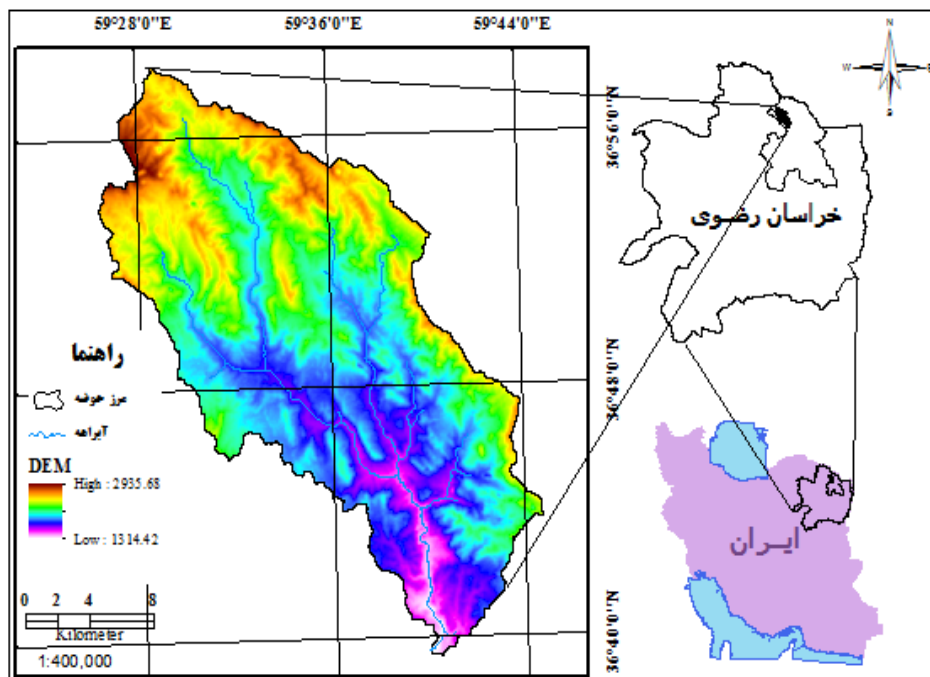
حوضه آبخیز کارده با مساحت ۴۴۶/۷ کیلومترمربع و شیب متوسط وزنی ۴۲/۷ درصد در شمال شرقی خراسان رضوی بین عرض جغرافیایی ۳۶° ۴۰' تا ۳۶° ۵۸' شمالی و طول جغرافیایی ۴۵° ۲۷' تا ۴۵° ۵۹' شرقی قرار گرفته است. بالاترین ارتفاع در شمال غربی حوضه ۲۹۳۵ متر از سطح دریا و پایین‌ترین ارتفاع، در خروجی حوضه و در بالادست روستای کارده با ارتفاع ۱۳۰۰ متر است. متوسط بارندگی سالانه ۳۶۷ میلی‌متر است و متوسط دمای سالانه به ۶/۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این منطقه براساس روش آمبرژه جزء مناطق خشک سرد است. شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعه شده در ایران و خراسان رضوی را نشان می‌دهد.

تهیه نقشه تناسب اراضی

برای تعیین تناسب اراضی برای هر کاربری، یک سری معیار یا همان احتیاجات نوع خاصی از کاربری تعیین شد. معیارهای استفاده شده در مطالعه حاضر عبارتند از: شکل زمین، کاربری/پوشش زمین، فاصله تا جاده و مناطق مسکونی، منابع آبی، اقلیم و آب و هوای منطقه و خاک که

چین تحت تأثیر تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی، از مدل SWAT استفاده شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد بر اثر تغییر اقلیم جریان رودخانه (تحت تأثیر تغییرات دما و بارش) ۱۰۲/۸ درصد افزایش می‌یابد، در حالی که بر اثر تغییر کاربری اراضی جریان رودخانه ۲/۸ درصد کاهش می‌یابد [۱۴].

با توجه به نتایج مطالعات انجام‌شده به نظر می‌رسد بهینه‌سازی کاربری اراضی حوضه‌های آبخیز، یکی از راه‌های مناسب برای دستیابی به توسعه پایدار و حفاظت خاک است. سد کارده یکی از منابع تأمین آب شهر مشهد است. طی سال‌های گذشته تغییر منابع آب و بار رسوبی، برای حوضه آبخیز کارده مسائل و مشکلات زیادی به وجود آورده است. علت این تغییرات عوامل اقلیمی و تغییر کاربری اراضی حوضه طی دوره‌های گذشته است که موجب تغییر در مؤلفه‌های مختلف سیکل هیدرولوژیکی شده است. با وجود منافع زیاد، هنوز مطالعات یکپارچه و جامعی درباره برنامه‌ریزی کاربری اراضی در این حوضه صورت نگرفته است. از این‌رو، هدف از تحقیق حاضر شبیه‌سازی رواناب برای کاربری موجود و کاربری بهینه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT و بررسی تأثیر کاربری بهینه روی کمیت رواناب خروجی از حوضه آبخیز کارده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه شده در ایران و استان خراسان رضوی

به ترتیب به این صورت در نظر گرفته شد: طبقه تناسب زیاد برای مرتع < طبقه تناسب زیاد برای کشاورزی < طبقه تناسب زیاد برای جنگل < طبقه تناسب زیاد برای مسکونی < طبقه تناسب متوسط برای مرتع < طبقه تناسب متوسط برای کشاورزی < طبقه تناسب متوسط برای جنگل < طبقه تناسب متوسط برای مسکونی < طبقه تناسب کم برای مرتع < طبقه تناسب کم برای کشاورزی < طبقه تناسب کم برای جنگل < طبقه تناسب کم برای مسکونی [۱۹].

شبیه‌سازی رواناب خروجی با استفاده از مدل SWAT

برای شبیه‌سازی رواناب از مدل نیمه‌توزیعی- فیزیکی SWAT استفاده شده است. SWAT یکی از مدل‌های شبیه‌سازی چندمنظوره برای مدیریت حوضه‌های آبخیز است که در سال ۱۹۹۵ با حمایت سازمان تحقیقات کشاورزی ایالت متحده آمریکا توسعه داده شد. نقشه DEM با دقت پیکسل ۳۰ در ۳۰ متر (SRTM) تهیه شد. مدل SWAT برای شبیه‌سازی حوضه به خصوصیات مختلف فیزیکی- شیمیایی خاک مانند بافت خاک، درصد رطوبت در دسترس خاک، هدایت هیدرولیکی، چگالی حجمی و مقدار کربن آلی خاک برای لایه‌های مختلف خاک نیاز دارد. به این منظور، با استفاده از روش ژئومورفولوژی و روی هم‌اندازی نقشه‌های زمین‌شناسی، شیب، رخساره‌های فرسایشی و کاربری اراضی، ۲۲ پلی‌گون به‌دست آمد. برای تعیین خصوصیات خاک‌شناسی در هر پلی‌گون از اطلاعات پروفیل‌های حفرشده در مطالعات جامع آبخیزداری حوضه کارده در سال ۱۳۷۹ استفاده شد، اما چهار پلی‌گون پروفیل نداشتند که با مراجعه به منطقه و حفر پروفیل، اطلاعات مربوط به آنها نیز به دست آمد. برای تعیین نقشه کاربری اراضی از فن‌سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای لندست و سنجنده TM^۱ در سال ۱۳۹۲ و برای طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده استفاده شد. داده‌های اقلیمی استفاده‌شده شامل داده‌های روزانه بارندگی، کمترین و بیشترین دمای روزانه هوا و رطوبت نسبی می‌شوند که به هفت ایستگاه داخل و اطراف حوضه مربوطاند و از سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی دریافت شدند.

هر یک از معیارها به زیرمعیارهایی تقسیم می‌شوند [۱۵] و [۱۶]. معیارهای مد نظر برای کاربری‌های عمده موجود در حوضه (مرتع، کشاورزی، جنگل و مناطق مسکونی) استخراج شد. در جدول ۱ معیارها و زیرمعیارهای کاربری مرتع به عنوان نمونه ارائه شده است.

همان‌طور که برخی ویژگی‌های اراضی برای نوع خاصی از کاربری نیاز است، برخی دیگر از ویژگی‌های اراضی برای آن کاربری محدودیت ایجاد می‌کند. این عوامل سبب می‌شوند منطقه مطالعه شده بازدهی کافی برای بیشترین سود با توجه به اصل پایداری منطقه را نداشته باشد. نقشه محدودیت با استفاده از دید کارشناسی و محدودیت‌های منطقه برای هر کاربری شناسایی شده (جدول ۱) و با استفاده از تابع بولن به نقشه تبدیل شد. به مناطقی که محدودیت دارند، کد صفر و سایر مناطق که نامحدودند، کد یک تعلق گرفت [۱۷]. برای فازی کردن نقشه‌های به‌دست‌آمده باید مقدار عددی مشخصی براساس نوع اثرگذاری آنها در تغییر کاربری تعیین شود. بسته به نوع عوامل مؤثر در تعیین تناسب اراضی، باید برای هر فاکتور تابع عضویت مشخصی تعریف شود. در جدول ۱ چگونگی فازی کردن و تابع عضویت برای هر معیار آورده شده است. مقادیر پیکسل‌های نقشه‌های تناسب به‌صورت گسسته در دامنه صفر تا ۲۵۵ قرار گرفته که عدد صفر بیان‌کننده عدم شایستگی و عدد ۲۵۵ نشان‌دهنده بیشترین شایستگی برای تبدیل کاربری از یک طبقه به طبقه دیگر است.

برای وزن‌دهی هر یک از فاکتورها از روش AHP و اعمال دیدگاه‌های کارشناسی استفاده شد (جدول ۱). بعد از تهیه نقشه معیارها و محدودیت‌ها و تعیین وزن معیارها، نیاز است که معیارها با هم ترکیب شوند و نقشه شایستگی اراضی برای هر کاربری تهیه شود. به این منظور، در مطالعه حاضر از مدل MCD در نرم‌افزار ادیسی استفاده شد [۱۸]، و با استفاده از روش ترکیب خطی وزنی، محدودیت‌ها و معیارها برای هر کاربری با هم ترکیب و نقشه تناسب اراضی برای هر کاربری تهیه شد.

نقشه‌های شایستگی اراضی تهیه‌شده برای هر کاربری به چهار طبقه تناسب زیاد، تناسب متوسط، تناسب کم و نامناسب طبقه‌بندی شد. با توجه به اهمیت فعلی کاربری‌ها از نظر ساکنان منطقه و مدیران حوزه، ارزش‌گذاری

جدول ۱. معیارها، زیرمعیارها، محدودیتها و نوع تابع عضویت [۱۵ و ۱۶] برای کاربری مرتع

| معیار | وزن معیار در روش AHP | زیرمعیار | وزن زیرمعیار در روش AHP | محدودیت | نوع تابع عضویت |
|-------------------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|---|--|
| شکل زمین | ۰/۲۲۷۴ | شیب | ۰/۱۵ | شیب بیش از ۳۰٪ | صفر = ۵؛ ۱ درصد = ۸؛ ۰/۸ درصد = ۱۵؛ ۰/۵ درصد = ۳۰؛ ۰/۲ درصد و بیشتر = صفر |
| کاربری/ پوشش اراضی | ۰/۲۵۱۷ | ارتفاع | ۰/۰۷۲ | بدون محدودیت در کاربری مرتع | صفر تا ۵۰۰ متر = ۱؛ ۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر = کاهشی؛ ۳۰۰۰ متر و بیشتر = ۰/۱ |
| | | کاربری اراضی فعلی | ۰/۱۶۲ | کاربری مسکونی، جنگل متراکم، منابع آبی، مناطق صنعتی، جاده‌ها، آبراهه‌ها، جنگل دست کاشت | مناطق مسکونی = صفر؛ جنگل متراکم = صفر؛ مرتع بایر = ۱؛ کشاورزی = ۰/۷۸؛ ایش = ۰/۷۸؛ منابع آب = صفر؛ باغ‌ها = صفر؛ جاده اصلی و فرعی و آبراهه = صفر؛ مناطق صنعتی = صفر |
| فاصله تا جاده و جاده و مناطق مسکونی | ۰/۰۵۴۷ | تراکم پوشش گیاهی | ۰/۰۸۹ | شاخص NDMI بین ۵۰ تا ۷۰ درصد | خطی افزایشی |
| | | فاصله از جاده | ۰/۰۲۵ | ۳۰ متری جاده اصلی و فرعی | صفر تا ۳۰ متر = صفر؛ ۳۰ تا ۱۰۰۰ متر = ۱؛ ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر = کاهشی؛ ۵۰۰۰ متر و بیشتر = ۰/۲ |
| منابع آبی | ۰/۱۸۷ | فاصله تا منطقه مسکونی | ۰/۰۲۹ | ۱۰۰ متری مناطق روستایی و ۳۰۰ متری مناطق شهری | صفر تا ۱۰۰ متر = صفر؛ ۱۰۰ تا ۵۰۰۰ متر = کاهشی؛ ۵۰۰۰ متر و بیشتر = ۰/۲ |
| | | فاصله تا چشمه | ۰/۰۸۱ | ۳۰ متری چشمه | صفر تا ۳۰ متر = صفر؛ ۳۰ تا ۵۰۰ متر = کاهشی؛ بیشتر از ۵۰۰ متر = ۰/۲ |
| افزایش آبی | ۰/۱۸۷ | فاصله از رودخانه | ۰/۰۷۸ | ۳۰ متری آبراهه، کانال و سایر منابع آبی | صفر تا ۳۰ متر = صفر؛ ۳۰ تا ۱۰۰۰ متر = کاهشی؛ ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر و بیشتر = ۰/۲ |
| | | فاصله تا چاه | ۰/۰۲۷ | ۳۰ متری چاه | صفر تا ۳۰ متر = صفر؛ ۳۰ تا ۱۵۰۰ متر = کاهشی؛ بیشتر از ۱۵۰۰ متر = ۰/۱ |
| اقلیم و هوای منطقه | ۰/۱۴۶۹ | بیشترین دمای روزانه | ۰/۰۳۱ | بدون محدودیت در کاربری مرتع | ۱ تا ۲۰ = افزایشی؛ ۲۰ تا ۲۵ = ثابت؛ ۲۵ تا ۳۷ = کاهشی؛ بیشتر از ۳۷ = صفر |
| | | کمترین دمای روزانه | ۰/۰۲۲ | بدون محدودیت در کاربری مرتع | کمتر از ۴ = صفر؛ ۴ تا ۱۰ = افزایشی؛ ۱۰ تا ۱۵ = ثابت؛ بیشتر از ۱۵ = کاهشی |
| خاک | ۰/۱۳۲۲ | بارندگی | ۰/۰۹۲ | بارندگی کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر | صفر تا ۲۵۰ میلی‌متر = صفر؛ ۲۵۰ میلی‌متر تا بیشتر = افزایشی |
| | | بافت خاک | ۰/۰۴۳ | بدون محدودیت در کاربری مرتع | لومی = ۰/۸؛ سیلینی = ۰/۶؛ شنی رسی لومی = ۰/۶؛ رسی لومی = ۰/۶؛ شنی لومی = ۰/۵؛ سیلینی لومی = ۰/۶؛ لومی سیلینی = ۰/۹ |
| خاک | ۰/۱۳۲۲ | عمق خاک | ۰/۰۵۹ | کمتر از ۲۰ سانتی‌متر | خطی افزایشی |
| | | مواد آلی (OC) | ۰/۰۳۱ | بدون محدودیت در کاربری مرتع | خطی افزایشی |

(۲۰۰۹-۲۰۱۲) انجام شد. اعتبارسنجی با استفاده از روش‌های مشابه فرایند واسنجی و با استفاده از بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP و برنامه SUFI2 انجام شد. برای ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی می‌توان با استفاده از معیارهای مختلف آماری داده‌های شبیه‌سازی شده را با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه کرد [۲۱]. در مطالعه حاضر از ضریب کارایی نش-ساتکلیف (رابطه ۱) و ضریب همبستگی (رابطه ۲) برای ارزیابی کارایی مدل استفاده شد.

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{obsav})^2} \quad (1)$$

که در آن Q_i^{sim} : مقدار شبیه‌سازی شده برای زمان t ام، Q_i^{obs} : مقدار مشاهداتی برای زمان t ام، Q_i^{obsav} : برابر میانگین مقادیر دبی مشاهداتی و n : تعداد داده‌هاست. مقدار این ضریب بین یک تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند. مقدار بهینه این شاخص یک است. اگر مقدار آن از ۰/۵ بیشتر باشد، مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است [۲۲].

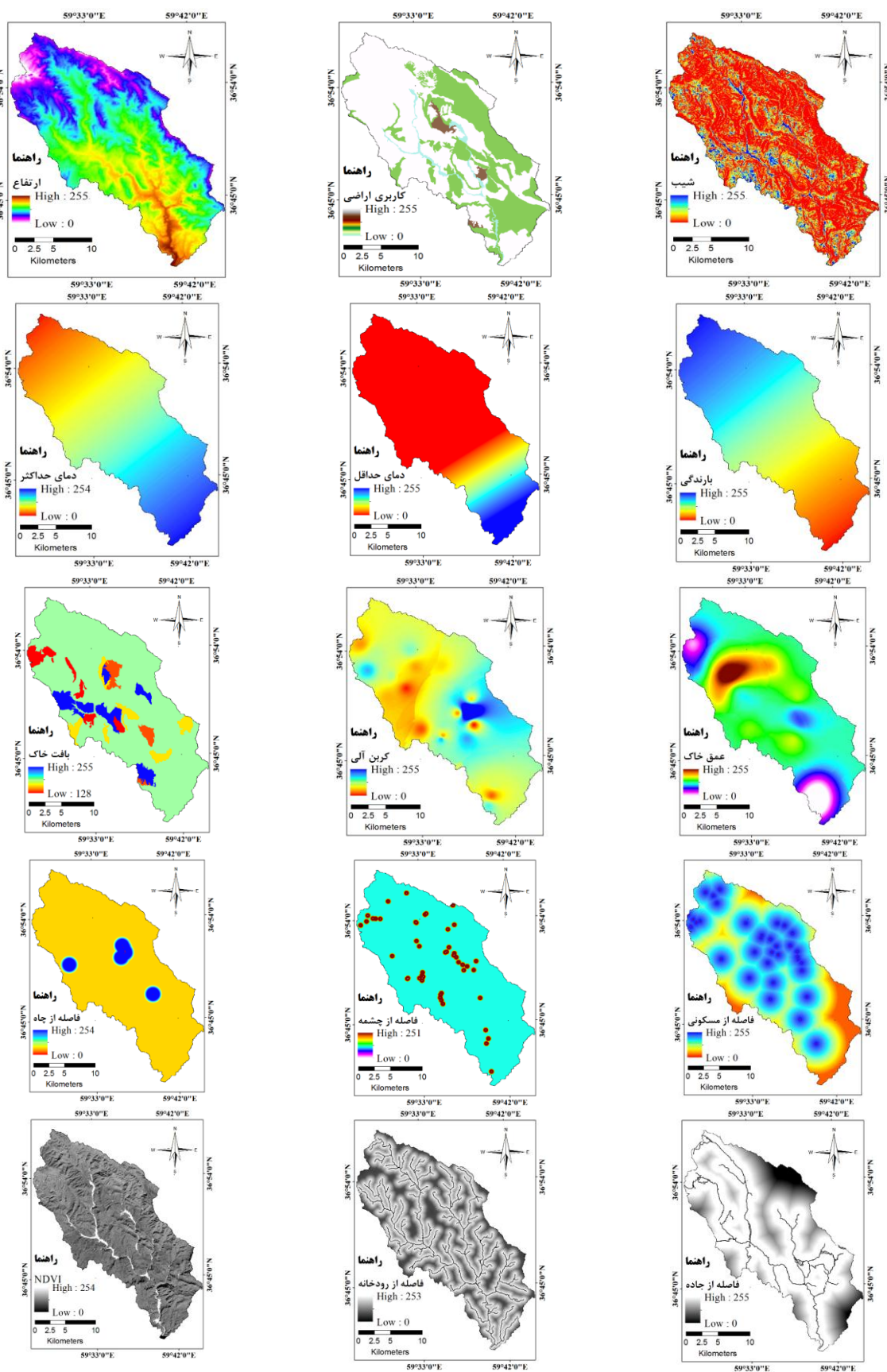
$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{simav})(Q_i^{obs} - Q_i^{obsav}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{simav})^2 \sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{obsav})^2} \quad (2)$$

که در آن Q_i^{simav} : مقدار میانگین دبی شبیه‌سازی شده است.

برای تحلیل حساسیت مدل SWAT از روش لاتین هایپرکیوب - موریس (LH_OAT) که ترکیبی از طرح OAT در ترکیب با روش نمونه‌گیری LH است، به منظور شناسایی حساس‌ترین پارامترهای مدل استفاده شد. تحلیل حساسیت با روش LH-OAT روی ۳۶ پارامتر با دامنه تغییرات پیش‌فرض مدل و با ۵۰۰ بار اجرای مدل انجام [شد]. همچنین، تحلیل حساسیت با استفاده از شاخص‌های t-stat و p-value و برنامه SUFI2 در بسته نرم‌افزاری SWAT CUP انجام شد [۲۰].

فرایند واسنجی مدل ابتدا برای یک دوره مطلوب شبیه‌سازی شد (دوره warming-up). سپس، براساس مقادیر اولیه به دست آمده مدل برای یک دوره معین اجرا شد. فرایند واسنجی طی دوره زمانی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۸ با استفاده از برنامه SUFI2 در بسته نرم‌افزاری SWAT CUP انجام شد. در کل، ۳۶ پارامتر براساس مطالعات مختلف صورت‌گرفته در این زمینه انتخاب شد که بعد از تحلیل حساسیت و شناسایی مؤثرترین پارامترها، تعداد این پارامترها به ۱۵ پارامتر کاهش یافت. کاهش تعداد پارامترها طی تحلیل حساسیت سبب کاهش زمان اجرای مدل و افزایش دقت به واسطه کاهش عدم قطعیت می‌شود.

اعتبارسنجی مدل طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۱



شکل ۲. نقشه‌های فازی شدهٔ زیرمعیارها برای کاربری مرتع

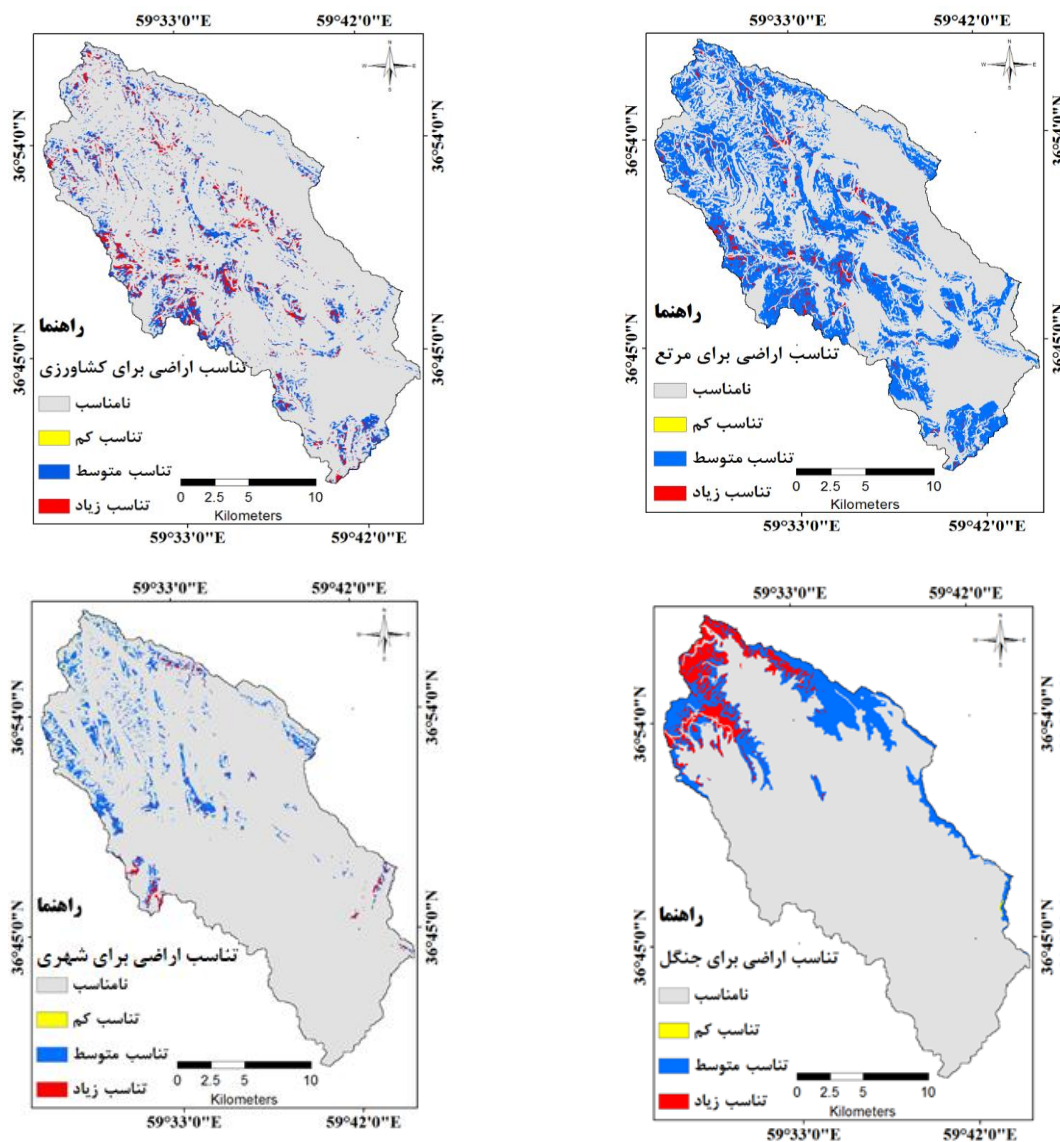
برای کاربری مرتع نشان می‌دهد. در این نقشه‌ها حد پایین صفر و حد بالای ۲۵۵ به ترتیب عدم شایستگی و بیشتر شایستگی برای تبدیل کاربری از یک طبقه به طبقه دیگر را نشان می‌دهد. اعداد کمتر از ۲۵۵ نشانه عدم شایستگی حداکثری برای تبدیل کاربری هستند.

کلاس‌بندی تناسب اراضی برای کاربری‌های مرتع، کشاورزی، جنگل و شهری توسط ماژول MCE در نرم‌افزار EDRIISI با توجه به محدودیت اراضی و وزن لایه‌ها در AHP و نقشه‌های فازی شده انجام شد. نقشه شایستگی اراضی برای کاربری مرتع، کشاورزی، جنگل و شهری در شکل ۳ آمده است.

ضریب تبیین بین صفر تا یک تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن یک است و این حالت به زمانی مربوط است که در آن مقادیر شبیه‌سازی شده دقیقاً مشابه مقادیر مشاهداتی باشد.

یافته‌ها

پس از آماده‌سازی و تهیه لایه‌های معیارها و زیرمعیارها برای اجرای روش Fuzzy-AHP، ابتدا لایه‌های اطلاعاتی به صورت رستری وارد محیط GIS شدند. سپس، به منظور بی‌بعد کردن لایه‌های رستری، از روش فازی و تعیین تابع عضویت برای کاربری مرتع، کشاورزی، جنگل و شهری استفاده شد. شکل ۲ نقشه‌های فازی شده زیرمعیارها را

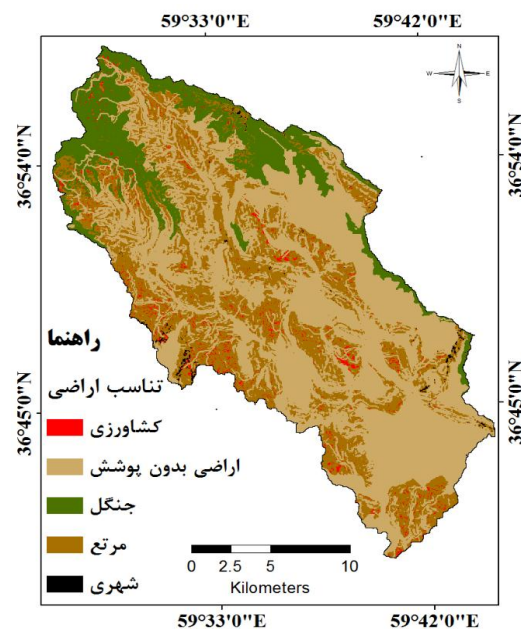


شکل ۳. نقشه‌های شایستگی اراضی برای کاربری مرتع، کشاورزی، جنگل و شهری

در نقشه کاربری بهینه اراضی (شکل ۴) کاربری مرتع و جنگل بخش وسیعی را به خود اختصاص داده‌اند. در حال حاضر، در قسمت‌هایی که در نقشه بهینه برای کاربری جنگل در نظر گرفته شده است پوشش درختی به صورت پراکنده وجود دارد، ولی تراکم به حدی نیست که جزء اراضی جنگلی محسوب شود. در منطقه مطالعه شده ۱۴ روستا وجود دارد و مناطق شهری وجود ندارد، اما در نقشه بهینه کاربری مساحتی حدود ۱/۵۶ کیلومتر مربع برای توسعه شهری با توجه به معیارهای مربوط به آن مناسب تشخیص داده شده است. مساحت و درصد مساحت کاربری‌ها در وضعیت فعلی و نقشه تناسب اراضی حوضه سد کارده در جدول ۲ ارائه شده است.

مدل نیمه‌توزیعی - فیزیکی SWAT با توجه به کاربری کنونی در منطقه اجرا شد. واسنجی مدل طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۸ (سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ به‌عنوان دوره warming up در نظر گرفته شد) و برپایه زمانی روزانه برای دبی انجام شد. نتایج به دست آمده از مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی مدل برای شبیه‌سازی رواناب در شکل ۵ ارائه شده است.

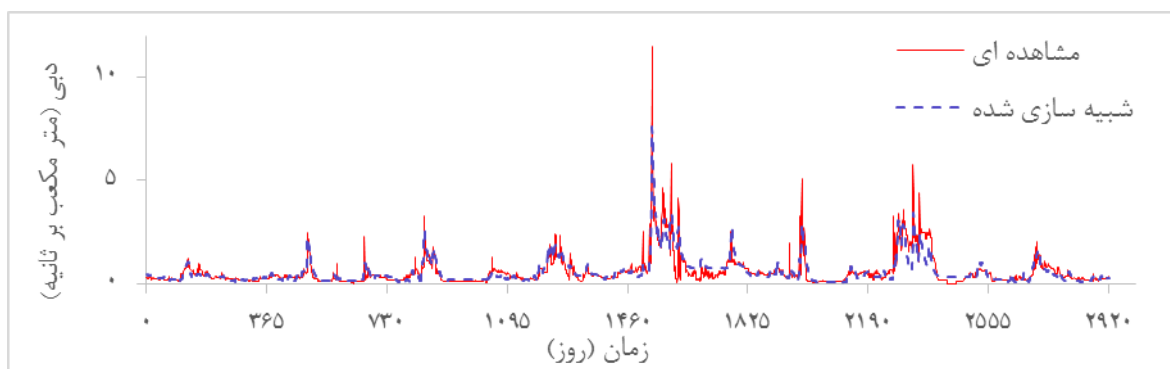
پس از تهیه نقشه‌های طبقه‌بندی شده تناسب اراضی برای هر کاربری، نقشه تناسب اراضی کاربری برای کل منطقه تهیه شد. نقشه تناسب اراضی برای منطقه مطالعه شده در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴. نقشه تناسب اراضی منطقه مطالعه شده

جدول ۲. مساحت و درصد مساحت کاربری‌ها در وضعیت فعلی و نقشه تناسب اراضی

| ردیف | کاربری | کاربری بهینه | | کاربری فعلی | |
|------|-----------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|
| | | مساحت (km ²) | درصد مساحت | مساحت (km ²) | درصد مساحت |
| ۱ | کشاورزی | ۷/۸ | ۱/۷۴ | ۲۰ | ۴/۴۶ |
| ۲ | بدون پوشش | ۲۴۵/۹۵ | ۵۴/۸۹ | ۱۵۲/۵۷ | ۳۴/۰۳ |
| ۳ | جنگل | ۶۲/۶۵ | ۱۳/۹۸ | ۰ | ۰ |
| ۴ | مرتع | ۱۳۰/۱۱ | ۲۹/۰۳ | ۲۷۵/۵۷ | ۶۱/۵۲ |
| ۵ | شهری | ۱/۵۶ | ۰/۳۴ | ۰ | ۰ |



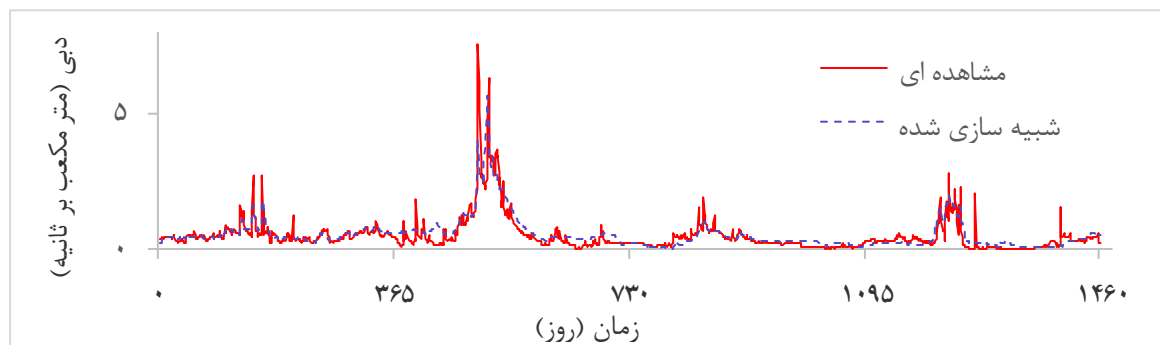
شکل ۵. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی رواناب در دوره واسنجی مدل SWAT

پس از واسنجی و ارزیابی مدل و تأیید کارایی مدل با ثابت در نظر گرفتن همه پارامترها به غیر از نقشه کاربری موجود مدل یک بار دیگر برای نقشه تناسب اراضی به دست آمده از روش فازی اجرا شد و تغییرات رواناب خروجی مدل با رسم هیدروگراف مربوط به آن بررسی شد. در شکل ۷ هیدروگراف رواناب متوسط ماهانه برای کاربری فعلی و کاربری بهینه ارائه شده است. با استفاده از آزمون آماری t جفتی مقادیر دبی ماهانه برای کاربری فعلی و کاربری بهینه با هم مقایسه شد. نتایج نشان داد کاربری بهینه اراضی سبب کاهش معنادار مقدار دبی متوسط ماهانه در سطح یک درصد نسبت به شرایط فعلی می‌شود. در جدول ۵ مقادیر دبی متوسط روزانه، حداقل و حداکثر دبی روزانه با هم مقایسه شده است.

همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای تطابق خوبی دارند و کارایی خوب مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب روزانه را نشان می‌دهند. مقادیر ضریب کارایی نش- ساتکلیف محاسبه شده برای دوره واسنجی مدل SWAT در جدول ۳ ارائه شده است که نشان‌دهنده دقت خوب مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب است. برای اعتبارسنجی مدل SWAT از دوره آماری ۲۰۰۹-۲۰۱۲ استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی شده رواناب روزانه برای دوره اعتبارسنجی مدل SWAT در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین، مقادیر ضریب کارایی نش- ساتکلیف و R^2 برای دوره اعتبارسنجی مدل SWAT در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳. مقادیر ضریب کارایی نش- ساتکلیف برای دوره واسنجی مدل SWAT

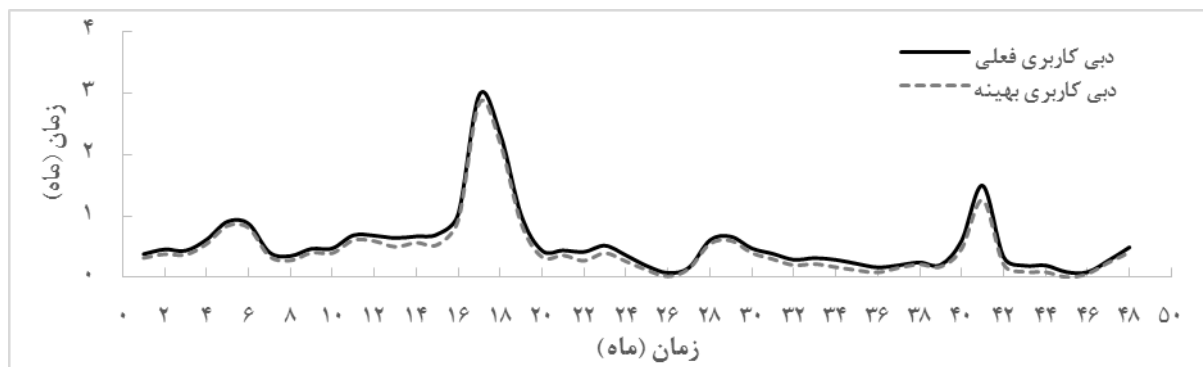
| سال | | | | | | | | NS رواناب |
|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| ۲۰۰۸ | ۲۰۰۷ | ۲۰۰۶ | ۲۰۰۵ | ۲۰۰۴ | ۲۰۰۳ | ۲۰۰۲ | ۲۰۰۱ | |
| ۰/۷۳ | ۰/۷ | ۰/۶۷ | ۰/۶۹ | ۰/۷۱ | ۰/۸ | ۰/۶۹ | ۰/۷۱ | |



شکل ۶. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی رواناب برای اعتبارسنجی مدل SWAT

جدول ۴. مقادیر ضریب کارایی نش- ساتکلیف و R^2 برای دوره اعتبارسنجی مدل SWAT

| سال | | | | NS |
|------|------|------|------|-------|
| ۲۰۱۲ | ۲۰۱۱ | ۲۰۱۰ | ۲۰۰۹ | |
| ۰/۶۸ | ۰/۶۵ | ۰/۷۴ | ۰/۶ | |
| ۰/۷ | ۰/۶۶ | ۰/۷۷ | ۰/۶۱ | R^2 |



شکل ۷. مقایسه بین دبی شبیه‌سازی شده برای کاربری فعلی و کاربری بهینه

جدول ۵. مقادیر دبی متوسط، حداکثر و حداقل روزانه برای کاربری فعلی و بهینه

| دبی (مترمکعب بر روز) | | |
|----------------------|-------------|--------------|
| پارامتر | کاربری فعلی | کاربری بهینه |
| متوسط | ۰/۵۵۲۳ | ۰/۴۶۲۶ |
| حداکثر | ۵/۶۸ | ۵/۴۵ |
| حداقل | ۰/۰۳۳ | ۰ |

به آبخوان عمقی و تبخیر و تعرق تبدیل می‌شود، بنابراین مقداری از آن سبب تغذیه سفرهای آب زیرزمینی شده و مقداری از آن توسط تبخیر و تعرق از دسترس خارج می‌شود. همچنین، نتایج نشان داد حدود ۴ درصد از دبی حداکثر روزانه کاهش می‌یابد که این کاهش می‌تواند از خسارت‌های ناشی از سیلاب تا حدی بکاهد. به کاهش دبی خروجی از حوضه بر اثر بهینه کردن کاربری اراضی در تحقیقات یو و همکارانش [۲۵] و سلمانی و همکارانش [۲۶] اشاره شده است. در حوضه آبخیز جاجرود نیز با کاهش اراضی زراعی و مرتعی، رواناب به میزان ۷۳ درصد کاهش یافته است [۲۷]. گیوو و همکارانش [۱۴] در حوضه رودخانه زیانگ چین نشان دادند بر اثر تغییر کاربری اراضی جریان رودخانه ۲/۸ درصد کاهش می‌یابد. سیلاب نه تنها آثار مخربی روی زندگی بشر دارد بلکه تأثیرات شدیدی روی محیط طبیعی منطقه می‌گذارد و سبب تخریب منابع طبیعی و محیط زیست می‌شود.

با توجه به نقشه تناسب اراضی به دست آمده از روش فازی و نقشه کاربری اراضی در شرایط کنونی می‌توان دریافت که بین کاربری اراضی کنونی حوضه و کاربری بهینه تفاوت‌هایی وجود دارد، به طوری که مناطق جنگلی در شمال حوضه افزایش یافته است، در صورتی که در

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد مدل SWAT با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۷۱ در مرحله واسنجی به خوبی قادر به شبیه‌سازی رواناب حوضه سد کارده است. به کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب در آلابامای آمریکا نیز اشاره شده است [۱۳]. متوسط ضریب نش-ساتکلیف در دوره واسنجی مدل SWAT (۰/۷۱)، نسبت به دوره اعتبارسنجی (۰/۶۶) بیشتر است. نتایج مشابهی توسط اکبری مجدر و همکارانش [۲۳] به دست آمده است.

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ مدل SWAT در برآورد دبی‌های اوج عملکرد موفقیت‌ناقصی ندارد و دبی‌های اوج را کمتر برآورد می‌کند. نتایج مشابهی توسط رستمیان و همکارانش [۲۴] در حوضه بهشت‌آباد به دست آمده است.

بررسی مقادیر دبی (جدول ۵) نشان می‌دهد اگر مدل با کاربری بهینه اجرا شود، حدود ۱۶/۲۵ درصد از متوسط رواناب سطحی کاسته می‌شود. با توجه به نتایج آزمون آماری t جفتی مقادیر دبی برای کاربری بهینه نسبت به کاربری فعلی کاهش قابل قبولی داشته است و در سطح یک درصد بین مقادیر دبی برای کاربری فعلی و بهینه تفاوت معناداری وجود دارد. این مقدار رواناب کاهش یافته به جریان زیرقشری، آگذری به آبخوان سطحی، آگذری

- model(A case study: Roin area, North Khorasan Province). *Soil Manag J.* 2013;(1):1-10.
- [8]. Palamuleni LG, Ndomba PM, Annegarn HJ. Evaluating land cover change and its impact on hydrological regime in Upper Shire river catchment, Malawi. *Reg Environ Chang.* 2011;11(4):845-55.
- [9]. Pikounis M, Varanou E, Baltas E, Dassaklis A, Mimikou M. Application of the SWAT model in the Pinios river basin under different land-use scenarios. *Glob Nest Int J.* 2003;5(2):71-9.
- [10]. Croke BFW, Merritt WS, Jakeman AJ. A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments. *J Hydrol.* 2004;291(1-2):115-31.
- [11]. Zhang L, Nan Z, Yu W, Ge Y. Modeling land-use and land-cover change and hydrological responses under consistent climate change scenarios in the Heihe River Basin, China. *Water Resour Manag.* 2015;29(13):4701-17.
- [12]. Mohammadi M, Nastaran M, Sahebgharani A. Sustainable spatial land use optimization through non-dominated sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II):(Case Study: Baboldasht District of Isfahan). *Indian J Sci Technol.* 2015;8(S3):118-29.
- [13]. Singh HV, Kalin L, Morrison A, Srivastava P, Lockaby G, Pan S. Post-validation of SWAT model in a coastal watershed for predicting land use/cover change impacts. *Hydrol Res.* 2015;46(6):837-53.
- [14]. Guo J, Su X, Singh VP, Jin J. Impacts of climate and land use/cover change on streamflow using SWAT and a separation method for the Xiyang River Basin in northwestern China. *Water.* 2016;8(5):192.
- [15]. Makhdoom M. *Fundamental Land use planning.* 15 nd ed. Tehran. University of Tehran Press; 2010. [Persian]
- [16]. Studies GPP. Identification and Development of Criteria for Assessing the Ecological Capacity of Uses in Golestan Province by Multi-Criteria Evaluation (MCE). 2009. p. 241.
- [17]. Kallali H, Anane M, Jellali S, Tarhouni J. GIS-based multi-criteria analysis for potential wastewater aquifer recharge sites. *Desalination.* 2007;215(1-3):111-9.
- [18]. Asgarian A, Jabbarian Amiri B, Shabani Alizadeh A, Fegghi J. Predicting the Spatial Growth and Urban Sprawl in Sari, Iran Using Markov Cellular Automata Model and Shannon Entropy [Internet]. *Iranian Journal of Applied*
- کاربری فعلی در منطقه جنگل وجود ندارد و بیشتر پوشش درختی به صورت پراکنده دیده می‌شود. بنابراین، با جنگل کاری با گونه‌های بومی و غیر بومی سازگار با شرایط بوم‌شناختی منطقه می‌توان به تراکم درختان منطقه افزود. علاوه بر این، در نقشه تناسب اراضی ارائه شده از وسعت مناطق مرتعی کم شده و به وسعت مناطق بدون پوشش افزوده شده است که این موضوع می‌تواند نشان دهد اراضی‌ای که در منطقه به صورت مرتعی استفاده می‌شوند توان تولید مناسبی ندارند و باید این اراضی مدتی رها شوند تا توان تولیدی خود را طی زمان به دست آورند.
- تشکر و قدردانی**
- این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده به شماره قرارداد ۱۰۶۰-ط-پ از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه تربت حیدریه می باشد که بدین وسیله تشکر و قدردانی می گردد.
- منابع**
- [1]. Asadi R, Maleki Nejad H, Fatahi A. Optimization of Land Use based on Water Resources by using Linear Programming (Case Study: Yazd City). *Water Manag Arid L.* 2015;(2):11-26. [Persian]
- [2]. ZHANG H, ZHANG X. Land use structural optimization of Lilin based on GMOP-ESV. *Trans Nonferrous Met Soc China.* 2011;21:s738-42.
- [3]. Shaygan M, Alimohammadi A, Mansourian A, Govara ZS, Kalami SM. Spatial multi-objective optimization approach for land use allocation using NSGA-II. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens.* 2014;7(3):906-16.
- [4]. Chakrabarty BK. *Urban management: Concepts, principles, techniques and education.* Cities. 2001;18(5):331-45.
- [5]. Deng Z, Zhang X, Li D, Pan G. Simulation of land use/land cover change and its effects on the hydrological characteristics of the upper reaches of the Hanjiang Basin. *Environ Earth Sci.* 2015;73(3):1119-32.
- [6]. fisheries management in Songkhla Lake, Thailand. *EEPSEA, IDRC Regional Office for Southeast and East Asia, Singapore, SG;* 2010.
- [7]. Maghami Moghim F, Karimi A, Haghnia G, Dourandish A. Determination of optimum cropping pattern in at local scale to reduce land degradation using a linear programming

- province using SWAT model. *Journal of Water and Soil Conservation*. 2013; 20(3): 253-259. [Persian]
- [24]. Rostamian R, Mousavi S.F, Heidarpour M, Afyuni M, Abaspour K. Application of SWAT 2000 Model for Estimating Runoff and Sediment in Beheshtabad Watershed, a Sub-basin of Northern Karun. *Journal of Water and Soil Science*. 2009;12(46-B):517-531. [Persian]
- [25]. Yu D, Xie P, Dong X, Su B, Hu X, Wang K, et al. The development of land use planning scenarios based on land suitability and its influences on eco-hydrological responses in the upstream of the Huaihe River basin. *Ecol Modell*. 2018;373:53–67.
- [26]. Salmani H, Mohseni Saravi M, Rohani H, Salajeghe A. Evaluation of Land Use Change and its Impact on the Hydrological Process in the Ghazaghli Watershed. *J watershed Manag Res* [Internet]. 2012;3(6). Available from: <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-120-fa.html> [Persian]
- [27]. Owji M.R, Nikkami D, Mahdian M.H, Mahmoudi Sh. Minimizing runoff and sedimentation by optimizing land use (Case Study: Jajrood watershed). *Journal of Water and Soil Conservation*. 2013; 20(4):183-199. [Persian]
- Ecology; 2014. 13-25 K1-Urban sprawl K1-Remote sensing K1-S p. Available from: <http://ijae.iut.ac.ir/article-1-427-fa.html> [Persian]
- [19]. Gyawali S, Techato K, Monprapussorn S, Yuangyai C. Integrating land use and water quality for environmental based land use planning for U-tapao river basin, Thailand. *Procedia-Social Behav Sci*. 2013;91:556–63.
- [20]. Joh H-K, Park J-Y, Shin H-J, Lee J-W, Kim S-J. The Uncertainty Analysis of SWAT Simulated Streamflow Applied to Chungju Dam Watershed. In: *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*. Korea Water Resources Association; 2011.
- [21]. Green CH, Tomer MD, Di Luzio M, Arnold JG. Hydrologic evaluation of the soil and water assessment tool for a large tile-drained watershed in Iowa. *Trans ASABE*. 2006;49(2):413–22.
- [22]. Santhi C, Arnold JG, Williams JR, Dugas WA, Srinivasan R, Hauck LM. validation of the swat model on a large RWER basin with point and nonpoint sources 1. *JAWRA J Am Water Resour Assoc*. 2001;37(5):1169–88.
- [23]. Akbari Mejdari H, Bahremand A.R, Najafinejad A, Sheikh V.B. Daily flow simulation of Chehelchai river Golestan