نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و هشتم/ شماره سوم / پاییز ۱۴۰۳/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۳۱ تا ۵۱

مدل‌سازی و برآورد اقتصادی خسارت تغییر اقلیم بر خدمت اکوسیستمی کنترل رواناب در گون‌زارهای زاگرس مرکزی

محمدجواد آقاسی*، سید علیرضا موسوی، مصطفی ترکش اصفهانی و سعید سلطانی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۷)

چکیده

گون پوشش گیاهی بسیاری از کوهستان‌های فلات ایران است و باتوجه‌به شکل بالشتی و سیستم ریشه‌دوانی عمیق، کنترل و نفوذ بارش‌های جوی را به درون خاک تسهیل و نقش عمده‌ای در ارائه خدمات اکوسیستمی ایفا می‌کند. از طرفی همبستگی اکوسیستم‌های گون‌زار (*Astragalus* habitats) با اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، آن‌ها را در برابر تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیر نموده‌است. در این مطالعه نقشه تولید رواناب بر پایه منحنی بادیکو تحت شرایط حال حاضر و آتی تغییر اقلیم (۲۰۵۰) با استفاده ازداده‌های اقلیمی و دمایی سایت Chelsa (مدل گردش عمومی CanESM2) در نرم‌افزار TerrSet و با استفاده از نقشه‌های: زیرحوزه‌ها، بارش سالانه، تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه، عمق خاک، آب قابل‌دسترس گیاه و نقشه "پوشش زمین _کاربری زمین" حال حاضر و آینده با ترکیبی از روش‌های میدانی و مدل‌های پراکنش گونه‌ای در مقیاس محلی حوزه آبخیز رودخانه شور دهاقان (زاگرس مرکزی) تهیه و درنهایت خسارت رواناب مازاد تولیدشده در اثر تغییر اقلیم به روش هزینه جایگزین (Replacement cost method) برآورد شد. نتایج حاکی از افزایش حجم رواناب سالانه حوزه از ۷۰ میلیون مترمکعب در حال حاضر به ۱۰۵ میلیون مترمکعب در شرایط تغییر اقلیم تحت سناریوی rcp26 سال ۲۰۵۰ بود. با احتساب هزینه ۱۰ میلیون ریال به ازای کنترل ۵۳۰ مترمکعب رواناب از طریق پروژه‌های متنوع آبخیزداری، جلوگیری از خسارات رواناب مازاد تولیدشده، نیازمند اعتباری بالغ بر ۶۶۰ میلیارد ریال بر اساس ارزش حال است. این مطالعه قابلیت نرم‌افزار TerrSet برای پیش‌بینی و تولید نقشه خدمت اکوسیستم تولید رواناب تحت تغییرات اقلیمی یا تغییرات کاربری اراضی و با هدف ارزش‌گذاری را در مقیاس محلی به اثبات رساند. همچنین ارزش‌گذاری فوق می‌تواند مبنای برنامه‌ریزی و تأمین اعتبار برای مطالعه و اجرای طرح‌های آبخیزداری با هدف مقابله با تهدیدات تغییر اقلیم باشد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، خدمات اکوسیستم، کنترل رواناب، گون‌زار، زاگرس مرکزی، برآورد اقتصادی

۱. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان. اصفهان، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: agh949@yahoo.com

مقدمه

مراتع بیشترین سطح اراضی غیر یخ‌زده کره زمین را شکل می‌دهند (۳۱) و بزرگ‌ترین نوع کاربری زمین (Land use) یعنی تغذیه دام‌های نشخوارکننده را پشتیبانی می‌کنند و نقش قابل‌توجهی در ارائه خدمات اکوسیستمی (Services Ecosystem) دارند (۱۵). خدمات اکوسیستمی مزایایی است که افراد از یک اکوسیستم مشخص دریافت می‌کنند و بسته به نقشی که در سلامت انسان دارند، به چهار دسته خدمات فراهم سازی (Provisioning) یا تولیدی، تنظیمی (regulating)، حمایتی (Supporting) و فرهنگی (cultural) تقسیم می‌شوند.

پوشش گیاهی مراتع با تولید مواد آلی سبب نگهداری ساختار خاک و پایداری خاکدانه‌ها، افزایش نفوذپذیری و درنتیجه نگهداری آب باران می‌شود (۸) و در کنترل و کاهش رواناب در اکوسیستم‌ها نقش بسیار مهمی دارد. ریشه گیاهان نیز با افزایش تخلخل خاک، میزان نگهداری آب را در خاک افزایش می‌دهد. به‌طورکلی، خدمات ذخیره آب در خاک ناشی از جوامع گیاهی، استفاده مؤثر از منابع آبی را افزایش می‌دهد و سبب کاهش خطر خشکسالی می‌شود (۲۰).

سطح قابل‌توجهی از مراتع ایران به‌ویژه در رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز گون‌زار است. گون‌زار به مراتعی گفته می‌شود که پوشیده از گونه گون است. گروهی از گون‌ها که به گون‌های بالشتی (Cushion *Astragalus*) معروف هستند (۲۲)، دارای جامعه‌پذیری شدید گیاهی هستند و نقش مهمی در تثبیت کربن و چرخه‌های بیوشیمیایی اکوسیستم دارند (۲۱). گون‌ها با قدرت سازگاری زیاد، جوامع گیاهی بزرگی را تشکیل داده و نقش مهمی در ارائه انواع خدمات اکوسیستم، تثبیت و حفظ خاک، و ترسیب کربن (Carbon sequestration) ایفا می‌کنند.

به علت وجود کرک‌های موجود در سطح برگ‌ها و سیستم ریشه‌ای عمیق گون‌های بالشتی، ظرفیت کنترل و نگهداری آب در آن‌ها زیاد بوده و به‌صورت اسفنج عمل کرده و با کنترل رواناب مانع بروز سیلاب می‌شوند (۲۳). همچنین با نفوذ دادن رواناب سطحی به خاک، نقش قابل‌توجهی بر تغذیه ذخایر آب زیرزمینی، چشمه‌ها، قنوات و منابع آبی دارند.

کنترل رواناب به معنای توانایی یک حوزه آبخیز در به دام انداختن و ذخیره آب باران است که رواناب مستقیم را کاهش می‌دهد و آب را برای استفاده در فصل‌های خشک درون خاک ذخیره می‌کند (۱۴). قسمتی از آب ذخیره شده در خاک را گیاهان مصرف می‌کنند و بقیه آن با تغذیه آب‌های زیرزمینی به‌تدریج برای پایداری جریان رودخانه‌ها وارد آب‌های سطحی می‌شود.

کنترل رواناب از باارزش‌ترین خدمات تنظیمی غیربازاری یک اکوسیستم است (۴)، به خصوص در مناطقی که با کمبود آب روبرو هستند (۲۵). تغییر اقلیم ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای از جمله CO_2، باعث افزایش تعداد بروز وقایع حاد آب وهوایی نظیر خشکسالی یا سیل می‌شود و یکی از عواملی است که می‌تواند میزان دسترسی بشر به آب را تحت‌تأثیر شدید قرار دهد (۱۰) و اثرات چشمگیری نیز بر مراتع بگذارد (۴۱). ازاین‌رو پیش‌بینی میزان آسیب‌پذیری مراتع گون زارکه حدود ۲۰درصد از مراتع کشور (۱۷میلیون هکتار) را شکل می‌دهند (۲۱) و ارزش‌گذاری اقتصادی خسارات مرتبط با خدمات حاصل از این اکوسیستم‌ها، در برابر تغییرات اقلیمی بسیار ضروری است.

یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای ارزیابی و ارزش‌گذاری کمّی خدمات اکوسیستمی، تولید نقشه خدمات اکوسیستم (Mapping Ecosystem Services) است. نقشه خدمات اکوسیستم اطلاعات ارزشمندی از کیفیت اکوسیستم برای تصمیم‌گیرندگان فراهم می‌کند (۴۳). نقشه همچنین برای پیش‌بینی نیازهای جامعه به خدمات اکوسیستم تحت تغییرات کاربری زمین یا تغییرات اقلیمی استفاده می‌شود (۹). پژوهش‌های پیرامون تولید نقشه خدمات اکوسیستم در چند دهه گذشته توسعه یافته‌است (۳۴). مدل‌سازی و تولید نقشه برای بررسی توزیع مکانی خدمات اکوسیستم در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۹). نقشه سازی خدمات اکوسیستم با هدف بررسی روند تغییرات در خدمات اکوسیستم، برآورد منافع اقتصادی حاصل از

خدمات اکوسیستم و شناسایی آن دسته از اراضی که از لحاظ حفاظتی دارای اهمیت ویژه هستند، صورت می‌گیرد (۲۴).

ایده تولید نقشه خدمات اکوسیستم اولین‌بار توسط کاستانزا مطرح شد (۵)، اما تقریباً ۶۰٪ از مطالعات پیرامون نقشه خدمات اکوسیستم پس از سال ۲۰۰۷ انجام شده‌است که از روش‌های مختلفی برای این کار استفاده شده‌است. در سال‌های اخیر، تولید نقشه خدمات اکوسیستم اهمیت زیادی داشته‌است. بخش عمده‌ای از تکنیک‌ها یا روش‌های ارزش‌گذاری کالاها و خدمات محیط‌زیستی در ایالات متحده و اروپا شکل گرفته و بسط یافته و مورد استفاده واقع شده‌است، اما تاکنون تلاش‌های اندکی برای ارزش‌گذاری اقتصادی اثرات تخریب محیط‌زیست در کشورهای درحال‌توسعه انجام شده‌است (۲۸).

فرایند ارزش‌گذاری (Valuation process)، به‌عنوان ارزش‌گذاری سهم یک کالا یا خدمات برای دستیابی به یک هدف خاص تعریف می‌شود. در اقتصاد سنتی، یک کالا تا زمانی ارزش دارد که در رفاه فرد سهیم باشد. نکته این است که «ارزش» پس از بیان هدفی که برای دستیابی به آن در نظر گرفته شده‌است، معنادار می‌شود (۵). مبنای فلسفی ارزش‌گذاری، انسان است. بر این اساس، مؤلفه‌های طبیعت و خدمات اکوسیستم تا زمانی که برای انسان سودمند باشد، ارزشمند است (۱۸).

لازمه ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستمی در درجه اول، برآورد کمّی میزان هر یک از خدمات اکوسیستم با استفاده از شاخص‌های معین است. ازاین‌رو در این پژوهش، باتوجه‌به اهمیت خدمت اکوسیستمی کنترل رواناب در مراتع گون‌زار زاگرس مرکزی و نیز بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر میزان تغییرات رواناب و احتمال خسارات وارده، ابتدا میزان تولید رواناب در شرایط حال حاضر و تحت تغییرات اقلیمی آتی کمی‌سازی و برآورد شد. آنگاه به‌منظور برآورد میزان کاهش خدمت کنترل سیل اکوسیستم مرتعی گون‌زار تحت تغییر اقلیم، اختلاف میزان رواناب حال حاضر و آینده (۲۰۵۰)، اندازه‌گیری و سپس ارزش‌گذاری اقتصادی صورت گرفت.

برای تهیه نقشه تولید رواناب (Run off control services) در گون زارهای حوزه آبخیز رودخانه شور، واقع در زاگرس مرکزی در جنوب غرب استان اصفهان، در شرایط کنونی و در شرایط آتی تغییر اقلیم (سال ۲۰۵۰) و به‌منظور محاسبه خسارات مربوط به تغییرات خدمت اکوسیستمی کنترل رواناب، از مدل‌ساز خدمات اکوسیستم (Ecosystem service modeler)، زیر بخش Water Yield در نرم‌افزار TerrSet استفاده شد. مدل‌ساز Water Yield در واقع مبتنی بر مجموعه ابزار InVEST است. InVEST یکی از مهم‌ترین مدل‌سازهای خدمات اکوسیستم است که به‌طور گسترده توسط پژوهشگران داخل و خارج کشور استفاده می‌شود.

درویشی و آصفی با استفاده از مدل InVEST، خدمات اکوسیستم تولید آب را با هدف ارزیابی کمبود منابع آبی در محیط خشک کلانشهری در دشت قزوین برآورد و نقشه‌سازی کردند و نتیجه گرفتند که مدل تولید آب دانشی را برای بهبود مدیریت آب فراهم می‌کند و مناطق مستعد کم‌آبی در کلانشهر قزوین را برجسته می‌کند (۶). جعفرزاده و همکاران نیز تولید رواناب را در زاگرس مرکزی (حوزه آبخیز میشخاص) در استان ایلام با همین مدل برآورد و به نتایج خوبی رسیدند. مدل InVEST برای برآورد میزان تولید رواناب در سایر حوزه‌های آبخیز مختلف کشور نیز بکار رفته‌است. برای نمونه می‌توان به مطالعات احمدی میرقائد و سوری در حوزه آبخیز تراز استان خوزستان (۲)، شفیع زاده و زارع چاهوکی در حوزه آبخیز طالقان میانی در استان تهران (۳۵) و حقدادی و همکاران در حوزه آبخیز دلیچای در استان تهران (۱۳) اشاره کرد. گفتنی است، در پژوهش پیش رو پس از کمی‌کردن میزان تولید رواناب در شرایط حال حاضر و آینده، ارزش‌گذاری خسارت رواناب مازاد تولیدی در اثر تغییر اقلیم با روش هزینه جایگزین انجام شد. اهداف مد نظر از مطالعه کنونی عبارت بود از:

۱- مدل‌سازی و تهیه نقشه تولید رواناب برای حال حاضر و تحت شرایط تغییر اقلیم آتی (سال۲۰۵۰)

۲- محاسبه اختلاف میزان تولید رواناب در شرایط حال حاضر و تغییر اقلیم آتی

۳- بررسی کارایی نرم‌افزار TerrSet در تهیه نقشه تولید رواناب
۴- ارزش‌گذاری میزان کاهش خدمت اکوسیستمی کنترل رواناب ناشی از تغییر اقلیم

ذکر این نکته نیز ضروری است که مدل Water Yield محدودیت‌هایی نیز دارد. برای نمونه، مهم‌ترین محدودیت مدل تولید آب این است که چرخه هیدرولوژیک آب را به‌طور کامل در نظر نمی‌گیرد و تغییرات فصلی بارش را مورد توجه قرار نمی‌دهد و بر اساس میانگین سالانه بارش کار می‌کند (۴۰). همچنین باید توجه داشت که این مدل، تبخیر از سطح خاک را در نظر نمی‌گیرد و برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی تنها تبخیر از سطح گیاهان را در نظر می‌گیرد.

مواد و روش پژوهش

الف- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز رودخانه شور در ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهر اصفهان در دامنه ارتفاعات زاگرس مرکزی و در مجاورت استان چهارمحال وبختیاری واقع شده‌است. این منطقه با وسعتی بالغ بر ۱۵۰ هزار هکتار حد فاصل ۵۱ درجه و۲۳ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴۸ دقیقه طول شرقی و۳۱ درجه و۴۴ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. بیشترین ارتفاع از سطح دریا ۳۵۲۱ متر در ارتفاعات موسوم به دشتک و کمترین ارتفاع ۱۷۵۹ متر در نقطه خروجی حوزه است. حوزه آبخیز مورد مطالعه یکی از زیرحوزه‌های حوزه آبخیز مرکزی زاینده رود است که رودخانه فصلی موسوم به رودخانه شور، رودخانه اصلی حوزه بوده و از ارتفاعات جنوب دهاقان به سمت شمال حوزه سرازیر و درنهایت پس از اتصال به حوزه‌های آبخیز مبارکه و فلاورجان، به زاینده رود منتهی می‌شود (شکل ۱).

بر اساس تقسیمات اقلیمی، حوزه به دو بخش شمالی - شرقی (خشک و سرد با متوسط بارندگی ۱۵۰ میلی‌متر)، و جنوبی - غربی (نیمه‌خشک سرد با متوسط بارندگی ۲۵۰ میلی‌متر) تقسیم می‌شود. قسمت‌های جنوبی و غربی که مراکز تولید رواناب کل حوزه محسوب می‌شوند، مراتع ییلاقی درجه یک و بیشتر به‌صورت گون‌زار است و از اواخر اردیبهشت تا پایان شهریور مورد چرای دام قرار می گیرد. در حوزه آبخیز مورد مطالعه ایستگاه سینوپتیک وجود ندارد و فقط یک ایستگاه کلیماتولوژی (همگین) با آمار بلندمدت بارش ولی فاقد آمار دما، وجود دارد (جدول ۱). متوسط بارش سالانه منطقه طی دوره بلندمدت، معادل ۲۱۵ میلی‌متر و متوسط تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه، ۱۴۱۰ میلی‌متر است.

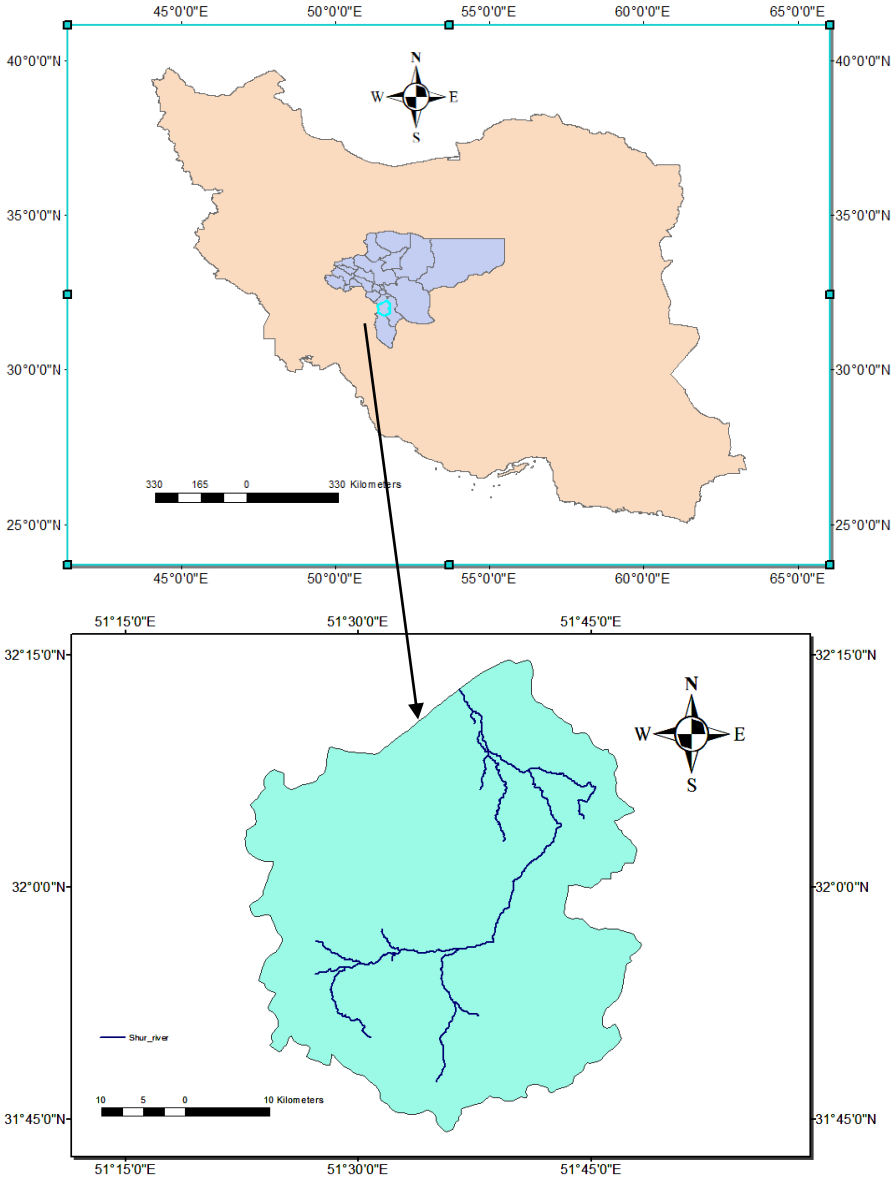
ب- معرفی نرم‌افزار TerrSet

TerrSet یک سیستم مکانی یکپارچه برای پایش و مدل‌سازی مکانی است که بیش از ۳۰۰ ماژول (Modul) را برای تجزیه و تحلیل و نمایش اطلاعات مکانی رقومی در یک بسته نرم‌افزاری واحد ارائه کرده‌است و شامل ابزارهایی برای آمایش سرزمین، مدل‌ساز خدمات اکوسیستم، تحلیل تغییرات اقلیمی، مدل‌ساز گونه‌ها، آمار مکانی و پردازش تصاویر می‌شود.

مدل‌ساز خدمات اکوسیستم، یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مکانی به‌منظور ارزیابی ارزش سرمایه طبیعی با اهداف توسعه پایدار است. این مدل‌ساز شامل ۱۵ مدل خدمات اکوسیستم است که مبتنی بر مجموعه ابزار InVEST است. InVEST یکی از مهم‌ترین مدل‌سازهای خدمات اکوسیستم است که به‌طور گسترده توسط پژوهشگران استفاده می‌شود و هدف اصلی آن دستیابی به الگوی کلی از توزیع مکانی خدمات اکوسیستم و بررسی روند تغییرات آن‌ها باتوجه‌به تغییر کاربری و پوشش زمین در شرایط زمانی متفاوت یا تحت تغییرات اقلیمی است. از مزایای این مدل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- کمی‌سازی و تولید نقشه انواع خدمات اکوسیستم
۲- ارزش‌گذاری اقتصادی خدمات اکوسیستم
۳- پیش‌بینی تغییرات خدمات اکوسیستم در شرایط تغییر اقلیم یا شرایط مختلف مدیریت زمین (۳۸)

شارپز و همکاران نقاط قوت و ضعف سه روش مختلف مدل‌سازی خدمات اکوسیستم شامل LUCI , InVEST و ARIES را در حوزه آبخیز کانوی در انگلستان با وسعت ۵۸۰۰۰ هکتار مدل‌سازی و مقایسه کرد (۳۶) و درنهایت



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز موردمطالعه در کشور و استان اصفهان

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی موجود در حوزه آبخیز رودخانه شور

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	دوره آماری	ارتفاع (متر)	مختصات جغرافیایی		وضعیت آمار
				طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	
همگین	کلیماتولوژی	۱۳۴۵-۱۳۸۶	۲۲۵۰	۵۱/۴۷۵	۳۱/۹۱	فقط دارای آمار بلندمدت بارش
لاریچه	باران‌سنجی	۱۳۸۱-۱۳۹۰	۱۹۲۰	۵۱/۶۸۳	۳۲/۰۳	آمار ناقص
قمیشلو	باران‌سنجی	۱۳۸۱-۱۳۹۰	۲۱۲۰	۵۱/۴۶۶	۳۲/۰۵	آمار ناقص
دهاقان	باران‌سنجی	۱۳۷۵-۱۴۰۰	۲۰۵۰	۵۱/۶۵	۳۱/۹۳	فقط دارای آمار بارش

مزایای زیر را در مقایسه با دو مدل دیگر برای مدل InVEST برشمردند:

می‌تواند ۱۵ خدمت اکوسیستم را مدل‌سازی و ارزش‌گذاری نماید. کاربران زیادی در دنیا دارد. راحت اجرا می‌شود. کتابچه راهنمای جامعی برای کاربران دارد. رایگان و در دسترس است. چنانچه کاربر مهارت‌های پایه GIS را دارا باشد، به راحتی قابل استفاده است و همچنین داده‌های پیش فرض اولیه برای آن موجود است.

ب ۱- مدل تولید رواناب (Water Yield model)

منظور از تولید رواناب در یک حوزه آبخیز عبارت است از متوسط رواناب سالانه حاصل از یک حوزه آبخیز برحسب مترمکعب در سال. برای تعیین میزان تولید رواناب در حوزه مورد مطالعه از مدل تولید رواناب موجود در مجموعه Ecosystem Services Modeler استفاده شد. این مدل روی نقشه‌های رستری اجرا می‌شود. مدل، کمیت تولید آب را در هر پیکسل و هر زیرحوزه برآورد می‌کند. مقدار رواناب موجود در هر پیکسل، از تفاضل مقدار بارش سالانه از آبی که به واسطه تبخیر و تعرق از دست می‌رود، برآورد می‌شود. مدل تفاوتی بین آب سطحی، آب زیرزمینی و جریان پایه نمی‌گذارد، اما فرض می‌کند که رواناب تولیدشده از هر پیکسل از طریق یکی از این مسیرها به نقطه خروجی حوزه یا زیرحوزه می‌رسد. آنگاه، مدل حاصل‌جمع و میانگین تولید رواناب را در سطح هر زیرحوزه محاسبه می‌کند. محاسبات پیکسل_مقیاس این امکان را فراهم می‌کند که عدم تجانس عوامل مؤثر در تولید رواناب از جمله نوع خاک، بارش، پوشش گیاهی و... مشخص شود.

مدل Water Yield میزان رواناب تولیدی را در نقاط مختلف یک چشم‌انداز تخمین می‌زند و نشان می‌دهد چگونه تغییر در الگوی استفاده از زمین، میزان تولید رواناب و عملکرد آن در بخش‌های مختلف را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. به‌طور خلاصه می‌توان گفت مدل تولید رواناب بر پایه منحنی بادیکو، میزان رواناب تولیدی خروجی از حوزه را محاسبه و تخمین می‌زند و بر اساس تفریق میزان تبخیر و تعرق و نفوذ سطحی از میزان بارش محاسبه می‌شود.

تولید رواناب سالیانه منطقه مورد مطالعه برای هر پیکسل (x) از منطقه یا Y(x)، به کمک معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$Y(x) = (1-(AET (x)/ P(x)) \quad (1)$$

که در آن:

AET (x) تبخیر و تعرق واقعی سالانه پیکسل x

و P(x) بارش سالانه پیکسل x است.

ب ۲- داده‌های ورودی مدل

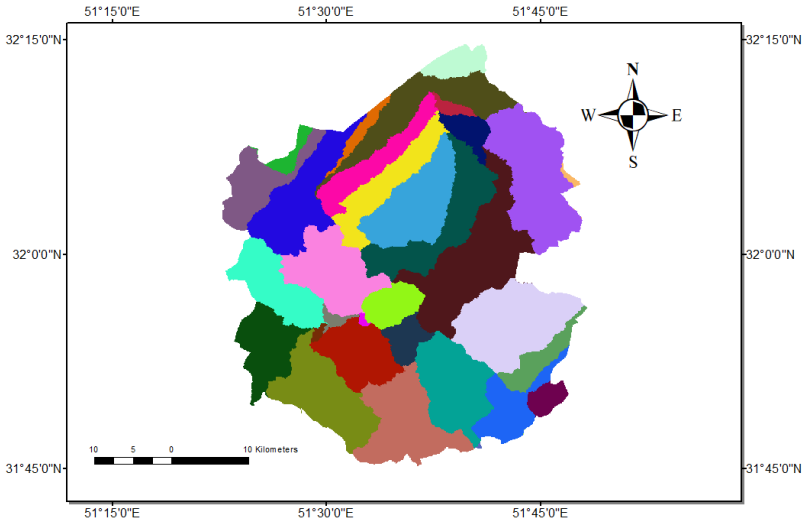
برای اجرای مدل نیاز به ۷ لایه نقشه همگی در فرمت رستر به همراه جدول زیست فیزیکی در فرمت csv. و پارامتر ژئوهیدرولوژیکی می‌باشد. این نقشه‌ها عبارت‌اند از: نقشه متوسط بارش سالانه، نقشه تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه، نقشه عمق خاک، نقشه آب قابل دسترس گیاه، نقشه کاربری اراضی ـ پوشش گیاهی، نقشه حوزه آبخیز و نقشه زیرحوزه ها.

با استفاده از نرم‌افزار Arc-GIS و بر اساس مدل رقومی ارتفاع (Digital Elevation Model) (DEM) با دقت مکانی ۳۰ متر، نقشه آبراهه‌ها و سپس نقشه حوزه و زیرحوزه‌ها تهیه شد که طبق آن حوزه آبخیز رودخانه شور به ۳۳ زیرحوزه اصلی تقسیم می‌شود (شکل ۲).

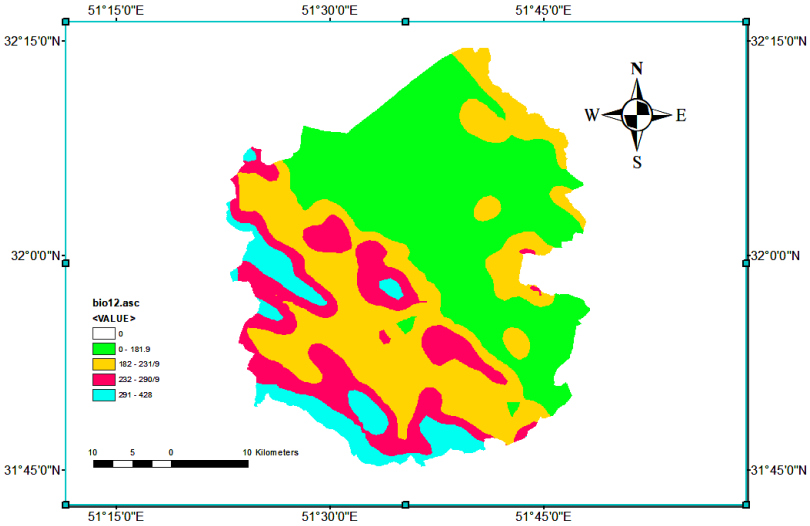
برای تهیه نقشه تولید رواناب در شرایط حال حاضر علاوه بر نقشه حوزه و زیرحوزه‌ها که در نرم‌افزار TerrSet بایستی هر دو به فرمت رستر (*.rst) باشند، ۵ لایه رستری دیگر نیز با همین فرمت تولید و وارد مدل شدند که در ادامه به اختصار روش تولید هرکدام ازآن‌ها توضیح داده شده‌است:

۱) نقشه متوسط بارش سالانه.

باتوجه‌به نبود داده‌های هواشناسی بلندمدت در منطقه برای حال حاضر (۱۹۷۹ تا ۲۰۱۳) و نیز لزوم استفاده از داده‌های آینده تغییر اقلیم (۲۰۵۰)، از داده‌های سایت Chelsa (https://chelsa-climate.org/) مدل گردش عمومی CanESM2 استفاده شد (شکل ۳). مدل‌های گردش عمومی جو ابزارهای مناسبی برای ارزیابی اقلیم در دوره آینده هستند. بر اساس نتایج سلیمی و همکاران مدل گردش عمومی CanESM2



شکل ۲. نقشه زیرحوزه‌های منطقه مطالعاتی



شکل۳. نقشه بارش سالانه حال حاضر

کارایی زیادی برای شبیه‌سازی پارامترهای بارندگی، دمای متوسط و سرعت باد در استان اصفهان دارد و می‌تواند به‌عنوان مدلی مناسب برای پیش‌بینی اقلیم در دوره آینده در استان اصفهان مورد استفاده قرار گیرد (۳۲). ازاین‌رو در مطالعه کنونی از مدل فوق استفاده شد.

۲) نقشه تبخیر و تعرق سالانه.

تبخیر از سطوح مرطوب خاک و گیاه که آن را تبخیر و تعرق می‌نامند، یکی از پیچیده‌ترین فرایندها در چرخهٔ هیدرولوژی است که در محاسبات هیدرولوژی از دو جنبه دارای اهمیت است: یکی محاسبه تلفات آب در حوزه‌های آبخیز و دیگری برآورد نیاز آبی در طرح‌هایی که آب مهار شده در سازه‌های هیدرولیک مورد استفاده قرار خواهد گرفت. محمدی و همکاران در پژوهش خود با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک شهرضا (که نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه مورد مطالعه در این پژوهش است) و ۵ ایستگاه سینوپتیک پراکنده در سایر نقاط استان اصفهان، برای تعیین مناسب‌ترین

روش تبخیر و تعرق پتانسیل در سطح منطقه، اقدام به تحلیل نمودارهای مقایسه‌ای بین روش‌های تورنت وایت، بلانی کریدل و معادلهٔ لاری جانسون کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در استان اصفهان از بین روش‌های یادشده، روش بلانی کریدل نسبت به دیگر روش‌ها، بسیار نزدیک به تشت تبخیر (روش اندازه‌گیری مستقیم تبخیر و تعرق) بوده‌است؛ به‌طوری که در ماه‌های مختلف سال همبستگی خوبی با تشت تبخیر را داشته‌است (۲۷). به همین منظور نقشه تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه (ETp) با استفاده از نقشه‌های متوسط دمای ماهانه سایت Chelsa (۱۲ماه) و با کمک معادله (۲) محاسبه شد (شکل ۴):

$$ETp=[p\ (0.46Tavg+8.1)](b)+a \quad (۲)$$

P= ضریب روشنایی ماهانه که بر اساس جدول مخصوص و باتوجه‌به عرض جغرافیایی ایستگاه هواشناسی و ماه مربوطه به‌دست می‌آید.

Tavg= نقشه‌های ماهانه متوسط دما که با استفاده از داده‌های Chelsa تهیه شد.

a و b ضرایب تبخیر و تعرق هستند که باتوجه‌به مقادیر رطوبت نسبی (RHmin) و تعداد روز هر ماه، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (Uday)، بیشترین ساعات ممکن تابش (N) که از جدول به‌دست می‌آید و نیز ساعات آفتابی واقعی (n)، جداگانه برای هر ماه به‌وسیله معادله (۳) محاسبه شد:

$$a=0.0043\ RHmin-(n/N)-1.41$$
$$b=0.82-0.0041\ RHmin+1.07(n/N)+0.066(Uday)-0.006\ RHmin\ (n/N)-0.0006(RHmin)\ (Uday) \quad (۳)$$

۳) نقشه عمق خاک با استفاده از داده‌های پروفیل خاک منطقه که بر اساس نقشه واحدهای اراضی خاک حفر شده بود، استفاده از نقشه DEM و نقشه‌های شیب و جهت و با کمک روش رگرسیون تولید شد (شکل ۵).

۴) نقشه آب در دسترس گیاه با کمک نقشه بافت خاک و بر اساس اطلاعات پروفیل‌های حفرشده و استفاده از جدول شماره ۱۹ دستورالعمل فائو ارائه‌شده توسط آلن و همکاران (۳)، تهیه شد. منظور از آب قابل‌دسترس گیاه، مقدار آبی است که می‌تواند در پروفیل خاک ذخیره شود و برای استفاده گیاهان قابل‌دسترس است و در واقع اختلاف بین ظرفیت زراعی (Field capacity) و نقطه پژمردگی (Wilting point) است. برای محاسبه این پارامتر از اطلاعات پروفیل‌های حفرشده و داده‌های مربوط به بافت خاک (درصد شن، رس و سیلت) و همچنین اطلاعات موجود در مطالعه‌های قبلی منطقه استفاده شد (شکل ۶).

۵) نقشه کنونی پوشش گیاهی _ کاربری اراضی (land cover_land use) که با مد نظر قرار دادن انواع مختلف پوشش و کاربری موجود در منطقه شامل مراتع گون‌زار، مراتع فاقد گون، اراضی زراعی، باغات، جنگل‌کاری و غیره و بر اساس بازدید میدانی و داده‌های در دسترس منطقه‌ای با کمک نرم‌افزارهای اتوکد، آرک مپ و R تولید شد (شکل ۷).

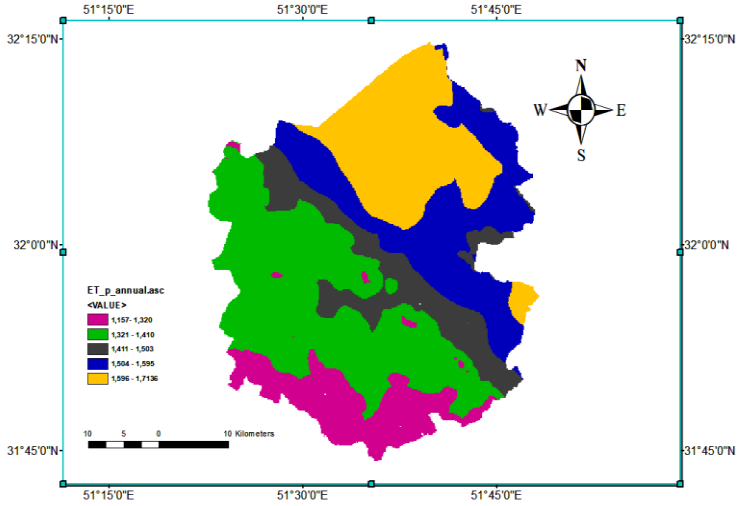
جدول بیوفیزیکی: پس از تهیه نقشه‌ها، برای اجرای مدل تولید رواناب، نیاز به پارامتر هیدرو ژئولوژیکی (Z) و جدول بیوفیزیکی است. جدول بیوفیزیکی شامل یک فایل اکسل csv.* که به ازای هر کدام از کاربری‌های مختلف اراضی تعریف می‌شود و شامل کد کاربری (Id)، ضریب تبخیر و تعرق (Kc)، عمق ریشه‌دوانی و حضور یا عدم حضور پوشش گیاهی (مقدار ۰ و ۱) می‌شود. جدول بیوفیزیکی منعکس‌کننده ویژگی‌های هر LULC است.

پارامتر هیدروژئولوژیکی (Z): Z یک عدد ثابت تجربی است که گویای الگوی بارش محلی، شدت بارش، تغییرات فصلی آب‌وهوا و ویژگی‌های توپوگرافی حوزه است و مقدار آن عددی بین ۱ تا ۳۰ است. برای محاسبه این پارامتر سه روش وجود دارد (۱۳):

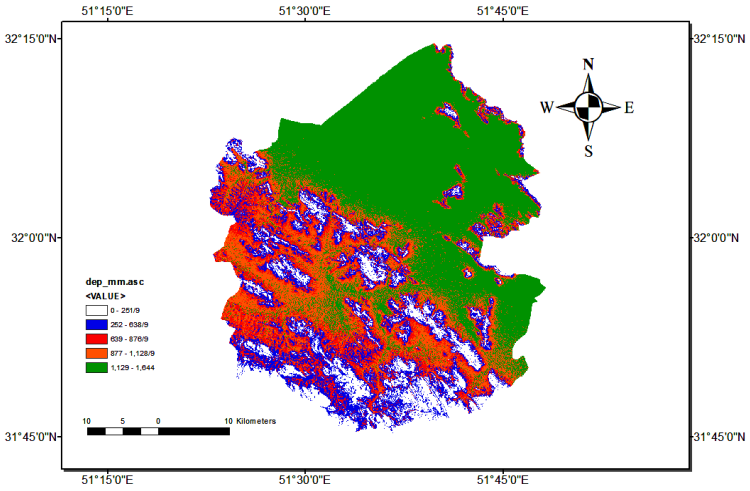
روش اول: مقدار Z را می‌شود با ضرب N×0.2 محاسبه کرد که در آن N تعداد روزهای بارانی سالانه حوزه یا ایستگاه هواشناسی است.

روش دوم: استفاده از تخمین جهانی ω.

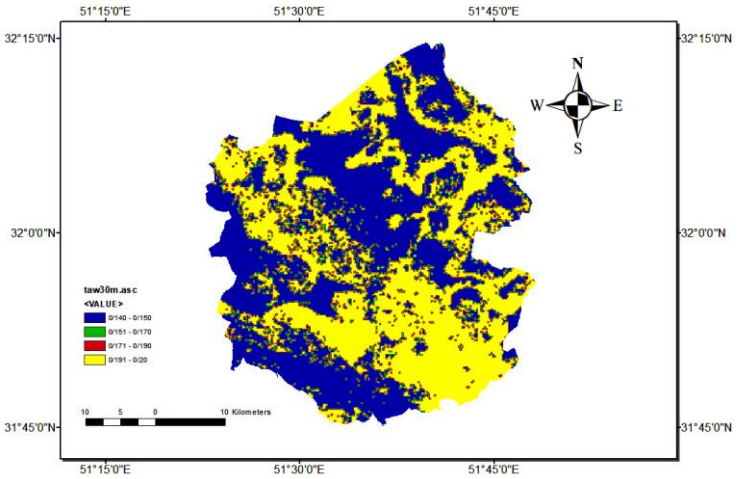
روش سوم: تخمین‌زدن با استفاده از کالیبراسیون مدل با داده‌های واقعی رواناب.



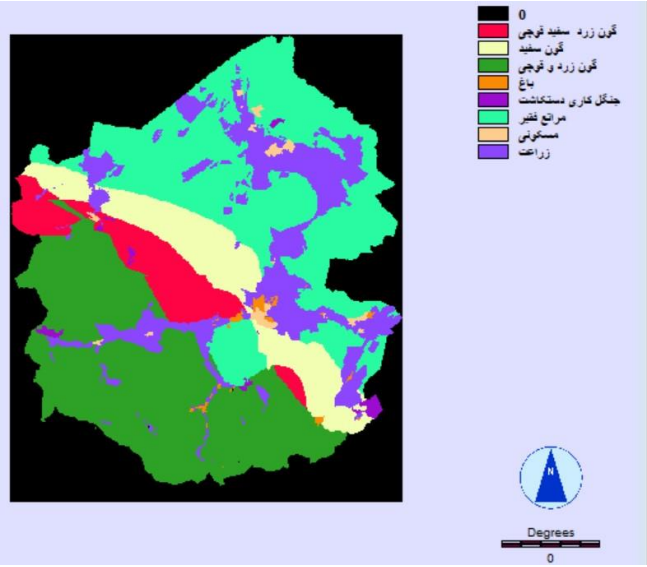
شکل ۴. نقشه تبخیر و تعرق پتانسیل



شکل ۵. نقشه عمق خاک (میلی‌متر)



شکل ۶. نقشه آب قابل‌دسترس



شکل۷. نقشه کاربری اراضی و پوشش گیاهی حال حاضر

به علت عدم وجود ایستگاه‌هایی با داده‌های روزانه مربوط به بارندگی در منطقه مورد مطالعه و همچنین اهمیت انتخاب عددی صحیح برای پارامتر Z از روش سوم استفاده شد.

برای ساخت نقشه تولید رواناب در شرایط آینده (سال ۲۰۵۰)، نقشه‌های ورودی به شرح زیر تهیه و وارد مدل شد:

۱- نقشه پوشش گیاهی – کاربری اراضی در شرایط تغییر اقلیم (سناریوی rcp26 سال ۲۰۵۰) که با استفاده از خروجی پیش‌بینی مدل‌های پراکنش گونه‌ای (Species Distribution Modelling) و باتوجه‌به تغییرات سطح و پراکنش سه گونه گون زرد (*Astragalus verus*)، گون سفید (*Astragalus gossypinus*) و گون قوچی (*Astragalus compactus*) ساخته شد (آقاسی و همکاران، منتشر نشده) (شکل ۸).

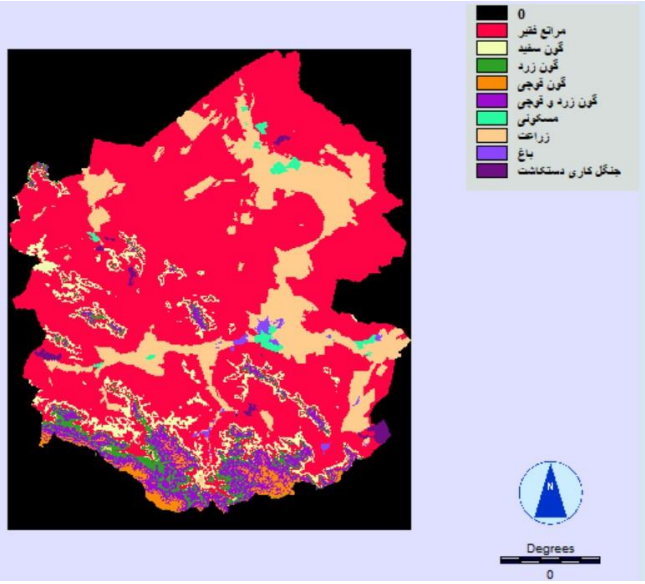
۲- نقشه متوسط بارش سالانه در شرایط تغییر اقلیم (سناریوی rcp26 سال ۲۰۵۰)، با استفاده از داده‌های Chelsa تهیه شد (شکل ۹).

۳- نقشه تبخیر و تعرق سالانه در شرایط تغییر اقلیم (سناریوی rcp26 سال ۲۰۵۰)، با استفاده از داده‌های Chelsa تهیه شد (شکل ۱۰).

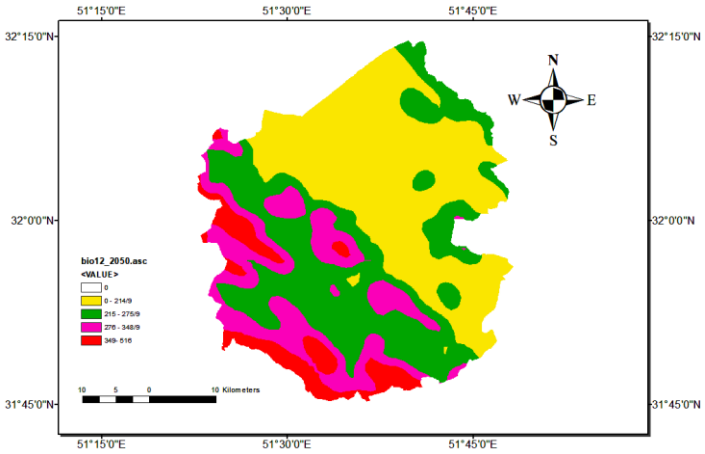
سایر متغیرها و نقشه‌های ورودی به مدل با فرض عدم تغییر طی شرایط تغییر اقلیم تا سال ۲۰۵۰ میلادی ثابت در نظر گرفته شد و مدل مجدداً اجرا شد.

ج_ ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستم با روش هزینه جایگزین

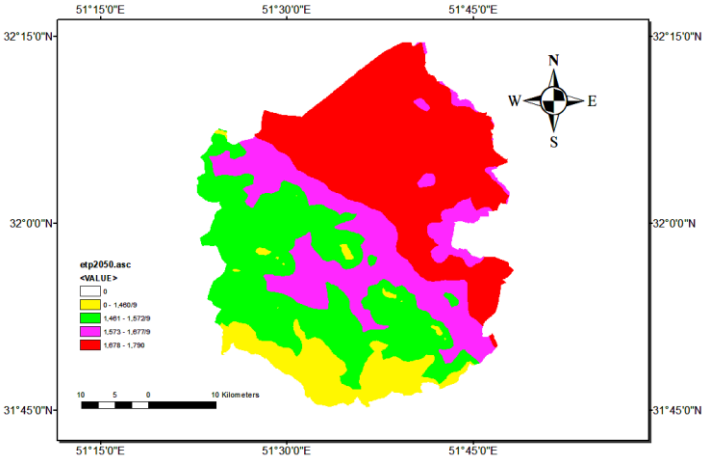
زمانی که هیچ بازار مشخص و آشکاری برای خدمات اکوسیستم وجود نداشته باشد، به‌ناچار از توانایی‌های غیرمستقیم برای ارزیابی ارزش خدمات اکوسیستم استفاده می‌شود. یکی از روش‌های ارزش‌گذاری غیرمستقیم، روش هزینه جایگزین (Replacement Cost) است (۱۸). ارزش تعدادی از کارکردهای اکوسیستم‌ها نظیر کارکردهای تولیدی و بعضی از کارکردهای تنظیمی و اطلاعاتی و خدمات تفریحی و توریستی که در بازار مورد مبادله قرار می‌گیرند، به‌وسیله روش هزینه جایگزین تعیین می‌شود. روش هزینه جایگزین از جمله روش‌های مرتبط با برآورد ارزش خدمات اکوسیستم مبتنی بر هزینه‌های اقدامات پیشگیرانه به‌منظور جلوگیری از خسارت باتوجه‌به خدمات ازدست‌رفته است. این روش با انجام اقدامات دقیق از ارزش‌های اقتصادی، میزان تمایل مردم به پرداخت هزینه برای یک محصول یا خدمات را اساس کار خود قرار نمی‌دهد؛ بلکه بر این فرض استوار است که هزینه‌های اجتناب از خسارت و یا تعویض اکوسیستم و یا خدمات، خود برآورد مفید از ارزش اکوسیستم یا خدمات را به‌دست می‌دهند (۱۹).



شکل۸. نقشه کاربری اراضی و پوشش گیاهی سال ۲۰۵۰



شکل۹. نقشه بارش سالانه (۲۰۵۰)



شکل۱۰. نقشه تبخیر و تعرق سالانه (۲۰۵۰)

در واقع فرض اساسی در روش هزینه جایگزین این است که ارزش کالا یا خدمات زیست‌محیطی ازدست‌رفته، معادل هزینه جایگزینی یا برگرداندن آن به حالت اولیه است. به‌عنوان مثال اگر پلی در اثر سیلاب تخریب شده باشد، خسارت وارده معادل هزینه ساخت یا جایگزینی مجدد آن پل خواهد بود.

از روش هزینه جایگزین در مطالعات گذشته برای ارزش‌گذاری خدمت ترسیب کربن در مراتع (۱۲) و برآورد هزینه سالانه فرسایش خاک در ایران استفاده شده‌است (۱۱). همچنین شارزه ای و مبرقعی (۳۷)، به ارائه الگوی دیگر ارزش‌گذاری مکانی کارکرد جذب دی‌اکسیدکربن در جنگل‌های خزری ایران با روش هزینه جایگزین پرداختند. مطالعات دیگری هم در خارج کشور در مورد ارزش‌گذاری اقتصادی اکوسیستم‌های مرتعی و جنگلی با روش هزینه جایگزین صورت گرفته است (۴۲). پاسکوآل و همکاران (۲۰۱۰) به‌تفصیل به بحث‌وبررسی پیرامون روش هزینه جایگزین پرداخته‌اند (۳۰).

در خصوص ارزش‌گذاری اقتصادی خدمت تنظیمی کنترل رواناب و یا برآورد اقتصادی رواناب و خسارت آن در داخل کشور مطالعات اندکی صورت گرفته‌است که برای نمونه می‌توان به مطالعات موسوی و ارزانی در خصوص ارزش اقتصادی کارکرد تولید رواناب توسط اکوسیستم‌های مرتعی البرز مرکزی در منطقه طالقان اشاره کرد (۳۳). آن‌ها با تهیه نقشه رواناب به روش CN (شماره منحنی)، تأثیر وجود یا حذف پوشش گیاهی در سطح تیپ‌های مرتعی را برآورد و درنهایت ارزش اقتصادی هر هکتار مرتع را در سال ۱۳۹۳ به روش هزینه جایگزین، معادل ۹۶۰۶۲۸ ریال تعیین کردند.

جعفرزاده و همکاران نیز در مدل‌سازی و ارزش‌گذاری ۴ مورد از خدمات اکوسیستمی مختلف، تولید رواناب را با استفاده از مدل InVEST کمّی کرده و ارزش اقتصادی آن را به ازای هر هکتار مرتع با کمک روش هزینه جایگزین، معادل ۴۶ میلیون ریال برآورد کردند (۱۶). نتایج آن‌ها نشان داد که از بین ۴ خدمت اکوسیستمی، تولید رواناب بیشترین سهم ارزش‌گذاری (۴۶ درصد) را به خود اختصاص داد.

علت استفاده از این روش:

در روش هزینه جایگزین در قیاس با سایر روش‌های غیرمستقیم ارزش‌گذاری، احتمال خطا کمتر است و در نتیجه نتایج مطمئن‌تری به ما می‌دهد. برای نمونه روش ترجیحات آشکار شده (بیان‌شده) که به اظهارات اشخاص پرسش‌شونده بستگی دارد، دارای اریبی است و به‌خاطر بیگانه بودن افراد به این روش و نوپا بودن در ایران چندان قابل‌اتکا نیست (۴۴ و ۳۷) و یا روش انتقال منافع (Benefit transfer method) که نیاز به وجود داده‌ها و نتایج در مناطق مجاور نزدیک با شرایط اکولوژیک مشابه برای تعمیم نتایج دارد که معمولاً این داده‌ها در ایران وجود ندارد (۲۶).

در این پژوهش به‌منظور ارزش‌گذاری خدمت تنظیمی کنترل رواناب با روش هزینه جایگزین، به‌جای محاسبه خسارات افزایش رواناب ناشی از تغییرات اقلیمی که در واقع ناشی از کاهش کارکرد تنظیمی اکوسیستم است، هزینه‌های لازم برای کنترل و نفوذ رواناب اضافی از طریق انجام پروژه‌های متنوع آبخیزداری برآورد و در محاسبات منظور شد.

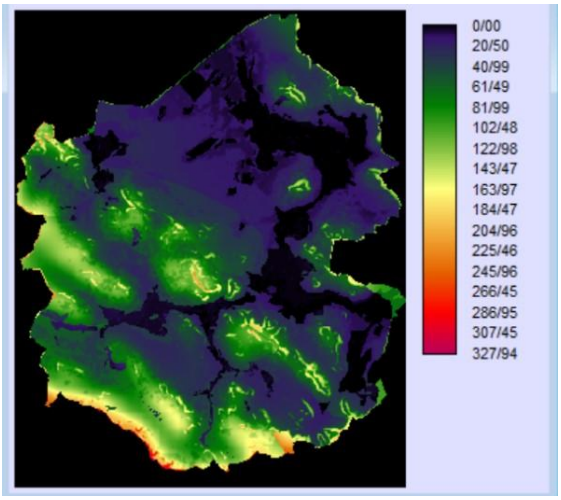
نتایج

نتایج مدل‌سازی خدمت اکوسیستمی کنترل رواناب در ناحیه زاگرسی برای شرایط حال حاضر (۲۰۱۳) و شرایط تغییر اقلیم آینده (۲۰۵۰)، به شرح زیر است:

الف- میزان تولید رواناب حال حاضر (۲۰۱۳)

مقادیر تولید رواناب در کل حوزه آبخیز رودخانه شور از کمینه صفر تا بیشینه ۳۲۷ میلی‌متر متغیر است (شکل ۱۱). مقادیر نشان‌دهنده میزان ارتفاع رواناب به ازای یک پیکسل ۳۰×۳۰ مترمربع و برحسب میلی‌متر است. باتوجه‌به نقشه خروجی می‌بینیم که عمده رواناب تولیدی حوزه آبخیز از قسمت‌های جنوبی و غربی حوزه تولید و سرازیر می‌شود که به رنگ قرمز و سبز تیره نمایش داده‌شده‌است.

در شکل ۱۲ میزان تولید رواناب به ازای هر زیرحوزه جداگانه و برحسب میلی‌متر محاسبه نشان داده‌شده‌است. به‌این‌ترتیب



شکل۱۱. نقشه تولید رواناب حال حاضر در مقیاس پیکسل (pixel level)

امکان مقایسه زیرحوزه‌ها از لحاظ تولید رواناب فراهم شد.

باتوجه‌به اینکه نتایج خروجی مدل Water Yield برحسب میلی‌متر و با ابعاد پیکسل ۳۰ ×۳۰ متر است، بنابراین برای محاسبه حجم تولید رواناب بر حسب مترمکعب، از معادله (۴) استفاده می‌کنیم:

= میزان ارتفاع تولید رواناب حوزه یا زیرحوزه (mm)
× متوسط میزان ارتفاع تولید رواناب هر پیکسل (mm)
تعداد خالص پیکسل‌ها

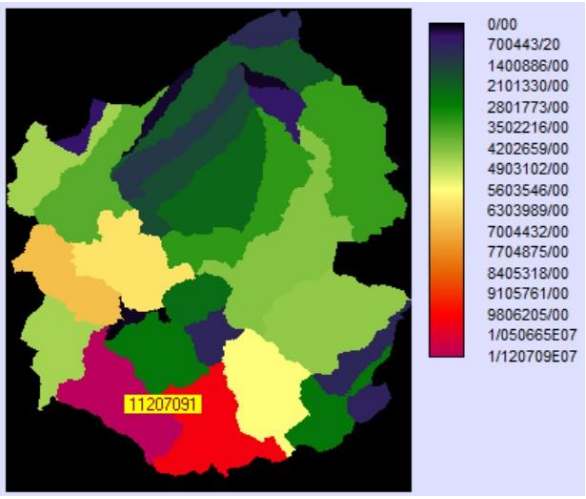
(۴)

متوسط مساحت هر پیکسل، ۸۰۶/۱۶۴ متر مربع در محیط R محاسبه شد. برای محاسبه حجم تولید رواناب یک زیرحوزه (برای نمونه، زیرحوزه همگین) برحسب متر مکعب بر اساس معادله (۵) اقدام می‌کنیم:

متوسط میزان ارتفاع رواناب (mm) × متوسط مساحت پیکسل‌ها
حجم رواناب زیرحوزه همگین (m3) = زیرحوزه همگین
= ۱۱۲۰۷۰۹۱(mm) × ۰/۸۰۶
= ۹۰۳۲۹۱۵m^3 حجم رواناب زیرحوزه همگین

(۵)

باتوجه‌به نبود داده‌های واقعی رواناب در کل حوزه و عدم وجود ایستگاه‌های هیدرومتری و به‌منظور کالیبره کردن مدل،



شکل۱۲. نقشه تولید آب حال حاضر در سطح زیرحوزه (sub watershed level)

مقادیر رواناب دو زیرحوزه اصلی رودخانه شور (زیرحوزه‌های بودجان و همگین)، با نتایج مطالعات آبخیزداری (۱ و ۳۳) و برآوردهای به‌دست‌آمده از روش‌های تجربی به‌عنوان شاهد یا Control مقایسه شد (جدول ۲).

مجموع میزان ارتفاع رواناب در سطح کل حوزه آبخیز معادل ۸۷۴۸۸۰۳۲ میلی‌متر است. با ضرب مقدار فوق در عدد ۰/۸۰۶، متوسط میزان حجم تولید رواناب سالانه کل حوزه معادل ۷۰۵۱۵۳۵۳ مترمکعب (۷۰/۵ میلیون مترمکعب) به‌دست‌آمد.

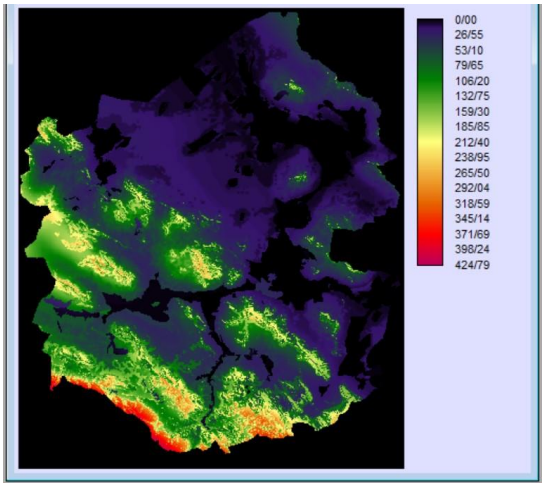
ب- میزان تولید رواناب تحت شرایط تغییر اقلیم آینده (۲۰۵۰)

در شکل ۱۳ و ۱۴، نقشه خروجی تولید رواناب تحت شرایط تغییر اقلیم آینده (۲۰۵۰) به‌ترتیب در دو مقیاس پیکسل و زیرحوزه نشان داده‌شده‌است. مقادیر از کمینه صفر تا بیشینه ۴۲۴ میلی‌متر متغیر است (شکل۱۳) و درمقایسه با شرایط حال حاضر (شکل۱۱)، نشان دهنده افزایش مقادیر رواناب تولیدی در شرایط تغییر اقلیم است.

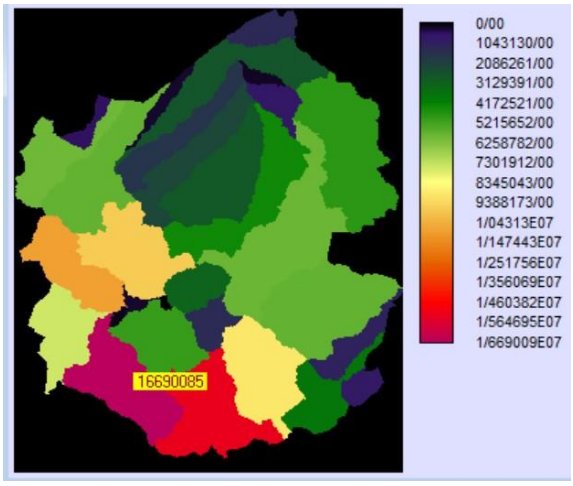
مجموع میزان ارتفاع رواناب در سطح کل حوزه آبخیز در شرایط تغییر اقلیم در سال ۲۰۵۰، معادل ۱۳۰۶۸۳۳۲۸ میلی‌متر است. با ضرب مقدار فوق در عدد ۰/۸۰۶، متوسط میزان حجم تولید رواناب سالانه کل حوزه معادل مترمکعب (۱۰۵/۳۳ میلیون مترمکعب) به‌دست‌آمد.

جدول۲. مقایسه نتایج خروجی مدل Water Yield با مدل‌های تجربی

نام زیرحوزه	مساحت زیرحوزه (هکتار)	میزان تولید رواناب (میلیون مترمکعب) مدل water yield	میزان تولید رواناب (میلیون مترمکعب) مدل جاستین	میزان تولید رواناب (میلیون مترمکعب) مدل بیلان هیدرولوژی
بودجان	۱۹۰۰۰	۱۳/۲۸۳	۱۳/۵	—
همگین	۱۴۰۰۰	۹/۰۳۲	—	۹/۷۷



شکل ۱۳. نقشه تولید رواناب در مقیاس پیکسل سال ۲۰۵۰



شکل۱۴. نقشه تولید رواناب در مقیاس زیرحوزه سال ۲۰۵۰

ج- ارزش‌گذاری کاهش خدمت اکوسیستم کنترل رواناب (برآورد خسارت تغییر اقلیم)

باتوجه‌به نتایج مندرج در جدول ۳ و بنابر پیش‌بینی مدل، میزان رواناب تولیدی کل حوزه آبخیز رودخانه شور در زاگرس مرکزی بر اثر تغییر اقلیم از ۷۰ میلیون مترمکعب در سال به ۱۰۵ میلیون مترمکعب افزایش خواهد یافت. این افزایش رواناب (۳۴/۸۲ میلیون مترمکعب) که معادل ۵۰ درصد رواناب سالانه بلندمدت حوزه در شرایط معمولی است، می‌تواند منجر به خسارات قابل‌توجه در اراضی زیردست حوزه آبخیز و تاسیسات زیربنایی نظیر جاده، مناطق مسکونی، کشاورزی یا صنعتی شود و در صورت عدم مقابله با آن یا عدم پیش‌بینی تمهیدات لازم، این تهدیدات جدی و خطرناک خواهد بود. از طرفی این میزان افزایش رواناب به منزله کاهش خدمت اکوسیستمی کنترل رواناب است. به همین منظور در این پژوهش هزینه‌های اجرای عملیات متنوع آبخیزداری به‌منظور کنترل رواناب و کاهش خسارات ناشی از آن، به‌عنوان ارزش کاهش خدمت اکوسیستمی کنترل رواناب در حوزه آبخیز یا به تعبیر دیگر خسارت تغییر اقلیم مد نظر قرار گرفت.

در حال حاضر باتوجه‌به نتایج تجربی و هزینه‌های واقعی اجرایی و بر اساس فهرست بهای آبخیزداری سال ۱۴۰۱، هزینه مدیریت وکنترل هر هکتار رواناب از طریق عملیات متنوع آبخیزداری شامل عملیات بیولوژیک، مکانیکی و بیومکانیکی ۱۰ میلیون ریال است که می‌تواند ۵۳۰ مترمکعب آب را کنترل نماید (اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان اصفهان). بدین ترتیب برای کنترل و مدیریت ۳۵ میلیون متر مکعب رواناب تولیدشده ناشی از تغییرات اقلیمی تا سال ۲۰۵۰، نیاز به اعتباری بالغ بر ۶۶۰,۳۷۷,۳۵۸,۴۹۰ ریال بر اساس ارزش حال است که در این پژوهش به‌عنوان خسارت ناشی از تغییر اقلیم یا در واقع هزینه جایگزین به‌منظور کنترل رواناب اضافی تولیدشده (هزینه کاهش کارکرد خدمت تنظیمی اکوسیستم)، مد نظر قرار گرفت.

جدول۳. تغییرات تولید رواناب کل حوزه آبخیز رودخانه شور در سال ۲۰۵۰ نسبت به حال حاضر

کل تولید رواناب حال حاضر (میلیون مترمکعب)	کل تولید رواناب (میلیون مترمکعب) سال ۲۰۵۰	تغییرات (میلیون مترمکعب)	درصد افزایش
۷۰/۵۱	۱۰۵/۳۳	۳۴/۸۲	۴۹درصد

بحث و نتیجه‌گیری

گرم‌شدن جهانی (Global warming) و تغییر اقلیم تـوأم بـا تغییـرات کاربری اراضی در حال حاضر یکی از مهم‌تـرین چالش‌هـای اساسـی برای منابع طبیعی و مراتع در سطح جهانی و ملی است. مقابله بـا ایـن تهدیدات نیازمند برنامه‌ریزی و تأمین اعتبار و پیش‌بینی سطح و میـزان خسـارات اقتصـادی وارده بـه خـدمات اکوسیسـتمی مراتـع اسـت. به‌منظور مدل‌سازی و تهیه نقشه تولیـد روانـاب تحـت شـرایط تغیـر اقلیم یا تحت شرایط مختلف مـدیریتی و تغییـرات کـاربری اراضـی، روش‌ها و مـدل‌های متعـددی وجـود دارد کـه یکـی از مهم‌تـرین و پرکاربردترین این مدل‌ها، InVEST است. نتایج حاصـل از نقشـه‌های تولید رواناب با مدل InVEST در شرایط تغییر اقلـیم تـا سـال ۲۰۵۰ در حوزه آبخیز رودخانه شور حـاکی از افـزایش ۴۹ درصـدی تولیـد رواناب در مقایسه با حال حاضر است (جدول۳).

مقادیر افزایش تولیـد رواناب بـرای زیرحوزه‌هـای ۳۳ گانـه، از کمینه ۱۹ درصد برای زیرحوزه شماره ۶۷ تا بیشینه ۱۰۶ درصد بـرای زیرحوزه شماره ۷۲ محاسبه شد (جدول ۴). تفـاوت میـزان افـزایش رواناب در زیرحوزه‌های مختلف ناشی از پارامترهـای مختلـف نظیـر وسعت زیرحوزه، درصد شیب، خصوصـیات فیزیـوگرافی زیرحـوزه، کاربری اراضی و غیره است. به‌طور میـانگین افـزایش رواناب بـرای ۳۳ زیرحوزه برابر ۵۰ درصد است.

کارایی مدل InVEST در نقاط مختلف دنیا و نیز کشور ایـران به اثبات رسیده‌است. برای نمونه تلمن و همکاران بـا بـه‌کارگیری مـدل InVEST، خـدمات هیـدرواکولوژیک اکوسیسـتم در یـک حوزه آبخیز با پوشش غالب کائوچو در چین را مدل‌سازی کردند و نشان دادند که تغییرات اقلیمی تـوأم بـا جنگـل‌زدایی و تبـدیل گسترده اراضی به کاشت درختان کائوچو، اثرات قابـل‌توجهی بـر تولید رواناب و تولید رسـوب داشـته و پیش‌بینـی کردنـد، میـزان تولید رواناب تا سال ۲۰۷۰ افزایش خواهد یافت (۳۹).

همچنین مدل InVEST در مقیاس‌های مختلف مکانی از حوزه آبخیزی با مساحت ۱۰۰۰ هکتار تا منطقه‌ای به وسعت کشور ایـران در نقاط مختلف دنیا به‌کار رفته و نتایج قابـل قبـولی داشـته اسـت. برای نمونه یین و همکاران در منطقـه‌ای بـا مسـاحت ۱۵۳ میلیـون هکتار در شمال چـین، تولیـد رواناب و حساسـیت آن نسـبت بـه پارامترهای اقلیمی را با InVEST مدل‌سازی کردنـد (۴۵) و نتیجـه گرفتند تغییر اقلـیم می‌توانـد منجربـه افـزایش تولیـد رواناب در گراسـلندها و جنگل‌هـای منـاطق مرطـوب شـمال چـین شـود. علاوه‌براین اعلام کردند که مدل InVEST در مقایسه با مـدل‌های پیچیده‌تر نظیر SWAT به مراتب کـاربردی‌تر اسـت و نیـازی بـه داده‌های روزانه ندارد؛ چرا که با داده‌های متوسط بلندمـدت نظیـر تبخیر و تعرق و بـارش کـار می‌کنـد و نتـایج خـوب و مطمئنـی می‌دهد، آن هم برای یک منطقه وسیع با گرادیان اقلیمی زیـاد. در مقایسه با مدل‌های دیگـر، محاسـبات مـدل InVEST بـر اسـاس منحنی بادیکو و بارش سالانه است و با نیازهای داده‌ای به نسـبت کم اجرا می‌شود. همچنین ابزار مؤثری برای تخمین یـک خـدمت اکوسیسـتمی ماننـد تولیـد رواناب، بـا دقـت مکـانی زیـاد و در مقیاس‌های مختلف ارائـه می‌کنـد (۱۱ و ۲۶). شـفیع زاده و زارع چاهوکی نیز در مدل‌سازی خدمت اکوسیستمی تولید رواناب در حوزه آبخیز طالقان میانی، به این نکته اشـاره کرده‌انـد کـه مـدل InVEST توابع خدمات اکوسیسـتمی را در قالـب نقشـه‌هایی بـا سطح داده‌های ورودی کم تجسم مـی کنـد، امـا حجـم داده‌هـای خروجی زیادی دارد و به ساده سازی مسائل پیچیده و درنتیجـه، افزایش توانایی حل مسئله می پردازد (۳۵).

جدول۴. درصد افزایش رواناب تولیدی زیرحوزه‌های مختلف رودخانه شور در سال ۲۰۵۰ در مقایسه با حال حاضر

درصد افزایش رواناب	کد زیرحوزه	درصد افزایش رواناب	کد زیرحوزه
۳۹/۲۳	۴۱	۶۱/۱۶	۶۳
۴۸/۰۸	۴۲	۳۹/۶۵	۶۶
۴۲/۱۷	۴۳	۶۳/۸۴	۷۳
۵۱/۶۵	۴۴	۸۶/۹۳	۷۰
۵۸/۷۱	۴۰	۲۶/۲۱	۵۷
۴۳/۲۱	۵۱	۷۰/۶۶	۶۸
۳۷/۲۵	۴۵	۱۰۳/۵۳	۶۹
۴۷/۵	۴۷	۹۷/۴۷	۷۱
۵۵/۰۶	۳۷	۱۰۶.۵۷	۷۲
۳۴/۸۵	۳۲	۴۸/۹۲	۷۴
۳۰/۷۴	۳۳	۵۸/۳۷	۷۸
۲۹/۶۲	۴۸	۴۷/۸۵	۶۵
۳۲/۸۸	۴۹	۵۱/۸۶	۷۷
۳۳/۲۴	۵۳	۱۹/۵۸	۶۷
۳۸/۷۹	۵۲	۲۹/۵۹	۸۳
۵۹/۶۹	۶۴	۲۸/۱۵	۸۴
۳۰/۱۹	۵۶		

در مقیاس محلی یا منطقه‌ای، مدل InVEST برای بررسی الگوهای کلی و تغییرات در خدمات اکوسیستم ناشی از تغییرات کاربری زمین یا تغییرات اقلیمی در مطالعه‌های زیادی به‌کار گرفته شده و با ویژگی‌های مختلف جغرافیایی و اقلیمی عملکرد خوبی داشته‌است (۲۵). در داخل کشور نیز می‌توان به مطالعه‌های حقدادی و همکاران در حوزه آبخیز دلیچای استان تهران با وسعتی بالغ بر۳۴۰۰۰ هکتار (۱۳)، احمدی میرقائد و سوری در حوزه آبخیز تراز استان خوزستان با وسعتی بالغ بر ۳۲۵۰۰ هکتار (۲)، جعفرزاده و همکاران حوضه آبخیز میشخاص استان ایلام با مساحت ۱۳۴۶۸ هکتار (۱۶) و درویشی وآصفی در حوزه آبخیز دشت قزوین با وسعتی بالغ بر ۸۷۷۰۵۰ هکتار (۶) اشاره کرد.

در این پژوهش نیز موفقیت‌آمیز بودن استفاده از مدل InVEST برای ساخت نقشه تولید رواناب در مقیاس محلی در حوزه آبخیز رودخانه شور با مساحت ۱۵۰۰۰۰ هکتار برای دوره زمانی حال حاضر و آینده تحت شرایط تغییر اقلیم و یا تحت تغییرات کاربری اراضی مشخص شد (جدول ۲). مدل‌سازی و مطالعات صورت‌گرفته در داخل کشور نیز با یافته‌های این پژوهش هم راستا است. حقدادی و همکاران (۱۳) در بررسی خدمت اکوسیستم تولید آب با استفاده از

نرم‌افزارInVEST، نتیجه گرفتندکه مدل InVEST با وجود اینکه از اطلاعات به نسبت کم و قابل دسترسی استفاده می‌کند، کارایی زیادی دارد و به‌وسیله آن می‌توان خدمات اکوسیستم را نقشه‌سازی کرد و در تصمیمات مدیریتی از آن استفاده کرد. آن‌ها نتیجه گرفتند که عوامل فیزیوگرافی و اقلیمی تأثیر فراوانی بر میزان تولید رواناب در سطح حوزه آبخیز دارند که می‌توان از بین این عوامل ارتفاع و بارش را تأثیرگذارترین آن‌ها نامید. درویشی و آصفی نیز در برآورد میزان تولید رواناب بیان کردند که مدل InVEST به راحتی قابل استفاده است و در حوزه قزوین عملکرد خوبی دارد و اگرچه هنوز برخی ابهامات در مورد این شبیه‌سازی وجود دارد، اما نتایج آن، مبنایی برای تصمیم‌گیری به‌عنوان بخشی از مدیریت علمی منابع آب را فراهم می‌کند. همچنین مدل InVEST در مقیاس مکانی برای پیش‌بینی تهدیدات طبیعی مانند سیل در مناطق خشک مفید است (۶).

همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که مدل InVEST، می‌تواند برآیند تغییرات کاربری اراضی توأم با تغییرات اقلیمی را به‌طور همزمان مدل‌سازی و به کمّیت تبدیل کند. پیش‌بینی مقادیر رواناب در حال حاضر یا تحت شرایط تغییر اقلیم می‌تواند مبنای ارزش‌گذاری و برآورد خسارات یا احیاناً منافع حاصل از تغییر اقلیم قرار گیرد و به مدیران منابع طبیعی یا سیاستمداران دراین‌خصوص کمک کند. علاوه‌براین مشخص شد که افزایش میزان رواناب ناشی از تغییر اقلیم و درنتیجه کاهش کارکرد تنظیمی اکوسیستم باتوجه‌به روند گرم‌شدن جهانی کره زمین، امری اجتناب‌ناپذیر است. احمدی میرقائد و سوری نیز در بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی بر تولید آب در ۲ بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ و ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰، به نتایج مشابهی رسیدند. نتایج آن‌ها نشان داد، در ۳۰ سال گذشته مساحت جنگل‌ها و مراتع در منطقه مطالعاتی به‌ترتیب حدود ۳۱۹۹ و ۱۶۱۱ هکتار کاهش و مساحت اراضی کشاورزی و ساخته‌شده‌ها به‌ترتیب ۴۳۸۸ و ۳۸۷ هکتار افزایش یافته و پیش‌بینی کردند، در ۳۰ سال آینده نیز ۲۴۴۲ هکتار از مساحت جنگل‌های منطقه کاسته شود و مساحت کاربری‌های کشاورزی، مراتع و ساخته‌شده‌ها افزایش یابد. علاوه‌براین ویژگی‌های ساختاری سیمای سرزمین و الگوی کاربری اراضی حاکم بر منطقه می‌تواند تعیین‌کننده تولید رواناب باشد. بر اساس نتایج آن‌ها کل حجم رواناب تولیدی در منطقه برای سال‌های ۲۰۲۰، ۱۹۹۰ و ۲۰۵۰ به‌ترتیب ۲۴/۸، ۲۶/۵ و ۲۸/۳ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد که روندی افزایشی را نشان می‌دهد (۲).

ذکر این نکته نیز ضروری است که خروجی مدل InVEST باید بر اساس داده‌های رواناب واقعی کالیبره شود. دکسی و همکاران تولید رواناب حوزه آبخیز رودخانه زالا مجارستان با مساحت ۱۵۲۱۰۰ هکتار را با کمک InVEST مدل‌سازی کردند و نتیجه گرفتند، در صورت وجود آمار واقعی از رواناب خروجی حوزه و با کالیبراسیون پارامتر Z می‌توان به نتایج دقیق و نزدیک به واقعیت دست یافت (۷). در مطالعه کنونی باتوجه‌به نبود مشاهدات ثبت‌شده در خصوص رواناب در هیچ یک از زیر حوزه‌های مطالعه‌شده، این امکان وجود نداشت و نتایج به‌دست‌آمده از مدل، با خروجی مدل‌های تجربی برآورد شده در مطالعات آبخیزداری مقایسه شد (۱ و ۳۳). در صورت وجود داده‌های واقعی و بلندمدت از رواناب حوزه یا زیرحوزه‌ها، نتایج تولید رواناب با داده‌های واقعی اصلاح و دقت مدل‌سازی به‌مراتب افزایش خواهد یافت. از دیگر موارد عدم قطعیت مدل InVEST، نبود داده‌های بلندمدت واقعی از دما و بارش در این حوزه و بسیاری از حوزه‌های آبخیز کشور است که خود ناشی از عدم وجود ایستگاه‌های هواشناسی است. در چنینی شرایطی استفاده از داده‌های اقلیمی جهانی نظیر Chelsa اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

جمع‌بندی

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل تولید آب می‌تواند میزان تولید رواناب را با دقت خوب پیش‌بینی کند. همچنین استفاده از روش ارزش‌گذاری غیرمستقیم هزینه جایگزین به‌منظور برآورد اقتصادی خسارات تغییر اقلیم به‌عنوان یک روش مطمئن و سریع مورد

استفاده قرار گرفت. روند گرم‌شدن جهانی هوا و لزوم آمادگی و مقابله با تهدیدات آب‌وهوایی و از جمله سیل، نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و داده‌های کمّی در خصوص رواناب برای برآورد اقتصادی هزینه‌های پیشگیری است. مطالعه و اجرای طرح‌های آبخیزداری در حوزه‌های آبخیز از جمله بهترین و مفیدترین گزینه‌ها به‌منظور کاستن از خطرات تغییر اقلیم و سیلاب و تبدیل تهدیدها به فرصت است. با اجرای طرح‌های آبخیزداری علاوه بر کاهش میزان رواناب، با افزایش نفوذ آب به درون خاک شدت خطرات تغییر اقلیم و سیل به کمترین مقدار می‌رسد و تغذیه آبخوان‌ها و قنوات و چشمه‌ها به‌خوبی صورت می‌گیرد. باتوجه‌به نتایج خوب مدل تولید آب در این حوزه و ازآنجاکه برای ارزش‌گذاری خدمت اکوسیستم کنترل رواناب نیاز به برآورد کمّی تولید رواناب حوزه در شرایط حال حاضر و آینده است، بنابراین استفاده از مدل تولید رواناب برای سایر حوزه‌های آبخیز استان اصفهان با شرایط مشابه به‌خصوص در مراتع و گون زارهای جنوب و غرب استان که از لحاظ پوشش گیاهی و پارامترهای اقلیمی دارای وضعیت مشابهی هستند، توصیه می‌شود.

همچنین باتوجه‌به آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های گون‌زار در برابر تغییرات اقلیمی و احتمال کاهش سطح رویشگاه‌های گون و متعاقباً تشدید شرایط خشکسالی به علت ازدست‌رفتن این رویشگاه‌ها که بیشتر در نقاط مرتفع و کوهستانی و مناطق تولیدکننده رواناب قرار گرفته‌اند و باتوجه‌به نقش مهم گون زارها در کنترل و نفوذ رواناب‌ها و آب‌های سطحی به درون خاک، ضرورت دارد سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور به حفاظت از این رویشگاه‌ها توجه بیشتری نشان دهد. همچنین از هرگونه تخریب و دستکاری یا صدور مجوزهای بهره‌برداری نظیر معادن در این اکوسیستم‌ها باید به شدت اجتناب کرد.

منابع مورد استفاده

1. Abandish Sepahan Company. 2000. Implementation studies of flood control in Dahaghan watershed. Watershed management of Jihad Construction Organization of Isfahan province (in Farsi).
2. Ahmadi Mirghaeda, F. and B. Souri. 2023. The Impact of Land Use Change on Water Yield in the Teraz Watershed, Khuzestan Province, Southwestern Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards* 12(2): 29-46. DOI: 10.22067/GEOEH.2022.77944.1261
3. Allen, G, L.S. Pereira, D.R. Katholieke and M. Smith. 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper ,No. 56 . Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements), Rome.
4. Brisbane Declaration. 2007. Environmental flows are essential for freshwater ecosystem health and human well-being. 10th International River Symposium, Brisbane, Australia.
5. Costanza, R., R. d'Arge, R. Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton and M. Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387(6630): 253–260. https://doi.org/10.1038/387253a0
6. Darvishi, A. and M. Yousefi. 2022. Using water yield ecosystem services to assess water scarcity in a metropolitan arid environment in Qazvin region(Iran). *Papers (Institut d'Estudis Regionals i Metropolitans de Barcelona)* 64: 216:222. https://www.researchgate.net/publication/361925016
7. Decsi, B., A. Vári and Z. Kozma. 2020. The effect of future land use changes on hydrologic ecosystem services: a case study from the Zala catchment, Hungary. *Biologia Futura* 71(4): 405-418. DOI: 10.1007/s42977-020-00032-6
8. Dominati, E., M. Patterson and A. Mackay. 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics* 69(9): 1858-1868. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2010.05.002
9. Daily, G.C., J. Goldstein, P.M. Kareiva, E. Lonsdorf, R. Naidoo, T.H. Ricketts and M.R. Shaw. 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7 (1): 4-11. https://doi.org/10.1890/080023.
10. Falloon, P. and R. Betts. 2010. Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation—the importance of an integrated approach. Science of the Total Environment 408(23): 5667-5687. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.05.002
11. Ghorbani, M and S. Hoseini. 2007. Replacement cost method to estimate the annual cost of soil water erosion in Iran. *Journal of Agricultural Research* 7(3): 177-186 (in Farsi).

12. Ghoreyshi, R., J. Motamedi and E. Sheidai Karkaj. 2013. Estimating Economic Value of Carbon Sequestration Services in Rangelands with Replacement Cost Method (Case Study: Khoy Dizaj Batchy Rangeland). *Journal of Environmental Science* 12(2): 55-64 (in Farsi).
13. Haqdadi, M., G. Heshmati and M.S. Azimi. 2017. Investigating water production ecosystem service using InVEST software. (Case study: Delichai watershed). *Journal of Water and Soil Protection Research* 25(4): 275-290 (in Farsi).
14. Hewlett, J.D. and A.R. Hibbert. 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. PP. 275-290. In: W.E. Sopper and H.W. Lull (Eds.), Forest Hydrology, Pergamon Press, New York.
15. Herrero, M., S. Wirsenius, B. Henderson, C. Rigolot, P. Thornton, P. Havlík, I.D. Boer, P.J. Gerber. 2015. Livestock and the environment: what have we learned in the past decade?. *Annual Review of Environment and Resources* 40(1): 177-202.
16. Jafarzadeh, A.A., A. Mahdavi, S.R. Fallah Shamsi and R. Yousefpour. 2020. Economic evaluation of some of the most important ecosystem services in Zagros forests. *Journal of Environment Sciences* 18(1): 137-150 (in Farsi).
17. Karimzadegan, H., M. Rahmatian, M. Dehghani Salmasi, R. Jalali and A. Shahkarami. 2007. Valuing Forests and Rangelands Ecosystem Services. *International Journal of Environmental Research* 1(4): 368-377.
18. Karimzadegan, H. 2011. Approaches to estimate damages of forests and rangelands in legal disputes. *Journal of Biological Sciences* 5(4): 179-183 (in Farsi).
19. King, N.A. 2007. Economic valuation of environmental goods and services in the context of good ecosystem governance. *Water Policy* 9(S2): 51-67.
20. Liu, S., Y. Wen and B. Wang. 1996. Ecohydrological Functions of Forest Ecosystems in China. China Forestry Publishing House, Beijing.
21. Maassoumi, A.A. 2000. The Genus Astragalus in Iran, vol.4. Research Institute of Forests and Rangeland, Tehran, Iran (in Farsi).
22. Maassoumi, A.A. 2005. The Genus *Astragalus* in Iran. Research Institute of Forests and Rangeland, Tehran, Iran (in Farsi).
23. Maassoumi, A.A. 2015. The role of forests in ecosystem balance. *Iranian nature magazine* 1(1): 47-41 (in Farsi).
24. Maes, J., B. Egoh, L. Willemen, C. Liquete, P. Vihervaara, J.Ph. Schagner, B. Grizzetti, E.G. Drakou, La Notte, A., G. Zulian, F. Bouraoui, M.L. Paracchini, L. Braat and G. Bidoglio. 2012. Mapping ecosystem services for policysupport and decision making in the European Union. *Ecosystem Services* 1(1): 31-39. DOI: 10.1016/j.ecoser.2012.06.004.
25. Meijer, K.S., W.N.M. Krogt and E. Beek. 2012. A new approach to incorporating environmental flow requirements in water allocation modeling. *Water Resources Management* 26: 1271–86. https://doi.org/10.1007/s11269-011-9958-z
26. Mobarghei, N. 2008. Application of the valuation of ecosystem services forests provide a location using GIS (Case Study: Forests Kheiroudkenar Noshahr). PhD thesis, Faculty of Environmental Science, University of Tehran, I.R. Iran (in Farsi).
27. Mohammadi, H., A. Hanafi and M. Soltani. 2019. Estimating the rate of potential evaporation and transpiration in the stations of Isfahan province. *Geographical Perspective Magazine* 5(12): 153-167 (in Farsi).
28. Mousavi, A. and H. Arzani, 2013. Estimating the economic value of the function of water regulation by alborz central pasture ecosystems. *Journal of Ecohydrology* 1(1): 11-16 (in Farsi).
29. Nelson, E., G. Mendoza, J. Regetz, S. Polasky, H. Tallis, D. Cameron and M. Shaw. 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7(1): 4-11. https://doi.org/10.1890/080023.
30. Pascual, U., R. Muradian, L. Brander, E. Gḿez-Baggethun, B. Martin-Lṕez, M. Verma and J. Farley. 2010. The economics of valuing ecosystem services and biodiversity. TEEB–Ecological and Economic Foundation. https://www.researchgate.net/publication/303444184
31. Reid, R.S., K.A. Galvin and R.S. Kruska. 2008. Global significance of extensive grazing lands and pastoral societies: an introduction. PP. 1-24. *In:* K.A. Galvin, R.S. Reid, R.H. Behnke and N. Thompson Hobbs (Eds.), In Fragmentation in semi-arid and arid landscapes: Consequences for human and natural systems. Springer Dordrecht, Netherlands.
32. Salimi, A., T. Tayyebeh Mesbahzadeh, A. Malekian and M. Mirakbari. 2022. Evaluation of the efficiency of REMO regional climate model and CanESM2 general circulation model in predicting climatic parameters (Case study: Isfahan province). *Integrated Watershed Management Journal* 2(2): 1-15 (in Farsi). doi: 10.22034/IWM.2022.554926.1033.
33. Sepahan Consulting Company. 2003. Flood control studies in the watershed area of Hamgin. Watershed management of Isfahan Province Agricultural Jihad Organization (in Farsi).
34. Seppelt, R., C.F. Dormann, F.V. Eppink, S. Lautenbach and S. Schmidt. 2011. A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, short comings and the road ahead. *Journal of Applied Ecology* 48(3): 630-636. https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01952.x

35. Shafizadeh, M. and M.A. Zare Chahoki. 2020. Modeling ecosystem production services (water production) in the Middle Taleghan watershed. *Ecohydrology Journal* 7(2): 411-419 (in Farsi).
36. Sharps, K., D. Masante, A. Thomas, B. Jackson, J. Redhead and L. May. 2017. Comparing strengths and weaknesses of three ecosystem services modelling tools in a diverse UK river catchment. *Science of The Total Environment* 584: 118-130. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.160
37. Sharzeie, G.H. and N. Mobarghaie. 2009. The estimated value of the absorption of carbon dioxide emissions by forest ecosystems (case study of forest Kheyrood Noshahr). *Journal of Environmental Sciences* 6(3):11-22 (in Farsi).
38. Tallis, H. 2011. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes. *Global and Planetary Change* 101: 119-128. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.12.014
39. Thellmann, K., R. Golbon, M. Cotter, G. Cadisch and F. Asch. 2019. Assessing Hydrological Ecosystem Services in a Rubber-Dominated Watershed under Scenarios of Land Use and Climate Change. *Forests* 10(2):176. DOI: 10.3390/f10020176
40. Terrado, M., V. Acuña, D. Ennaanay, H. Tallis and S. Sabater. 2014. Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean basin. *Ecological Indicators* 3(2): 199-209. DOI: 10.1016/j.ecolind.2013.01.016
41. Thornton, P.K. and M. Herrero. 2014. Climate change adaptation in mixed crop–livestock systems in developing countries. *Global Food Security* 3(2): 97-102. https://doi.org/ 10.1016/j.gfs.2014.02.002
42. Van Beukering, P.J.H., H.S.J. Cesar and M.A. Janssen. 2003. Economic valuation of the Leuser National Park on Summatra, Indonesia. *Ecological Economics* 44(1): 43-62. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00224-0
43. Willemen, L., P.H. Verburg, L. Hein and M.E.F. van Mensvoort. 2008. Spatial characterization of landscape functions. *Landscape and Urban Planning* 88(1):34- 43. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.08.004
44. Yeganeh, H., H. Azarnivand, I. Saleh, H. Arzani and H. Amirnejad. 2015. Estimation of economic value of the gas regulation function in rangeland ecosystems of Taham watershed basin. *Journal of Rangeland* 2(9): 106-119 (in Farsi).
45. Yin, G., X. Wang, X. Zhang, Y. Fu, F. Hao and Q. Hu. 2020. InVEST Model-Based Estimation of Water Yield in North China and Its Sensitivities to Climate Variables. *Water* 12(6): 1692. https://doi.org/10.3390/w12061692

Journal of Water and Soil Science
Vol. 28, No. 3, Fall 2024, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Modeling and Economic Estimation of Climate Change Damage on the Runoff Control Ecosystem Service in *Astragalus* Habitats of Central Zagros

M. J. Aghasi*, M. Tarkesh Esfahani, S. Soltani and S. A. R. Mousavi[1]

(Received: January 17-2024 ; Accepted: May 27-2024)

Abstract

Astragalus is the vegetation of many mountains of Iran's plateau and plays a major role in providing ecosystem services due to its pillow shape and deep rooting system, they facilitate the control and penetration of precipitation into the soil. The correlation of *Astragalus* ecosystems with arid and semi-arid climates has made them vulnerable to climate change. In this study, a runoff yield map based on the Budyco curve under current and future conditions of climate change (2050) was prepared using climate and temperature data from the Chelsea site (CanESM2 GCM) in TerrSet software and by using maps of sub-watersheds, annual precipitation, annual potential evapotranspiration, soil depth, plant accessible water and the current and future "Land Cover - Land Use" map, with a combination of field methods and species distribution models at the local scale of the Shur River watershed of Dehaghan (Central Zagros). Finally, the excess runoff damage produced due to climate change was estimated using the replacement cost method. The results indicated an increase in the annual runoff volume of the watershed from 70 million cubic meters to 105 million cubic meters under climate change conditions for the RCP26 scenario in 2050. Taking into account the cost of 10 million Rials for controlling 530 cubic meters of runoff through various watershed management projects, preventing the damages of excess runoff produced requires a credit amounting to 660 billion Rials based on the present value. This study proved the ability of TerrSet software to predict and produce an ecosystem service map of runoff yield under climate changes or land use changes and with the purpose of valuation on a local scale. Also, the above valuation can be the basis for planning and providing credit for the study and implementation of watershed management projects to deal with the threats of climate change.

Keywords: Climate change, Ecosystem services, Runoff control, *Astragalus* habitats, Central Zagros, Economic estimation.

1. Department of Range and Watershed Management. Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
*: Corresponding author, Email: agh949@yahoo.com