

## تحلیل تأثیر کاربری اراضی بر نتایج شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز نیرچای با استفاده از مدل SWAT

صیاد اصغری سراسکانرود<sup>۱\*</sup>، مهدی فعال نذیری<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۲۷

صص: ۸۴-۶۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۱

### چکیده

تأثیر کاربری اراضی بر فرایندهای هیدرولوژیکی و رواناب حوضه آبخیز می‌تواند به مدیریت چالش‌های منابع آب و برنامه‌ریزی صحیح در مدیریت حوضه‌های آبخیز کمک نماید. مدل‌های هیدرولوژیکی نمایش ساده شده‌ای از سیستم هیدرولوژی واقعی هستند که به مطالعه درباره کارکرد حوضه می‌پردازد بنابراین انتخاب مدل، نیاز به تشخیص قابلیت و محدودیت مدل‌های هیدرولوژی حوضه دارد. در این تحقیق، به منظور بررسی تأثیر کاربری اراضی بر رواناب حوضه آبخیز نیرچای، از تصاویر ماهواره‌ای لندست (OLI-TM) سال‌های (۱۹۹۰-۲۰۰۰-۲۰۱۸) استفاده شد. ابتدا تصاویر مربوطه اخذ و پیش‌پردازش‌های لازم اعمال شد. سپس طبقه‌بندی با استفاده از روش شیء‌گرا و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی صورت گرفت. از مدل (SWAT) جهت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه استفاده شد و از الگوریتم (SUFI-2) در نرم‌افزار (SWAT-CUP) برای تحلیل حساسیت، واسنجی، اعتبار سنجی بهره گرفته شد. با توجه به مقادیر پارامترهای NS و  $R^2$  و P و R به دست آمده در مرحله واسنجی (به ترتیب برابر با ۰/۷۴ و ۰/۷۵ و ۰/۸۸ و ۰/۸۲) و در مرحله اعتبار سنجی (به ترتیب برابر با ۰/۶۸ و ۰/۷۲ و ۰/۹۰ و ۰/۷۹)، می‌توان گفت این آمار دارای کارایی قابل قبولی در پیش‌بینی متغیرهای مورد بررسی در حوضه آبخیز نیرچای دارد. از این‌رو نتایج این پژوهش نشان داد مدل SWAT بهترین عملکرد را از شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز نیرچای نسبت به داده‌های مشاهداتی در دوره صحت یابی داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** پارامترهای هیدرولوژیکی، رواناب، طبقه‌بندی شیء‌گرا، کاربری اراضی، مدل SWAT

<sup>۱</sup> دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

\* نویسنده مسول مقاله: Sayyad.sasghari21@gmail.com

## مقدمه

و یکی مدل زمان پیوسته و نیمه توزیعی مکانی با پایه فیزیکی است که توسط جف آرنولد در سال ۱۹۹۹ برای سرویس تحقیقات کشاورزی امریکا تهیه شد و از آن زمان به‌طور پیوسته در حال توسعه بوده است. درک رابطه‌ی بین تغییرات کاربری اراضی و عوامل و به وجود آورنده‌ی آن و اثرات ثانوی آن بر رژیم هیدرولوژیکی، اطلاعات ضروری برای برنامه‌ریزی استفاده از زمان مدیریت و پایدار منابع طبیعی فراهم می‌کند. (پالامونی، ۲۰۱۱)، ایران نیز به دلیل قرار گرفتن در منطقه خشک و نیمه‌خشک، منابع آب کافی نداشته و از وضعیت مطلوبی برخوردار نیست. یقیناً وقوع خشکسالی‌ها، نوسان‌های اقلیمی، کمبود بارش و بی‌نظمی آن، مشکلاتی را برای این سرزمین به وجود خواهد آورد. از سوی دیگر افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای سبب تغییر رژیم بارش و دما و به دنبال آن، تغییرات در روند برخی از مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیکی در دهه‌های اخیر شده است. با توجه به اهمیت نقش تغییر کاربری اراضی بر روی هیدرولوژی مطالعات متعددی جهت توسعه مدل‌هایی با رویکرد شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی صورت گرفته است پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر میزان رواناب‌های سطحی با استفاده از مدل SWAT توسط پژوهشگران داخلی و خارجی صورت گرفته است. بلوچ و همکاران (۲۰۱۳) اثرهای کاربری اراضی و تغییر اقلیم را در رژیم جریان آب رودخانه در حوضه آبخیز کویسگیز در ترکیه با روش SWAT بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با گسترش شهرنشینی تغییری شدید در میزان، فرکانس و مدت‌زمان جریان رواناب ایجاد شده است. ژیانگ ژین و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از واسنجی مدل SWAT بیلان آبی را در یک حوضه آبریز کوهستانی در شمال غرب چین شبیه‌سازی کردند که نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد، خروجی‌های مدل، یک مرجع مناسب و قابل اطمینان برای ارزیابی و مدیریت منابع آب چنین حوضه‌هایی است. هاوری لنکو و همکاران (۲۰۱۶) آب موجود در خاک را توسط مدل SWAT مورد ارزیابی قرار دادند، دریافتند که این مدل با توجه به مقدارمحک های آماری  $R^2$  و نش-ساتکلیف که به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۷۵ گزارش شده بود، یک ابزار مناسب برای تخمین مقدار آب موجود خاک در مناطق با اطلاعات ضعیف است. کاویان و همکاران (۲۰۱۵) رواناب

کاربری اراضی یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر کنترل فرایند بارشی - رواناب در مقیاس وقایع سیل برای حوضه آبخیز است و مطالعات ثابت کرده‌اند که تغییرات غیریکنواخت در کاربری اراضی با پوشش گیاهی با عکس‌العمل هیدرولوژیکی حوضه آبخیز ارتباط تنگاتنگی دارد (سیریواردنا، ۲۰۰۶). به‌عبارت دیگر کاربری اراضی با الگوی نامناسب پوشش گیاهی، می‌تواند به هدر رفت شدید آب، خاک و مواد غذایی و تخریب اراضی منجر شود (وی، ۲۰۰۷) و تغییرات کوتاه‌مدت و بلندمدت اقلیمی و افزایش دما بر توزیع بارش، رواناب و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی تأثیرگذار باشد (یاراحمدی، ۲۰۱۴). یکی از موضوعات مهم در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی در منابع آب است (لیوو، ۲۰۰۵). تغییر کاربری اراضی چهار اثر مهم روی هیدرولوژی حوضه‌های آبخیزداری دارد که عبارت‌اند از: تغییر در خصوصیات دبی، پیک، تغییر در حجم کل رواناب، تغییر در کیفیت آب و تغییر در تعادل هیدرولوژیک. همچنین واکنش هیدرولوژیکی یک حوضه آبخیز، نماد جامعی از شرایط و خصوصیات محیط طبیعی آن حوضه می‌باشد. در یک اکوسیستم طبیعی، بهره‌برداری از زمین و ایجاد تغییر در شرایط، به‌ویژه پوشش گیاهی و کاربری اراضی آن اکوسیستم، بر پاسخ‌های هیدرولوژی مانند جاری شدن سیلاب و میزان فرسایش و رسوب منطقه تأثیرگذار می‌باشد از این‌رو کاربری اراضی و پوشش زمین، یکی از عوامل اصلی در مطالعات منابع آب و فرسایش و رسوب حوضه آبخیز می‌باشند (زاهدی، ۲۰۱۲). از طرفی، مطالعه اثرات تغییر کاربری اراضی در وضعیت هیدرولوژیکی و سیل‌خیزی حوضه به دلیل اینکه عوامل مؤثر در جریان رودخانه و شدت سیلاب از لحاظ زمانی و مکانی متغیر هستند، فرایندی بسیار پیچیده و وقت‌گیر است. این مشکل را می‌توان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجش‌ازدور که داده‌های به‌روز، قابل‌اعتماد و گسترده فراهم می‌کنند، برطرف کرد (رمضانی، ۲۰۱۴). اطلاعات حاصل از این نقشه‌ها می‌تواند در مدل‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گیرد که یکی از مدل‌های مورد استفاده به‌منظور بررسی اثر تغییر کاربری اراضی و تغییر اقلیم بر رواناب مدل SWAT<sup>۱</sup> است مدل SWAT یک شبیه‌ساز هیدرولوژیکی

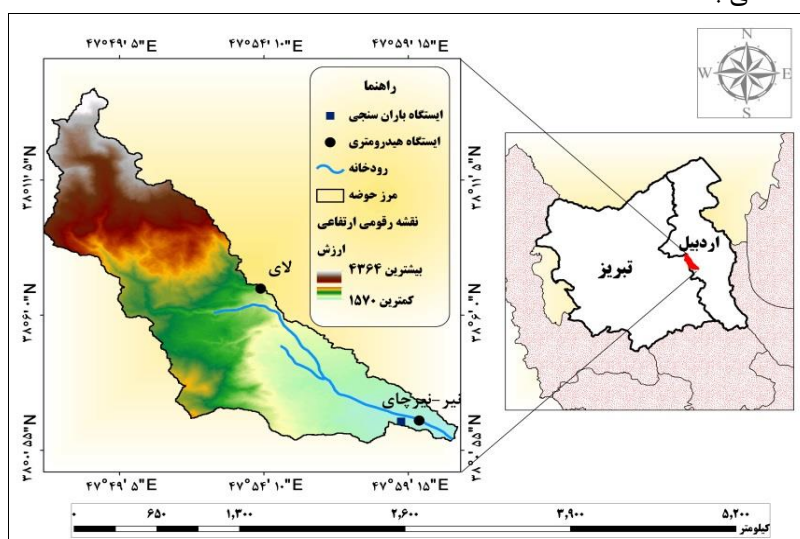
<sup>1</sup> Soil & Water Assessment Tool

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه حوضه آبخیز نیرچای واقع در استان اردبیل و شهرستان نیر می باشد که در محدوده جغرافیایی  $38^{\circ} 5'$  تا  $38^{\circ} 10'$  شرقی و  $47^{\circ} 50'$  تا  $47^{\circ} 55'$  شمالی قرار گرفته است نیرچای از ارتفاعات سبلان سرچشمه گرفته و با توجه به منبع تأمین اکثر جریانات آن از چشمه‌های دائمی و از ذخایر برفی، جز رودخانه‌های دائمی منطقه محسوب می‌شود. حداکثر ارتفاع رودخانه  $4364$  متر از سطح دریا در ارتفاعات ساوالان و حداقل ارتفاع آن  $1570$  متر در محل اتصال به رودخانه‌ی بالیقلو است. ایستگاه هیدرومتری نیر  $1605$  متر ارتفاع، طول شاخه‌ی اصلی رودخانه  $36/2$  کیلومتر، سطح حوضه  $171/75$  کیلومترمربع و محیط آن برابر  $75$  کیلومتر می باشد. نیرچای عملاً در شمال غربی روستای صندوقلو شکل می‌گیرد و جهت جریان رودخانه تا روستای صندوق لو از شمال به جنوب و پس‌از آن در جهت غربی شرقی است. در  $1/7$  کیلومتری پایین‌تر صندوقلو به دوشاخه تقسیم می‌شود و سپس از حوالی روستاهای سرخاب و ایرینجی گذشته و بالاخره پس از پیوستن شاخه‌ی لای چای وارد نیر می‌شود. (شکل ۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.

و بارسوب حوضه آبخیز رودخانه هراز مازندران را با بهره‌گیری از الگوی SWAT شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان‌دهنده زیاد بودن دقت شبیه‌سازی دبی جریان در هر چهار ایستگاه موردبررسی بود. مطالعات ذکرشده نشان می‌دهد که فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه تا چه حد می‌تواند به تغییرات بارندگی و دما حساس باشد و مهم‌تر، اینکه این حساسیت به‌طور قابل‌توجهی از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت می‌باشد. نوآوری این تحقیق نسبت به تحقیقات مشابه استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی شی گرا است که در تحقیقات قبلی عمدتاً از طبقه‌بندی پیکسل پایه برای تهیه نقشه‌های کاربری اراضی استفاده‌شده است نتایج تمامی مطالعات این حوضه نشان‌دهنده برتری کاملاً آشکار تکنیک‌های شی گرا به پیکسل پایه است همچنین در مدل SWAT تعدیلاتی بر اساس شرایط واقعی منطقه صورت گرفته است. این تحقیق در خصوص تأثیر کاربری اراضی بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه در درک و پیش‌بینی جریان رودخانه حائز اهمیت بوده و نقش مهمی در مدیریت منابع آب حوضه دارا می‌باشد و با توجه به شرایط آب و هوایی حوضه نیر چای تاکنون مطالعات کمی در خصوص پتانسیل تأثیر کاربری اراضی بر خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه نیر چای انجام‌شده است. هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر کاربری اراضی بر پتانسیل تولید رواناب‌های سطحی در حوضه نیر چای اردبیل با استفاده از سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل SWAT می‌باشد.

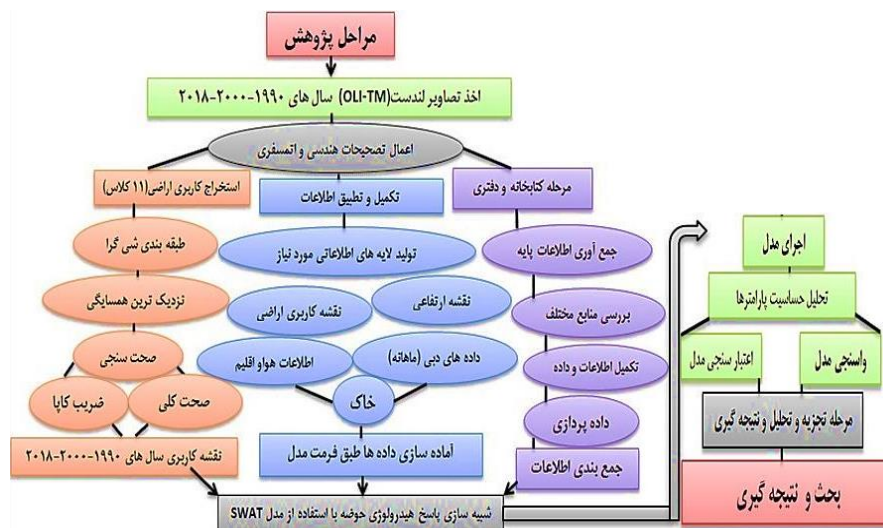


شکل ۱. محدوده منطقه مورد مطالعه (تهیه و ترسیم: نویسندگان، ۱۳۹۸)

داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی، خاک‌شناسی، مدل ارتفاعی رقومی (DEM)<sup>۱</sup>، شیب منطقه، نیز به‌عنوان ورودی مدل مورد نیاز است که در ادامه به اختصار توضیح داده خواهد شد. روند کلی مراحل انجام پژوهش به‌صورت خلاصه در (شکل ۲) نشان داده شده است.

### داده‌های اطلاعاتی مورد استفاده در مدل SWAT

یکی از مدل‌های مورد استفاده به‌منظور بررسی اثر تغییر کاربری اراضی و تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب در مقیاس حوضه‌ی آبخیز، مدل SWAT است که در ادامه به معرفی SWAT پرداخته شده است. ابتدا به معرفی داده‌های ورودی مدل SWAT می‌پردازیم که شامل



شکل ۲. فلوجارت مراحل انجام پژوهش و شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژی با استفاده از مدل SWAT

(تهیه: نویسنده، ۱۳۹۸)

(بالای ۹۰ درصد) کشت دیم می باشد (جدول ۴) برداشت ها عمدتاً بسیار کم می باشد به طوری که حداقل تأثیر را بر روی نتایج شبیه سازی مدل داشته است (شکل ۷). همچنین با توجه به جدول (۵) تمامی متغیرهایی که مدل توانایی مدل سازی آن را دارد آورده شده است که برای مثال آبیاری های یک محصول کشاورزی، برداشت یک محصول، کاشت یک محصول و ... در واسنجی مدل استفاده شده است (جدول ۵).

### تهیه نقشه کاربری اراضی

کاربری اراضی یکی از مهم‌ترین فاکتورهایی است که مقادیر رواناب، تبخیر و تعرق و فرسایش سطحی حوضه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در تحقیق حاضر نیز با هدف استخراج کاربری اراضی حوضه آبخیز نیرچای، ابتدا تصاویر ماهواره‌ای لنداست (TM - OLI) برای سال‌های (۱۹۹۰ - ۲۰۰۰ - ۲۰۱۸) در ماه جولای از سایت زمین‌شناسی آمریکا تهیه شد (جدول ۱). برای استخراج نقشه کاربری

### تهیه داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی

مدل SWAT برای شبیه‌سازی به آمار روزانه‌ی (بارش، دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش خورشیدی و نقطه شبنم) ایستگاه سینوپتیک و چند ایستگاه باران‌سنجی و دماسنجی در داخل یا اطراف حوضه نیاز دارد. در این مطالعه از آمار بازه زمانی سال‌های (۱۹۸۰ - ۲۰۱۵) ایستگاه سینوپتیک اردبیل و ایستگاه کلیماتولوژی شهرستان نیر استفاده شد و برای شبیه‌سازی رواناب در مراحل اعتبارسنجی و صحت سنجی، از آمار ماهانه دبی برای بازه زمانی سال‌های (۱۹۹۰ - ۲۰۱۷) استفاده شد. از محدودیت‌های تحقیق حاضر عدم توانایی مدل جهت مدلسازی نظیر برداشت‌های از رودخانه و زهکشی از رودخانه می باشد با توجه به این که داده‌های برداشت‌های مختلف از رودخانه موجود نمی باشد لذا کاربست آنها در مدل امکان پذیر نمی باشد از سوی دیگر میزان برداشت‌های مختلف از رودخانه به دلیل این که کاربری غالب از حوضه مراتع و کشاورزی حوضه عمدتاً

<sup>1</sup> Digital elevation model

شد. برای اجرا در مدل SWAT نوع کاربری با یک کد چهار رقمی قابل شناسایی توسط مدل مشخص می‌گردد. در نهایت این مقادیر با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.5 مورد بررسی قرار گرفت و سپس به منظور استخراج نقشه‌های مربوطه از نرم‌افزار ArcGIS 10.5 استفاده شد.

اراضی از باندهای مرئی و مادون قرمز استفاده شد و سپس به منظور آماده‌سازی تصاویر از نرم‌افزار Envi5.3 استفاده شد. سپس طبقه‌بندی با روش شیء‌گرا و با الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی<sup>۱</sup> توسط نرم‌افزار Ecognition صورت گرفت و پس از اعمال عملیات فیلتر نقشه نهایی حاصل

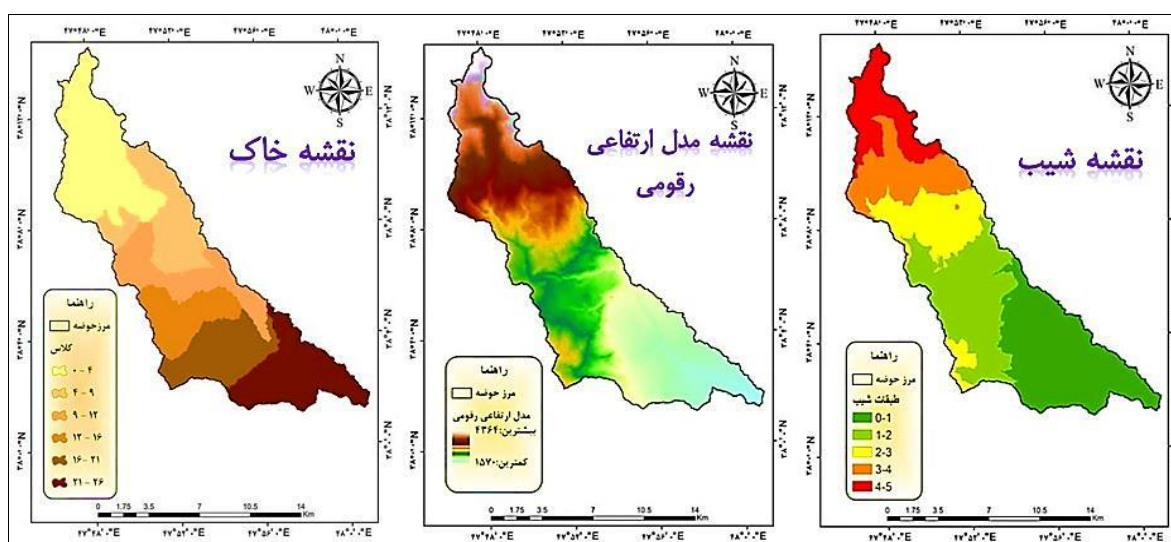
جدول ۱. خصوصیات تصویر (TM-OLI) ماهواره لندست ۸ (منبع: متادیتا)

تصویر	تاریخ اخذ	ردیف/گذر	زاویه ازیموت خورشید	زاویه ارتفاع خورشید
لندست TM	۱۹۹۰/۰۷/۰۲		۱۱۲/۱۰	۵۴/۹۴
	۲۰۰۰/۰۷/۰۲	۱۶۷/۳۴	۱۲۰/۶۶	۵۸/۸۸
لندست OLI	۲۰۱۸/۰۷/۰۲		۱۲۱/۴۲	۶۶/۴۴

اداره منابع طبیعی استان اردبیل تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. نقشه ارتفاعی رقمی با به‌کارگیری نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه مطالعاتی توسط نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تهیه شد. مدل SWAT از نقشه ارتفاعی رقمی برای طراحی حوضه، مرز زیر حوضه‌ها و شبکه جریان زیر حوضه‌ها استفاده می‌کند (نیتچ، ۲۰۰۰). در این تحقیق با استفاده از نقشه توپوگرافی منطقه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و تهیه مدل رقمی ارتفاعی، نقشه شیب حوضه آبخیز نیر جای تهیه شد. (شکل ۳) وضعیت نقشه خاک، مدل رقمی ارتفاعی، شیب محدوده مورد نظر را نشان می‌دهد.

### تهیه نقشه معیار های مدل

اطلاعات خاک‌شناسی از اساسی‌ترین اطلاعات مورد نیاز مدل می‌باشد مدل SWAT برای شبیه‌سازی حوضه به خصوصیات مختلف فیزیکی- شیمیایی خاک از قبیل بافت خاک، درصد رطوبت در دسترس خاک، هدایت هیدرولیکی، چگالی حجمی، مقدار کربن آلی و... برای مقدارهای مختلف خاک نیازمند است. داده‌های خاک، یک ورودی مهم برای هر مدل شبیه‌ساز هیدرولوژیکی است (بوسا، ۲۰۱۲). نقشه خاک منطقه با مقیاس ۱:۴۰۰۰۰ از



شکل ۳. نقشه‌های اطلاعات خاک‌شناسی، مدل رقمی ارتفاعی، نقشه شیب محدوده مورد مطالعه (تهیه: نویسندگان، ۱۳۹۸)

<sup>1</sup> Nearest neighbor

## معرفی مدل SWAT-واحدهای

### هیدرولوژیکی HRU

مدل SWAT، یک مدل پیوسته، پخشی و تعیینی است که در سال ۱۹۷۰ به‌عنوان تعیین کیفیت آب رودخانه‌ها پیشنهاد شد و با استفاده از ۴۰ مدل شبیه‌سازی تحول پیدا کرده و بسط داده شد و به‌صورت امروزی به‌عنوان مدل SWAT مطرح شد. SWAT به‌منظور مدل‌سازی ناهمگونی مکانی حوضه، آن را به زیر حوضه‌هایی تقسیم می‌کند و هر زیر حوضه را نیز بر مبنای لایه‌های اطلاعاتی توپوگرافی، کاربری اراضی و پوشش گیاهی و خاک به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی<sup>۱</sup> (HRU) بر اساس تشابه در مشخصات کاربری زمین، نوع خاک و شیب زمین در هر زیر حوضه تشکیل می‌شوند. بسیاری از متغیرها و فرایندهای اساسی هیدرولوژیکی مانند مقادیر رواناب، تبخیر و تعرق، انتقال رسوب و وضعیت متغیرهای کیفی جریان (مانند مقدار نیترات موجود در آب) در مقیاس این واحدها محاسبه می‌شوند. در ادامه مدل SWAT، با استفاده از مقادیر محاسبه شده در مقیاس واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی، اقدام به روند یابی جریان برای خروجی هر زیر حوضه می‌نماید.

### اجرای مدل SWAT

در این پژوهش، نسخه SWAT.93.7b.2009 که به صورت Extention قابل نصب بر روی Arc Gis می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت. قبل از اجرای مدل داده‌های ورودی شامل داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، نقشه‌های توپوگرافی، خاک شناسی، کاربری اراضی، شبکه آبراههای و مرز زیرحوضه‌ها آماده‌سازی شدند. برای شروع کار با مدل، ابتدا نقشه DEM که قبلاً تهیه شده است، به محیط نرم افزار فراخوانده می‌شود. در این مرحله، محدوده آبخیز و زیرحوضه‌ها و خصوصیات فیزیکی آبخیز به وسیله مدل محاسبه می‌شود. سپس نقشه زیرحوضه‌های ترسیم شده برای حوزه آبخیز نیر چای مشخص می‌شود. در مرحله بعد، با استفاده از نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و طبقات شیب، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی تعریف شدند که حاصل کار این مرحله همان تشکیل HRU نیز می‌باشد. پس از تعریف HRU‌ها داده‌های هواشناسی وارد مدل شدند. در این مرحله مشخصات دو ایستگاه مرجع یعنی

ایستگاه‌های نیر چای و لای که داده‌های آماری بلندمدت آن از قبل در پایگاه داده مدل وارد شده است، به همراه مشخصات و داده‌های یک ایستگاه باران سنجی نیر چای به مدل معرفی شد. در مرحله بعد تمامی اطلاعات محصولات آبی نیر چای که از اداره جهاد و کشاورزی نیر تهیه شده بود، وارد مدل شد این اطلاعات شامل (تاریخ کشت، زمان آبیاری، مقدار آب مصرفی در هر آبیاری، و زمان برداشت) برای تک تک زیر حوضه‌ها اعمال شد. پس از این مرحله، دستور اجرای مدل داده شد و نتایج استخراج شدند. بر اساس این تجربه و با توجه به زیاد بودن داده‌های ورودی، مشخص شد که برای شناخت کامل مدل و انجام موفق مرحله واسنجی، لازم است تا برای عوامل مدل تحلیل حساسیت انجام شود.

### اجرای واسنجی و اعتبار سنجی مدل

واسنجی مدل SWAT به دو صورت دستی و یا با استفاده از روش‌های اتوکالیبراسیون در نرم افزار کاربردی swat-cup که از سایت

<https://www.2w2e.com/home/SwatCup>

قابل دانلود است، امکان پذیر می‌باشد. در پژوهش حاضر، این مرحله به صورت اتوکالیبراسیون و با استفاده از برنامه SUFI\_2 و بر اساس آمار سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ صورت گرفت. مراحل اجرای برنامه بدین صورت است که پس از تعیین محدوده منطقی و مناسب برای هر یک از عوامل مدل توسط کاربر (که بایستی با دقت و در نظر گرفتن شرایط فیزیکی منطقه انجام شود) و تعیین تعداد تکرار شبیه‌سازی، برنامه با نمونه‌گیری لاتین هاپرکیوب در فضای عوامل (بازه تعیین شده برای هر یک از عوامل) به صورت تصادفی مقادیری برای عوامل انتخاب می‌کند. بدین ترتیب، اگر n تکرار برای اجرای مدل در نظر گرفته شود، n ترکیب مختلف از عوامل ایجاد می‌شود. سپس مدل SWAT، n بار اجرا می‌شود و سری زمانی خروجی‌های مدل در فایل‌هایی ذخیره می‌شود. در ادامه، معیارهای برآورد عدم قطعیت و شاخص‌های نیکویی برازش مانند ضریب تعیین، ضریب نش-ساتکلیف و ... برای بهترین شبیه‌سازی محاسبه می‌شوند. با استفاده از نتایج تحلیل حساسیت مدل، عوامل مهم و موثر شناسایی شده و در بهینه کردن مدل مورد استفاده قرار گرفت. سپس

<sup>1</sup> Hydrologic Response Units

گردید. NS مقدار بهینه‌ای برابر ۱ دارد که عملکرد مدل را با استفاده از معیار NS دسته‌بندی کردند: کمتر از ۰/۵ عملکرد نامطلوب، بین ۰/۵ و ۰/۶۵ عملکرد مطلوب، بین ۰/۶۵ و ۰/۷۵ عملکرد خوب و بین ۰/۷۵ تا ۱ عملکرد خیلی خوب را شامل می‌شود. این مقدار هرچه بیشتر باشد عملکرد مدل بهتر است (موریاسی، ۲۰۰۷). در (جدول ۲) سال‌های مربوط به دوره‌های واسنجی و اعتبار سنجی و کاربری مدل نمایش داده شده است. واسنجی مدل به صورت مقایسه آمار اندازه‌گیری شده با آمار شبیه‌سازی شده، به منظور بهینه‌سازی پارامترهای مدل انجام می‌گیرد. بعد از واسنجی، عملیات اعتبار سنجی، برای تأیید پارامترهای واسنجی شده برای سال‌های باقیمانده از کل دوره انجام گرفت. در اعتبار سنجی مدل داده‌های مشاهده‌ای به عنوان کمک و مکمل برای اصلاح پارامترهای محاسباتی مورد نیاز مدل SWAT استفاده می‌شود. برای آماده کردن مدل SWAT- CUP ابتدا باید پارامترهای حساسیت به مدل معرفی گردد.

جدول ۲. سال‌های مربوط به دوره‌های واسنجی و اعتبار سنجی مدل و کاربری اراضی مورد استفاده (تهیه: نویسنندگان، ۱۳۹۸)

اعتبار سنجی	واسنجی	کاربری
۱۹۹۰-۲۱۹۹۲	۱۹۸۷-۱۹۹۰	۱۹۹۰
۲۰۱۰-۲۰۱۳	۲۰۰۹-۲۰۰۲	۲۰۰۰
۲۰۱۵-۲۰۱۷	۲۰۱۰-۲۰۱۴	۲۰۱۸

### آنالیز حساسیت پارامترها

بعد از اجرای اولیه مدل تحلیل حساسیت پارامترهای مدل در خروجی حوضه نیرچای صورت گرفت. آنالیز حساسیت برای تعیین اینکه یک مدل چقدر به تغییر مقدار امتیاز عاملی از آن و تغییر در ساختار مدل حساس است، انجام می‌شود (در این تحقیق فقط به بررسی حساسیت عوامل جهت واسنجی و اعتبار سنجی پرداخته شده است). در مدل‌های توزیعی مانند SWAT با اجرای یک مکانیزم مناسب می‌توان تعداد عوامل را برای فرایند واسنجی کاهش داد. هدف اصلی از آنالیز حساسیت، تعیین ورودی

اعتبارسنجی مدل با استفاده از مقادیر عوامل اصلاح شده در مرحله واسنجی و بر اساس آمار سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ صورت گرفت.

### نرم‌افزار SWAT-CUP<sup>۱</sup> و الگوریتم SUFI-2

به منظور واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل عدم قطعیت حوضه‌ی آبخیز نیر چای، از بسته‌ی نرم‌افزاری SWAT-CUP استفاده شد. این بسته‌ی نرم‌افزاری حاوی پنج الگوریتم بهینه‌سازی شامل PSO, GLUE, ParaSol, SUFI-2 و MCMC است. در این پژوهش از الگوریتم SUFI-2 به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده گردید. الگوریتم SUFI-2 توسط (عباسپور، ۲۰۰۷) ارائه شد. این الگوریتم به عنوان یک الگوریتم واسنجی و مبتنی بر عدم قطعیت است. در این الگوریتم SUFI-2 مناسب بودن شبیه‌سازی‌ها با استفاده از دو معیار p-factor و r-factor سنجیده می‌شود که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

### تحلیل واسنجی<sup>۲</sup> و اعتبار سنجی<sup>۳</sup> و تحلیل عدم قطعیت مدل در SWAT

ارزیابی نتایج واسنجی توسط معیارهای  $R^2$ ، Factor، P-Factor، R- و NS صورت می‌گیرد. P-Factor نشان‌دهنده‌ی درصد نقاط مشاهداتی قرار گرفته در داخل محدوده ۹۵ PPU<sup>۵</sup> است و R-Factor نماینده‌ی از ضخامت این محدوده است. SUFI-2 محدوده‌ی مجاز خروجی‌ها را حد ۹۵ درصد عدم قطعیت پیش‌بینی شده (۲/۵ درصد تابع توزیع تجمعی احتمال به عنوان حد پایین و ۹۷/۵ درصد تابع توزیع تجمعی احتمال به عنوان حد بالا) قرار می‌دهد که این حد مجاز ۹۵ درصد عدم قطعیت<sup>۶</sup> پیش‌بینی، با نماد ۹۵ PPU نشان داده می‌شود. مقدار P-Factor بزرگ‌تر از ۰/۶ یا ۰/۷ و مقدار R-Factor نزدیک به یک پیشنهاد شده است (عباسپور، ۲۰۰۷). این مقادیر برای واسنجی مدل به ازای مشاهدات رواناب است که در این پژوهش هدف بررسی رواناب می‌باشد که اهمیت پیدا کرده است. از دو معیار NS و  $R^2$  برای بررسی دقت شبیه‌سازی‌ها استفاده

### uncertainty

۷ بدلیل زیاد شدن تعداد صفحات مقاله از نمایش نمودارهای گرافیکی و آمار عددی مدل SWAT از کاربری سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۱۸ صرف نظر شد و فقط آمار مدل SWAT کاربری اراضی سال ۲۰۰۰ در این مقاله قرار گرفت.

<sup>1</sup> SWAT Calibration and Uncertainty Procedures

<sup>2</sup> Calibration

<sup>3</sup> Validation

<sup>4</sup> Coefficient of Determination

<sup>5</sup> Percent Prediction Uncertainty (PPU)

<sup>6</sup> Lower, median, upper limits of 95% prediction

**ضریب نش - شاتکلیف (NS)<sup>4</sup>**

اختلاف نسبی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{mi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{mi} - \bar{Q}_m)^2} \quad (1)$$

که در آن،  $Q_{mi}$ ،  $Q_{si}$ ،  $\bar{Q}_m$  به ترتیب مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده، رواناب اندازه‌گیری شده و میانگین مقادیر رواناب اندازه‌گیری شده می‌باشند (موریاسی، ۲۰۰۷).

**فاکتورهای P<sup>۵</sup> و R<sup>۶</sup>**

برای P، مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۵ مطلوب هستند و برای R، مقادیر کمتر از ۱ باشند، مطلوب می‌باشند (رابطه ۴) به صورت زیر می‌باشد:

$$P - \text{factor} = \frac{N_{ob}}{N_T} \quad (2)$$

$N_{ob}$  برابر داده مشاهده‌ای است که در محدوده ۹۵ درصد عدم قطعیت تخمین (۹۵ppu) (حدود بالا و پایین ۹۵ppu برای هر داده مشاهده‌ای) قرار گرفته است و  $N_T$ : تعداد کل داده‌های مشاهده‌ای است. (رابطه ۵) R نیز به صورت زیر است:

$$R - \text{factor} = \frac{1}{k} \frac{\sum_{i=1}^k (X_U - X_L)_i}{\sigma_x} \quad (3)$$

k: تعداد نقاط مشاهده‌ای،  $X_U$  و  $X_L$  به ترتیب، حد پایین و بالای ۹۵ppu و  $\sigma_x$ : انحراف معیار متغیر اندازه‌گیری شده X می‌باشند (عباسپور، ۲۰۰۷).

**ضریب تبیین (R<sup>2</sup>)<sup>۸</sup>**

رابطه برآورد ضریب تبیین به صورت زیر می‌باشد:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{simav})(Q_i^{obs} - Q_i^{obsav})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{simav})^2 \sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{obsav})^2} \quad (4)$$

که در آن:  $Q_i^{sim}$  مقدار برآوردی بر نقطه نام،  $Q_i^{simav}$  مقدار میانگین دبی برآوردی،  $Q_i^{obs}$  مقدار مشاهده‌ای برای نقطه نام،  $Q_i^{obsav}$  میانگین دبی مشاهداتی و n تعداد داده‌ها می‌باشد (نگلکرک، ۱۹۹۱).

هایی است که مشارکت بیشتری در تغییر خروجی دارند و اینکه کدام عامل همبستگی بیشتری با خروجی دارد. با انجام تحلیل حساسیت می‌توان عوامل مهم و حساس را شناخته و با تمرکز بر روی آنها واسنجی مدل را سریع‌تر انجام داد. برای انجام آنالیز حساسیت روش "یک پارامتر در هر بار"<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گرفت که متعارف‌ترین روش برای این کار می‌باشد و محققین مختلفی از جمله وایت و همکاران (۲۰۰۵)، جان و همکاران (۲۰۰۷) از این روش استفاده کرده‌اند. نتایج تحلیل حساسیت انجام گرفته با استفاده از روش LH-OAT بر روی ۵۷ پارامتر مورد بررسی قرار گرفت و در نتیجه ۲۱ پارامتر به عنوان حساس‌ترین پارامترهای مؤثر بر حوضه آبخیز نیر چای بر پایه زمانی ماهانه با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP مشخص شد (نش، ۱۹۷۰). خروجی مدل تحت تأثیر پارامترهای مدل قرار می‌گیرد به طوری که پارامترهای مختلف دخیل در اجرای مدل با اثرات متفاوت بر روی نتایج مدل و نیز بر روی هم‌دیگر نقش مهمی را در روند شبیه‌سازی مدل ایفا می‌کنند. مدل SWAT با داشتن مدل‌های آزمون حساسیت نظیر (NS<sup>۲</sup>)، (PBIAS)<sup>۳</sup> و دیگر مدل‌های موجود این امکان را می‌دهد که هنگام اجرای مدل، مقدار حساسیت مدل را نسبت به پارامترهایی که تغییر داده می‌شود، مشاهده نموده و با دید بهتری برای اصلاح شبیه‌سازی گام برداشته شود. مدل SWAT به دلیل غیر بهینه بودن، باید به وسیله مدل‌های آزمون حساسیت، به صورت دستی، بهینه شود. در این پژوهش آنالیز حساسیت با استفاده از شاخص‌های t-stat و p-value در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP انجام گرفت. شایان ذکر است در کالیبره، ابتدا پارامترهای حساس به مدل داده می‌شود و مدل براساس روش‌های بهینه‌سازی استوکستیک یک ترکیبی از بهترین‌ها را ساخته و اعلام می‌کند.

**روابط شاخص‌های ارزیابی مدل SWAT**

روش‌های زیر برای ارزیابی مدل SWAT به کار گرفته شدند:

<sup>5</sup> Deflection amplification factor

<sup>6</sup> Response modification factors

<sup>7</sup> Percent Prediction Uncertainty (PPU)

<sup>8</sup> Coefficient of Determination

<sup>1</sup> One Factor At a Time

<sup>2</sup> Nash-Sutcliffe Coefficient

<sup>3</sup> Parameter Bias

<sup>4</sup> Nash-Sutcliffe Coefficient

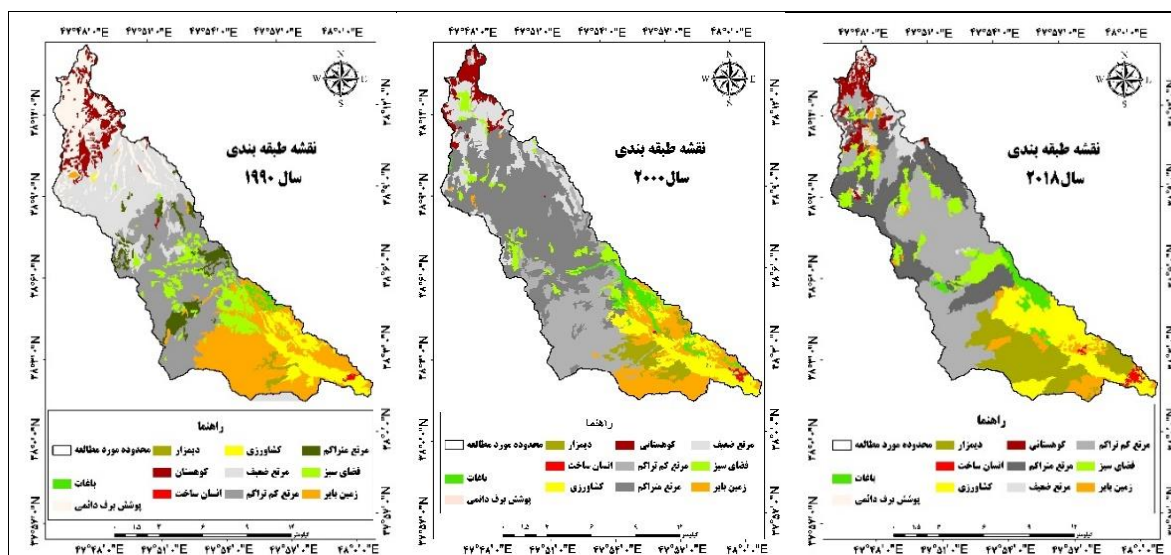


## نتایج و بحث

## نتایج طبقه‌بندی کاربری اراضی

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر کاربری اراضی بر پتانسیل تولید رواناب‌های سطحی در حوضه نیر چای اردبیل با استفاده از سنجش از دور، سیستم اطلاعات

جغرافیایی و مدل SWAT اقدام شد. به همین منظور نقشه‌های طبقه‌بندی کاربری اراضی محدوده نیر چای برای سال‌های (۱۹۹۰-۲۰۰۰-۲۰۱۸) تهیه شد. (شکل ۴) نقشه‌های طبقه‌بندی کاربری اراضی مربوط به بازه زمانی مشخص شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۴. نقشه طبقه‌بندی شده کاربری اراضی سال ۲۰۱۸-۲۰۰۰-۱۹۹۰ (تهیه: نویسندگان، ۱۳۹۸)

برای سال‌های (۱۹۹۰-۲۰۰۰-۲۰۱۸) مورد بررسی و نتایج قابل مشاهده است.

نتایج بدست آمده از (جدول ۴) نشان می‌دهد در بازه زمانی سال‌های ۱۹۹۰-۲۰۱۸ تغییرات چشم‌گیری قابل مشاهده است که عمده‌ترین این کاربری‌ها می‌توان، به مرتع متراکم اشاره کرد که در اثر بهره‌برداری شدید، به مرور مساحت خود را به دیگر کاربری‌هایی همچون، مناطق مسکونی و مناطق کشاورزی و دیمزار، اختصاص داده‌اند و همچنین کاربری زمین بایر باگذشت زمان مساحتی رو به کاهش داشته و به دیمزار و زمین کشاورزی تبدیل شده است. با توجه به نتایج استخراج شده کاربری‌ها، در محدوده نیر چای درصد مساحت باغات و مناطق آبی به طور میانگین (در سال‌های ذکر شده) ۲/۳ و مناطق مسکونی به طور میانگین (در سال‌های ذکر شده) ۱/۴ از مجموع کل کاربری‌ها را به خود اختصاص داده‌اند که می‌توان گفت این کاربری‌ها مساحت بسیار ناچیزی را نسبت به کل منطقه دارا می‌باشند و در نتیجه مقدار برداشت‌ها بسیار کم بوده و تأثیر اندکی بر دبی ایجاد می‌کنند.

## صحت سنجی طبقه‌بندی

تعداد ۱۱ کلاس شامل، نواحی انسان‌ساخت، مرتع، مرتع متراکم، مرتع کم تراکم، برف، پوشش گیاهی، دیمزار، مناطق کوهستانی، مناطق کشاورزی، زمین بایر و باغات برای ناحیه مورد مطالعه استخراج گردید و سپس صحت طبقه‌بندی برای سه سال مورد نظر در نرم‌افزار ENVI 5.3 بررسی و تعیین شد (جدول ۳).

نتایج (جدول ۳) نشان می‌دهد که در سال ۱۹۹۰ صحت کلی ۹۵ درصد و ضریب کاپا برابر با ۰/۹۳ و در سال ۲۰۰۰ صحت کلی ۹۰ درصد و ضریب کاپا برابر ۰/۹۷ و در سال ۲۰۱۸ صحت کلی برابر با ۹۳ درصد و ضریب کاپا ۰/۹۱ می‌باشد و با توجه به صحت کلی نقشه‌ها و با استناد و مقایسه با منابعی نظیر (لیلسند، ۲۰۰۹) که ضرایب صحت کلی بزرگ‌تر از ۸۵ درصد را قابل قبول عنوان کرده‌اند، نتایج حاصله از طبقه‌بندی کاربری‌ها چه از نظر تک‌تک کاربری‌ها و چه از نظر مجموع صحت و آمار کاپا از صحت قابل قبولی در ارتباط با اطلاعات تولید شده برخوردار شده است. همچنین در (جدول ۴) مساحت هر یک از کاربری‌ها

جدول ۳. بررسی صحت طبقه‌بندی کاربری اراضی (تهیه: نویسندگان، ۱۳۹۸)

سال	صحت کلی	ضریب کاپا
۱۹۹۰	۹۵٪	۰/۹۳
۲۰۰۰	۹۸٪	۰/۹۷
۲۰۱۸	۹۳٪	۰/۹۱

جدول ۴. درصد مساحت کاربری حاصل از طبقه‌بندی تصاویر ماه‌های ۱۹۹۰-۲۰۰۰-۲۰۱۸ (تهیه: نویسندگان، ۱۳۹۸)

کلاس کاربری اراضی	۱۹۹۰	۲۰۰۰	۲۰۱۸
دیمنزار	۰/۸۵	۴/۳۱	۲/۵۱
مناطق کوهستانی	۴/۶۵	۳/۱۸	۳/۱۰
مناطق انسان‌ساخت	۰/۱۶	۱/۲۸	۴/۵۸
مناطق کشاورزی	۶/۸۸	۷/۶۰	۹/۸۳
مرتع	۱۹/۴۵	۱۰/۶۲	۳/۶۶
برف	۱۱/۴۸	۰/۲۷	۱/۳۱
مرتع کم تراکم	۲۴	۱۹/۲۹	۱۶/۸۳
مرتع متراکم	۴/۴۳	۳/۸۲	۲/۴۷
پوشش گیاهی	۶/۹۷	۴/۶۶	۲/۴۱
زمین بایر	۱۹/۸۳	۱۱/۱۷	۴/۸۳
باغات	۰/۸۷	۲/۹۵	۹/۰۹

### نتایج پارامترهای حساس هیدرولوژیکی و

#### هیدروژئولوژیکی در حوضه

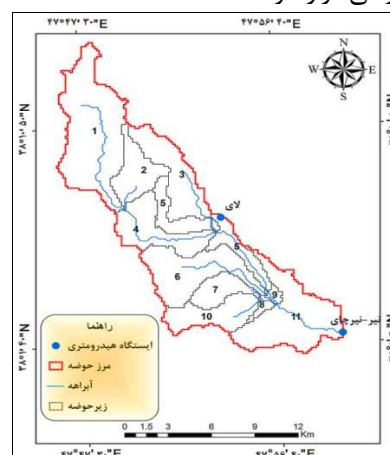
در (جدول ۵) مقدار به‌دست آمده برای پارامترهای بهینه شده هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی حوضه نیر چای شامل، ۲۱ پارامتر حساس که اطلاعات مفیدی از حوضه مذکور است نشان داده شده است.

از (جدول ۵) این نتایج مشاهده می‌شود که دمای بارش و ذوب برف، پارامترهایی هستند که با استفاده از دمای متوسط حوضه و درصد مساحت پوشش برف در حوضه توسط مدل محاسبه می‌شود. بیشینه و کمینه نرخ ذوب برف در حوضه مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به اطلاعات موجود برای حوضه نیر چای این پارامترها به ترتیب ۸/۲۴ و ۴/۷۳ به دست آمد در صورتی که کاویان و همکاران (۱۳۹۴) برای حوضه آبخیز هراز مازندران برای این پارامتر اعداد ۱۰ و ۳/۹۲ را به دست آوردند که با توجه به مقایسه دو حوضه از نظر اقلیمی این تفاوت‌ها قابل قبول به نظر می‌رسد. مهم‌ترین این پارامترها، زمان تأخیر در تغذیه آبخوان (gw-delay)، هدایت هیدرولیکی اشباع (sol-k) و شماره منحنی (CN) می‌باشد (کاویان و همکاران ۱۳۹۴). عمانی و ابریشمچی (۱۳۸۵) و فریسن و همکاران

### نتایج مدل در SWAT و نرم‌افزار SWAT-CUP

#### اجرای مدل در نرم‌افزار SWAT

حوضه‌ی آبخیز مورد مطالعه بر اساس روش ذکر شده و با استفاده از نقشه‌های DEM، کاربری اراضی و خاک‌شناسی به ۱۱ زیر حوضه تقسیم شد (شکل ۵). بدین ترتیب، رواناب در هر HRU به‌طور مستقل محاسبه و روند یابی شد تا در نهایت، مقدار کل رواناب حوضه تعیین و مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۵. نقشه زیر حوضه‌ها و خطوط جریان حاصل از

اجرای مدل SWAT در حوضه آبخیز نیر چای

(تهیه: نویسندگان، ۱۳۹۸)

نظر می‌رسد در محدوده قابل قبول استخراج شده است. همچنین یکی از روش‌های معمول تخمین رواناب در سطح حوضه روش SCS است که اساس این روش تعیین دقیق مقدار (CN) می‌باشد که با استفاده از پوشش گیاهی، شیب متوسط حوضه، رطوبت اولیه و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک تعیین می‌شود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای مربوط به اجزاء بیلان با دقت خوبی برآورد گردیده و قابل قبول هستند.

(۲۰۰۷) نیز معتقدند که از حساس‌ترین پارامترها در تخمین رواناب شماره منحنی (CN) می‌باشد و یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های هیدرودینامیک خاک هدایت هیدرولیکی اشباع (sol-k) می‌باشد که ساده‌ترین روش برای تعیین آن استفاده از روش استوانه مضاعف می‌باشد که در سطح حوضه آبخیز استفاده از این روش مشکل خواهد بود. مقدار این پارامتر در محدوده هدایت هیدرولیکی خاک در حوضه نیرچای (۲۱-۱۱) تخمین زده شد که با توجه به نوع پوشش خاک منطقه مورد مطالعه به

جدول ۵. مقدار نهایی پارامترهای به‌کاررفته برای واسنجی رواناب در مدل SWAT (تهیه: نویسندگان، ۱۳۹۸)

محدوده تغییرات کمترین/بیشترین	تعریف پارامتر	پارامتر
۰/۴ - ۰/۲	عدد CN	CN2
۱۳۰ - ۵	هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال اصلی	CH_K2
۰/۲ - ۰	ضریب تعیین نفوذ به سفره آب زیرزمین عمیق با صعود موتینگ از سفره آب کم‌عمق	GW-REVAP
۱ - ۰/۷	برگ خرید تبخیر آب از خاک	ESCO
۱ - ۰	ضریب آلفای آب زیرزمینی	ALPHA_BF
۰/۴ - -۰/۴	آب موجود در لایه اولیه خاک	SOL_AWC
۴۵۰ - ۰	حداقل ذخیره آب زیرزمینی برای رخ دادن REVAP	REVAPMN
۵ - -۵	متوسط دمای هوا برای تبدیل باران به برف	SMTMP
۱۰ - ۰	نرخ ذوب برف	SMFMN
۱۰ - ۰	نرخ ذوب برف	SMFMX
۲۱ - ۱۱	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	SOL_K
۰/۶ - -۰/۶	چگالی ظاهری خاک	SOL_BD
۰/۳ - ۰	هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال	CH_N2
۰/۲ - ۰	متوسط طول شیب	SLSUBBSN
۱ - ۰	ضریب تأخیر دمای توده برف	TIMP
۱۰۰۰ - -۱۰۰۰	تراز ارتفاعی	PLAPS
۱۰ - -۱۰	تراز ارتفاعی	TLAPS
۱ - ۰/۷	ضریب جبران جذب گیاهی	EPCO
۴۰۰۰ - ۱۰۰۰	عمق آستانه آب فرابخوان کم‌عمق به جریان	GWQMN
۱ - ۰	ضریب نفوذ آبخوان	RCHRG_DP
۳۵۰ - ۰	زمان تأخیر برای تغذیه آبخوان	GW_DELAY

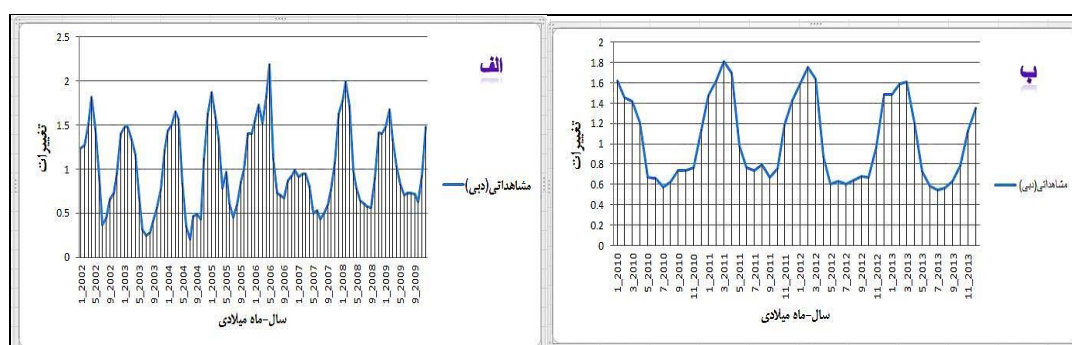
جدول ۵. نتایج آماری واسنجی و اعتبار سنجی سال ۲۰۰۰ (تهیه: نویسندگان، ۱۳۹۸)

دوره واسنجی	شاخص‌های ارزیابی مدل	سال
۰/۷۴	NS	۱ ⋮
۰/۷۵	R <sup>2</sup>	
۰/۸۸	P-factor	
۰/۸۲	R-factor	
دوره اعتبار سنجی	شاخص‌های ارزیابی مدل	سال
۰/۶۸	NS	۱ ⋮
۰/۷۲	R <sup>2</sup>	
۰/۹۰	P-factor	
۰/۷۹	R-factor	

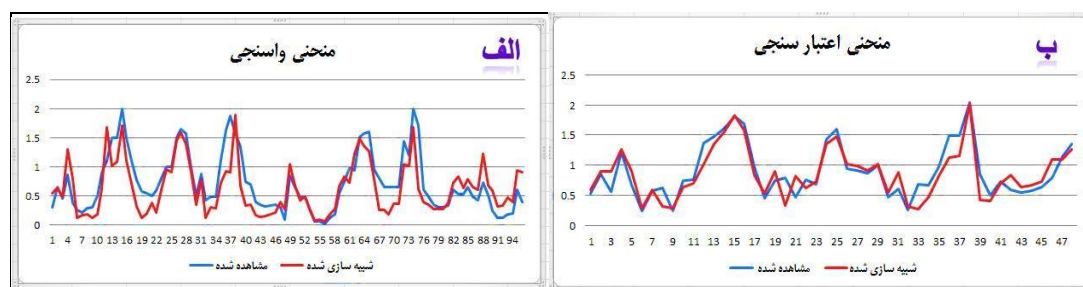
ارزیابی شد و همین‌طور در مرحله اعتبارسنجی به‌منظور بررسی درستی انتخاب پارامترها در دوره واسنجی اقدام شد. اعتبارسنجی برای آزمون حساسیت لازم پارامترهای استفاده شده، در دوره‌ی واسنجی اجرا می‌شود. در اعتبارسنجی نیز همانند واسنجی باید نتایج خوبی برای معیارهای عملکرد مدل به دست آید تا بتوان شبیه‌سازی را پذیرفت. در اعتبارسنجی مقدار P-Factor بیشتر از دوره واسنجی است و نشان‌دهنده‌ی پیش‌بینی بهتر مدل در این مرحله است و مقادیر به دست آمده در اعتبارسنجی نزدیک به واسنجی بوده است. با توجه به نتایج کلی می‌توان گفت مقدار ضریب تبیین بالاتر از  $0/6$  ضریب نش - ساتکلیف بالاتر از  $0/5$  و مقدار P بالاتر از  $0/6$  و R نزدیک به یک می‌باشد است که در محدوده‌ی رضایت بخشی قرار دارند و شبیه‌سازی نسبتاً خوب دبی در این مرحله قابل مشاهده است.

## نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رواناب در نرم‌افزار SWAT-CUP

در این مطالعه، نتایج واسنجی مدل برای دبی ماهانه در بازه‌ی زمانی سال‌های (۲۰۰۲-۲۰۰۹) و اعتبارسنجی در بازه‌ی زمانی (۲۰۱۰-۲۰۱۳) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مقادیر مشاهداتی می‌توان نتیجه گرفت که در فصل تابستان مقدار دبی کمتر از دیگر فصل‌های سال است که به دلیل آبیاری زمین‌های کشاورزی مقدار دبی مشاهداتی کمتری را نمایش می‌دهد. در (شکل ۶) نمودار مشاهداتی دبی ماهانه در بازه‌ی زمانی سال‌های ذکر شده برای واسنجی و اعتبارسنجی قابل مشاهده است. با توجه به نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل که به‌صورت عددی و گرافیکی در (جدول ۵) (شکل ۷) نمایش داده شده است مقادیر  $R^2$ , P-Factor, R-Factor، به ترتیب  $0/74$  و  $0/75$  و  $0/89$  و  $0/82$  را به خود اختصاص داده‌اند بر این اساس نتایج به‌دست آمده در مرحله واسنجی قابل قبول



شکل ۶. الف) منحنی مقادیر مشاهداتی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۲-۲۰۰۹ برای واسنجی (ب) منحنی مقادیر مشاهداتی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۳ برای اعتبارسنجی (تهیه: نویسندگان، ۱۳۹۸)



شکل ۷. الف) منحنی رابطه بین مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دوره‌ی واسنجی (ب) منحنی رابطه بین مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی اعتبارسنجی (تهیه: نویسندگان، ۱۳۹۸)

چرخه هیدرولوژیکی می‌باشد. به‌طورکلی نتایج این پژوهش حاکی از آن است که در برنامه‌ی SUFI2 و در پایه زمانی ماهانه شماره منحنی رواناب به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر می‌باشد. از طرفی ارتباط مستقیمی بین این پارامتر و نوع

## نتیجه‌گیری

یکی از کاربردهای ویژه مدل SWAT بررسی تأثیر کاربری اراضی بر رواناب و توانایی بررسی مؤلفه‌های مختلف

مثبت بر رژیم هیدرولوژیکی منجر شدند. همچنین نتایج به دست آمده در این مطالعه با یافته‌های بتریس و همکاران (۲۰۱۱) که بیانگر تأثیر فعالیت‌های مدیریتی حفاظت خاک بر رسوب با توجه به نوع عملیات حفاظتی در نظر گرفته شده از ۲۹ تا ۶۸ درصد است. سانتوس و همکاران (۲۰۱۴)، ونگ و همکاران (۲۰۰۰)، سعادتی و همکاران (۲۰۰۶)، لوپز-ویسنت و همکاران (۲۰۱۱) مبنی بر تأثیر مثبت افزایش پوشش گیاهی و کشاورزی حفاظتی بر کاهش رواناب، فرسایش و رسوب هم‌راستا است. نتایج به دست آمده صرف‌نظر از جهت تغییرات هر یک از مؤلفه‌های هیدرولوژیکی، دلالت بر اهمیت الگوی زمانی تغییرات در طول سال دارد که نقش مؤثری در مدیریت منابع آب حوضه دارا می‌باشد. پژوهش حاضر ضمن بیان اهمیت اثرات بالقوه تغییر اقلیم در وضعیت هیدرولوژی حوضه لزوم توجه به بحث تأثیر کاربری اراضی و پیامدهای آن را در مدیریت منابع آب حوضه نیرچای استان اردبیل رامتذکر می‌گردد. این تحقیق با هدف بررسی تاثیرات تغییرات کاربری اراضی بر تغییرات پارامترهای هیدرولوژیکی صورت گرفته است، این تحقیق این توانایی را ندارد که تمامی عوامل موثر در تغییرات پارامترهای هیدرولوژیکی را مورد بررسی قرار دهد به این دلیل که جهت بررسی تمامی عوامل موثر نیاز به داده های بسیار زیاد و همچنین مدل‌های مخصوص به خود پارامتر مورد نظر می باشد. و همچنین مدل تحقیق حاضر نیز این توانایی را ندارد. بدلیل عدم وجود بسیار از داده های پارامترهای موثر در مدل‌سازی پارامترهای اقلیمی بخشی از خطای مدل ناشی از محدودیت های تحقیق حاضر می باشد (برای مثال داده های برداشت های مختلف از رودخانه و از سطح حوضه وجود نداشت) نتایج این تحقیق پیشنهاد می کند که تحقیقات آینده ضمن توجه به نقش سایر پارامترها و عوامل تاثیر گذار در تغییرات پارامترهای هیدرولوژیکی سهم سنجی از نقش هر کدام از پارامترهای مورد نظر را نیز داشته باشند بر همین اساس در تحقیقات آینده به نقش تغییرات رقوم تراز آب زیرزمینی در اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی، مصرف آب و تغییرات اقلیمی توجه ویژه ای داشته باشند. با توجه به عدم وجود مدل جامعی که تمامی پارامترهای موثر را یک جا مدل‌سازی بکند بهتر است نقش پارامترهای موثر با دقت بیشتری تحلیل و ارزیابی بشوند.

کاربری اراضی وجود دارد. نتایج حاصل از انجام تست آنالیز حساسیت و واسنجی مدل با استفاده از روش‌های دستی و خودکار نشان داد که با توجه به تعداد زیاد پارامترها و مقدار متفاوت این پارامترها برای کاربری‌های اراضی و خاک‌های مختلف، استفاده از مدل SUFI-2 نتایج بهتر و دقیق‌تری را در اختیار قرار می‌دهد و با استفاده از این مدل زمان رسیدن به مقادیر بهینه پارامترها و واسنجی مدل کاهش می‌یابد. همچنان که آرنولد وهم کاران (۲۰۰۰) و عباسپور و همکاران (۲۰۰۴) نیز در نتایج خود به این مطلب اشاره دارند. پارامترهایی مانند این مدل در بخش کاربری اراضی و پوشش گیاهی با دخالت دادن مقادیر قراردادی شماره منحنی، حداکثر ذخیره تاج پوشش، حداکثر و حداقل شاخص سطح برگ، حداکثر ارتفاع گیاه، حداکثر عمق ریشه، میزان آلبیدو دمای پایه رشد گیاه، امکان تعیین و واسنجی پارامترها را برای هر نوع کاربری و پوشش گیاهی فراهم آورده و بدین ترتیب، شبیه‌سازی اثر تغییر کاربری اراضی بر پاسخ‌های هیدرولوژی حوضه نیرچای به صورت ماهانه، زیر حوضه‌ها را با دقت قابل قبولی امکان پذیر گردیده است که از جمله مزایای قابل توجه این مدل می‌باشد، به طوری که پیکونیس و همکاران (۲۰۰۳) و سعادتی و همکاران (۲۰۰۶) نیز بر این قابلیت تأکید دارند. از این رو نتایج خوبی در مراحل مختلف شبیه‌سازی به دست آمد. بالا بودن مقدار معیارهای برازش به کاررفته در ارزیابی مدل در بخش دبی، بیانگر این است که مدل از توانایی خوبی در شبیه‌سازی رواناب ماهانه در این حوضه برخوردار است. همچنین مقدارنش-ساتکلیف و ضریب تعیین در شبیه‌سازی رواناب نیز در محدوده‌ی مورد مطالعه قابل قبول بوده و مقدار P فاکتور به یک نزدیک تر شده است. این امر، درصد قرارگیری داده‌های مشاهداتی بیشتری را در باند فقدان قطعیت نشان می‌دهد و نزدیک بودن مقدار R به صفر نیز بیانگر شبیه‌سازی بهتر در این مرحله است. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی در این مرحله، بیانگر این است که مدل SWAT می‌تواند برای مدل‌سازی ارائه شده به منظور مدیریت رواناب و فرسایش خاک در حوزه‌ی آبخیز نیرچای مورد استفاده قرار گیرد. شبیه‌سازی، توانست میزان رواناب خروجی از حوضه را تعیین کند. مشابه نتایج سلمانی و همکاران (۲۰۱۲) است که در مطالعه‌ی خود با تغییر کاربری اراضی در جهت بهبود کاربری حوضه، به تأثیر

Islamic Azad University, Khorasan Branch, Isfahan, pp. 1-7 (in Persian).

13) Kavian AS, Golshan M, Rouhani H, Esmaili A, A (2015). Simulation of runoff and sediment load of Haraz River Basin with SWAT intercept. *Natural Geography Research*, Volume 47, Number 2, pp. 211-197 (in Persian).

14) Leonard, P.B.A. (1979). A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 19:PP.59-98.

15) Lillesand, T.M., R.W Kiefer, and W.J Chipman. (2009). *Remote sensing and Image Interpretation*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 6<sup>th</sup> Ed, PP.127- 137.

16) Lin, B, Chen, X, Yao, H, Chen, Y, Liu, M, Gao, L & James, A (2015), Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model. *Ecological Indicators*, 58, pp 55-63.

17) López-Vicente M.; Poesen, J.; Navas, A.; Gasparb, L.; & B. Gaspar. (2011). Predicting runoff and sediment connectivity and soil erosion by water for different land use scenarios in the Spanish Pre-Pyrenees, *Catena*, PP.201-215.

18) Mengistu KT (2009) Watershed hydrological responses to changes in land use and land cover, and management practises at Hare Watershed, Ethiopia, pp.341-374.

19) Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), pp. 885-900.

20) Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Binger, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *ASABE*. 50, pp. 885-900.

21) Nagelkerke, N.J.D. (1991). A note on a general definition of the coefficient of determination. *Biometrika*. 78, pp .691-692.

22) Nash, J.E. and T.E. Sutcliffe. (1970). River flow forecasting through conceptual model, Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), pp.282-290.

23) Neitch, S. L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R.; & J. R. Williams, (2005). *Soil and Water assessment tool documentation, ( user's manual)*, pp. 494.

24) Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2002). *Soil and Water Assessment Tool, User's Manual, Version 2000*, pp. 289-298.

25) Omani, Tajrishi M. and Abrishamchi A., (2006). River Flow Simulation Using SWAT and GIS Model. 7th International Seminar on River Engineering, February 24-26, Ahvaz Shahid Chamran University. pp. 1-8 (in Persian).

## منابع

1) Abbaspour, K.C. (2007). User Manual for SWAT-CUP SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag. Dubendorf. Switzerland, 95, pp. 1-16.

2) Abbaspour, K.C., Johnson, A., and Van Genuchten, M.Th. (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone J.*, 3:PP. 1340-1352.

3) Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., and Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Hydrology*. 333, pp. 413-430.

4) Arabi, M., Govindaraju, R. S., and Hantush, M. M. (2007): A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practices, *J. Hydrol.*, 333, pp. 459-471.

5) Arnold, J.G. (1996). Estimating hydrologic budgets for three Illinois Watersheds. *Journal of Hydrology*, 176, PP.57-77.

6) Arnold, J.G., Muttiah, R.S., Srinivasan, R., and Allen, P.M. (2000). Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi River basin. *J. Hydrol.*, 227: 1-4. PP. 21-40.

7) Baloch, M. Ames, D. and Tanik, A. (2013). Catchment-Scale Hydrological Response to Climate-LandUse Combined Scenarios: A Case Study for the Kishwaukee River Basin, Illinois, *Physical Geography*, 29, pp. 79-99.

8) Betrie. G. D.; Mohamed, Y. A.; Griensven, A. V.; & R. Srinivasan, (2011). Sediment management modeling in the Blue Nile Basin using SAWT model, *Hydrology Earth syst em Science Discuss*, 15, PP. 807-818.

9) Bossa, A.Y., Diekkrüger, B., Igué, A.M., and Gaiser, T. (2012). Analyzing the effects of different soil databases on modeling of hydrological processes and sediment yield in Benin (West Africa). *Geoderma*. 174, PP. 61-74.

10) Gholami, Sh., (2003). Daily Sediment simulation by semi-distributed SWAT in Mountai watershed (Amame watershed), *Pazhouhesh sazandegi Journal*, 59, pp .28-33.

11) Havrylenko SB, Bodoque JM, Srinivasan R, Zucarelli GV, Mercuri P, (2016). Assessment of the soil water content in the Pampas region using SWAT. *Catena* 137, PP.298-309.

12) Izadi, M. Ajdari, Akhavan, S. Emamgholizadeh, P. (2013). Swat Model Application in Simulation of Shirin Darreh River, Cultural and Water Services Challenge Conference,

Watershed Management Science and Engineering, pp. 134-141 (in Persian).

38) Zhixiang L, Songbing Z, Honglang X, Chunmiao Z, Zhenliang Y, Weihua W, (2015). Comprehensive hydrologic calibration of SWAT and water balance analysis in mountainous watersheds in northwest China. *Physics and Chemistry of the Earth* 79PP.76-85.

26) Palamuleni, L.G. P.M. Ndomba & H.J. Annegarn (2011), Evaluating land cover change and its impact on hydrological regime in Upper Shire river catchment, Malawi, *Journal of Regional Environmental Change*, No. 11(4), PP.845-855.

27) Pikounis, M., Aranou, E., Baltas, E., Dassaklis, A., and Mimikou, M. (2003). Application of the SWAT model in the Pinos River in under different land-use Scenarios, *Global Nest J.*, 5: 2.PP. 71-79.

28) Ramadan. No, parsley. (2014). Monitoring urban land use changes over the past four decades in Esfarayen using remote sensing technology. *National Geomatics Conference. National mapping agency.* pp. 1886-1869 (in Persian).

29) Saadati, H., Golami, Sh., Sharifi, F., and Ayobzade, A. (2006). Investigation the effect of land use change on the surface runoff, (case study, Kasilian), *Journal of Natur. Resour. Iran*, 59:PP. 301-313.

30) Saadati, H.; Gholami, S. A.; Sharifi, F.; & S. A. Ayoubzadeh, (2006). An investigation of the effects of land use change on simulating surface runoff using SWAT mathematical model (Case Study: Kasilian Catchment Area), *Iranian Journal of*

31) Salmani, H.; Mohseni Saravi, M.; Rouhani, H.; & A. Salajeghe, (2012). Evaluation of Land Use Change and its Impact on the Hydrological Process in the Ghazaghli Watershed, Golestan Province, *watershed management Journal*, 3(6), PP. 43-59.

32) Santos, J.; Nunes, J.; sampaio, E.; Moreira, M.; Lima, J.; Jacinto, R.; & J. CorteReal, (2014). Climate and LanduseChange Impacts on hydrological processes and soil erosion in a dry Mediterranean agro-forested catchment, southern Portugal, *Hydrology and earth system sciences discussions*, 16, PP.715-730.

33) Siriwardena, L. Finlayson, B. L. & T. A. McMahon, (2006). The impact of land use change on catchment hydrology in large catchment: The Comet River, Central Queensland, Australia, *Journal of Hydrology*, 326, pp.199-214.

34) Wang, S.; Kang, S.; Zhang, L.; & F. Li, (2008). Modelling hydrological response to different land-use and climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest China, *Journal of Hydrological Processes*, 22, PP.2502-2510.

35) Wei, W. Chen, L. Fu, B. Huang, Z. Wu, D. & L. Gui, (2007). The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China, *Journal of Hydrology*, 335, pp.247- 258.

36) Yarahmadi, D. (2014). Hydroclimatological Analysis of Urmia Lake Surface Oscillations. *Natural Geography Research*, Thirty-Second Year, No. 20, pp.77-92(in Persian).

37) Zahedi, A. Mohammadi, M. And Brady, S. (2012). Evaluation of Urban Land Use Change and Impact of Hydrology on Pilgrimage Basin *Proceedings of the 7th National Conference on*

