

## مدل سازی و برآورد اقتصادی خسارت تغییر اقلیم بر خدمت اکوسیستمی کنترل رواناب در گون زارهای زاگرس مرکزی

محمدجواد آقاسی<sup>\*</sup>، سید علیرضا موسوی، مصطفی ترکش اصفهانی و سعید سلطانی<sup>۱</sup>

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

### چکیده

گون پوشش گیاهی بسیاری از کوهستان‌های فلات ایران است و با توجه به شکل بالشتی و سیستم ریشه دوانی عمیق، کنترل و نفوذ بارش‌های جوی را به درون خاک تسهیل و نقش عمده‌ای در ارائه خدمات اکوسیستمی ایفا می‌کند. از طرفی همبستگی اکوسیستم‌های گون زار (*Astragalus habitats*) با اقلیم خشک و نیمه خشک، آن‌ها را در برابر تغییرات اقلیمی آسیب پذیر نموده است. در این مطالعه نقشه تولید رواناب بر پایه منحنی بادیکو تحت شرایط حال حاضر و آتی تغییر اقلیم (۲۰۵۰) با استفاده از داده‌های 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 قابل دسترس 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 دهقان (زاگرس مرکزی) تهیه و نهایتاً خسارت رواناب مازاد تولید شده 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 تولید شده، نیازمند اعتباری بالغ بر ۶۶۰ میلیارد ریال بر اساس ارزش حال است. این مطالعه قابلیت نرم‌افزار TerrSet جهت 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 جهت مطالعه و اجرای طرح‌های آبخیزداری با هدف مقابله با تهدیدات تغییر اقلیم باشد.

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

۱. گروه علوم مرتعی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان. اصفهان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: agh949@yahoo.com

## مقدمه

مراعات بیشترین سطح اراضی غیرریخ زده کره زمین را شکل می‌دهند (۳۴) و بزرگ‌ترین نوع کاربری زمین (Land use) یعنی تغذیه دام‌های نشخوارکننده را پشتیبانی می‌کنند و نقش قابل توجهی در ارائه خدمات اکوسیستمی (Ecosystem Services) 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 مراعات با تولید مواد آلی سبب نگهداری ساختار خاک و پایداری خاکدانه‌ها، افزایش نفوذپذیری و در نتیجه 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. به‌طور کلی، خدمات ذخیره آب در خاک ناشی از جوامع گیاهی، استفاده مؤثر از منابع آبی را افزایش می‌دهد و سبب کاهش خطر خشکسالی می‌شود (۲۱).

سطح قابل توجهی از مراعات ایران به ویژه در رشته کوه‌های زاگرس و البرز گون زار است. گون زار به مرانعی گفته می‌شود که پوشیده از گونه گون است. گروهی از گون‌ها که به گون‌های بالشتی (Cushion Astragalus) معروف هستند (۲۳) دارای جامعه پذیری شدید گیاهی هستند و نقش مهمی در تثبیت کربن و چرخه‌های بیوشیمیایی اکوسیستم دارند (۲۲). گون‌ها با قدرت سازگاری بالا، جوامع گیاهی بزرگی را تشکیل داده و نقش مهمی در ارائه انواع خدمات اکوسیستم، تثبیت و حفظ خاک، ترسیب کربن (Carbon sequestration) ایفا می‌کنند.

به علت وجود کرک‌های موجود در سطح برگ‌ها و سیستم ریشه ای عمیق گون‌های بالشتی، ظرفیت کنترل و نگهداری آب در آن‌ها بالا بوده، و به‌صورت اسفنج عمل کرده و با کنترل رواناب مانع بروز سیلاب می‌شوند (۲۴). همچنین با نفوذ دادن رواناب سطحی به خاک، نقش قابل توجهی بر تغذیه ذخایر آب

زیرزمینی، چشمه‌ها، قنات 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 به تدریج برای پایداری جریان رودخانه‌ها وارد آب‌های سطحی می‌شود.

کنترل رواناب از با ارزشترین خدمات تنظیمی غیربازاری یک اکوسیستم است (۴)، به خصوص در مناطقی که با کمبود آب روبرو هستند (۲۶). تغییر اقلیم ناشی از افزایش گازهای گلخانه ای من جمله CO<sub>2</sub> باعث افزایش تعداد بروز وقایع حاد آب و هوایی نظیر خشکسالی یا سیل می‌شود و یکی از عواملی است که می‌تواند میزان دسترسی بشر به آب را تحت تأثیر شدید قرار دهد (۱۰) و اثرات قابل ملاحظه ای نیز بر مراعات خواهد داشت (۴۴). ازاین رو پیش‌بینی میزان آسیب پذیری مراعات گون زار که حدود ۲۰ درصد از مراعات کشور (۱۷ میلیون هکتار) را شکل می‌دهند (۲۲) و ارزش گذاری اقتصادی خسارات مرتبط با خدمات حاصل از این اکوسیستم‌ها، در برابر تغییرات اقلیمی بسیار ضروری است.

یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای ارزیابی و ارزش گذاری کمی خدمات اکوسیستمی، تولید نقشه خدمات اکوسیستم (Mapping Ecosystem Services) است. نقشه خدمات اکوسیستم اطلاعات ارزشمندی از کیفیت اکوسیستم برای تصمیم گیرندگان فراهم می‌کند (۴۶). نقشه همچنین برای پیش‌بینی نیازهای جامعه به خدمات اکوسیستم تحت تغییرات کاربری زمین یا تغییرات اقلیمی استفاده می‌شود (۹). تحقیقات پیرامون تولید نقشه خدمات اکوسیستم در چند دهه گذشته توسعه یافته است (۳۷). مدل سازی و تولید نقشه برای بررسی توزیع مکانی خدمات اکوسیستم در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۳۱). 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 می گیرد (۲۵).

ایده تولید نقشه خدمات اکوسیستم اولین بار توسط کاستانزا مطرح شد (۵)، اما تقریباً ۶۰٪ از مطالعات پیرامون نقشه خدمات اکوسیستم پس از سال ۲۰۰۷ انجام شده است که از روش های مختلفی برای این کار استفاده شده است. در سال های اخیر، تولید نقشه خدمات اکوسیستم اهمیت زیادی داشته است. بخش عمده ای از تکنیک ها یا روش های ارزش گذاری کالاها و خدمات محیط زیستی در ایالات متحده و اروپا شکل گرفته و بسط یافته و مورد استفاده واقع شده است، لیکن تاکنون تلاش های اندکی برای ارزش گذاری اقتصادی اثرات تخریب محیط زیست در کشورهای در حال توسعه انجام شده است (۳۰).

فرایند ارزش گذاری (Valuation process) به عنوان ارزش گذاری سهم یک کالا یا خدمات برای دستیابی به یک هدف خاص تعریف می شود. 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 شده است معنادار می شود (۵). مبنای فلسفی ارزش گذاری، انسان است. بر این اساس، مؤلفه های طبیعت و خدمات اکوسیستم تا زمانی که برای انسان سودمند باشد، ارزشمند است (۱۸).

لازمه ارزش گذاری خدمات اکوسیستمی در درجه اول، برآورد کمی میزان هر یک از خدمات اکوسیستم با استفاده از شاخص های معین است. از این رو در این تحقیق، با توجه به اهمیت خدمت اکوسیستمی کنترل رواناب در مراتع گون زار 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 کمی سازی و برآورد شد، آنگاه به منظور برآورد میزان کاهش خدمت کنترل سیل اکوسیستم مرتعی گون زار تحت تغییر اقلیم، اختلاف میزان رواناب حال حاضر و آینده (۲۰۵۰) اندازه گیری و سپس ارزش گذاری 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 به منظور محاسبه خسارات مربوط به تغییرات خدمت اکوسیستمی کنترل رواناب، از مدل ساز خدمات اکوسیستم (Ecosystem service modeler)، زیر بخش Water Yield در نرم افزار TerrSet استفاده شد. مدل ساز Water Yield در واقع مبتنی بر مجموعه ابزار InVEST است. InVEST یکی از مهمترین مدل سازهای خدمات اکوسیستم است که به طور گسترده توسط محققان داخل و خارج کشور استفاده می شود.

درویشی و آصفی با استفاده از مدل InVEST خدمات اکوسیستم تولید آب را با هدف ارزیابی کمبود منابع آبی در محیط خشک کلان شهری در دشت قزوین برآورد و نقشه سازی کردند و نتیجه گرفتند که مدل تولید آب دانشی را برای بهبود مدیریت آب فراهم می کند و مناطق مستعد کم آبی در کلانشهر قزوین را برجسته می کند (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 جهت برآورد میزان تولید رواناب در سایر حوزه های آبخیز مختلف کشور نیز بکار رفته است. به عنوان مثال می توان به مطالعات احمدی میرقاند و سوری در حوزه آبخیز تراز استان خوزستان (۲)، شفیع زاده و زارع چاهوکی در حوزه آبخیز طالقان میانی در استان تهران (۳۸) و حقدادی و همکاران در حوزه آبخیز دلیچای در استان تهران (۱۳) اشاره کرد. لازم به ذکر است در تحقیق پیش رو پس از کمی کردن میزان تولید رواناب در شرایط حال حاضر و آینده، ارزش گذاری خسارت رواناب مازاد تولیدی در اثر تغییر اقلیم با روش هزینه جایگزین انجام شد. اهداف مد نظر از مطالعه کنونی عبارت بود از:

- ۱- مدل سازی و تهیه نقشه تولید رواناب برای حال حاضر و تحت شرایط تغییر اقلیم آتی (سال ۲۰۵۰)
- ۲- محاسبه اختلاف میزان تولید رواناب در شرایط حال حاضر و تغییر اقلیم آتی

مراعات ییلاقی درجه یک و عمدتاً به صورت گون زار است و از اواخر اردیبهشت تا پایان شهریور مورد چرای دام قرار می گیرد. درحوزه آبخیز مورد مطالعه ایستگاه سینوپتیک وجود ندارد و صرفاً یک ایستگاه کلیماتولوژی (همگین) با آمار بلند مدت بارش ولی فاقد آمادما، وجود دارد (جدول ۱). متوسط بارش سالانه منطقه طی دوره بلند مدت معادل ۲۱۵ میلی متر و متوسط تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه ۱۴۱۰ میلی متر است.

#### ب- معرفی نرم افزار TerrSet

TerrSet یک سیستم مکانی یکپارچه برای پایش و مدل سازی مکانی است که بیش از ۳۰۰ ماژول (Modul) را برای تجزیه و تحلیل و نمایش اطلاعات مکانی رقومی در یک بسته نرم افزاری واحد ارائه کرده است و شامل ابزارهایی برای آمایش سرزمین، مدل ساز خدمات اکوسیستم، تحلیل تغییرات اقلیمی، مدل ساز گونه ها، آمار مکانی و پردازش تصاویر می شود.

مدل ساز خدمات اکوسیستم، یک سیستم پشتیبان تصمیم گیری مکانی به منظور ارزیابی ارزش سرمایه طبیعی با اهداف توسعه پایدار است. این مدل ساز شامل ۱۵ مدل خدمات اکوسیستم است که مبتنی بر مجموعه ابزار InVEST است. InVEST یکی از مهمترین مدل سازهای خدمات اکوسیستم است که به طور گسترده توسط محققان استفاده می شود و هدف اصلی آن دستیابی به الگوی کلی از توزیع مکانی خدمات اکوسیستم و بررسی روند تغییرات آن ها با توجه به تغییر کاربری و پوشش زمین در شرایط زمانی متفاوت یا تحت تغییرات اقلیمی است. از مزایای این مدل می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- کمی سازی و تولید نقشه انواع خدمات اکوسیستم
- ۲- ارزش گذاری اقتصادی خدمات اکوسیستم
- ۳- پیش بینی تغییرات خدمات اکوسیستم در شرایط تغییر اقلیم یا شرایط مختلف مدیریت زمین (۴۱).

شارپز و همکاران نقاط قوت و ضعف سه روش مختلف مدل سازی خدمات اکوسیستم شامل InVEST, LUCI و ARIES را درحوزه آبخیزکانوی در انگلستان با وسعت ۵۸۰۰۰ هکتار مدل سازی و مقایسه کرد (۳۹) و نهایتاً

۳- بررسی کارایی نرم افزار TerrSet در تهیه نقشه تولید رواناب  
۴- ارزش گذاری میزان کاهش خدمت اکوسیستمی کنترل رواناب ناشی از تغییر اقلیم

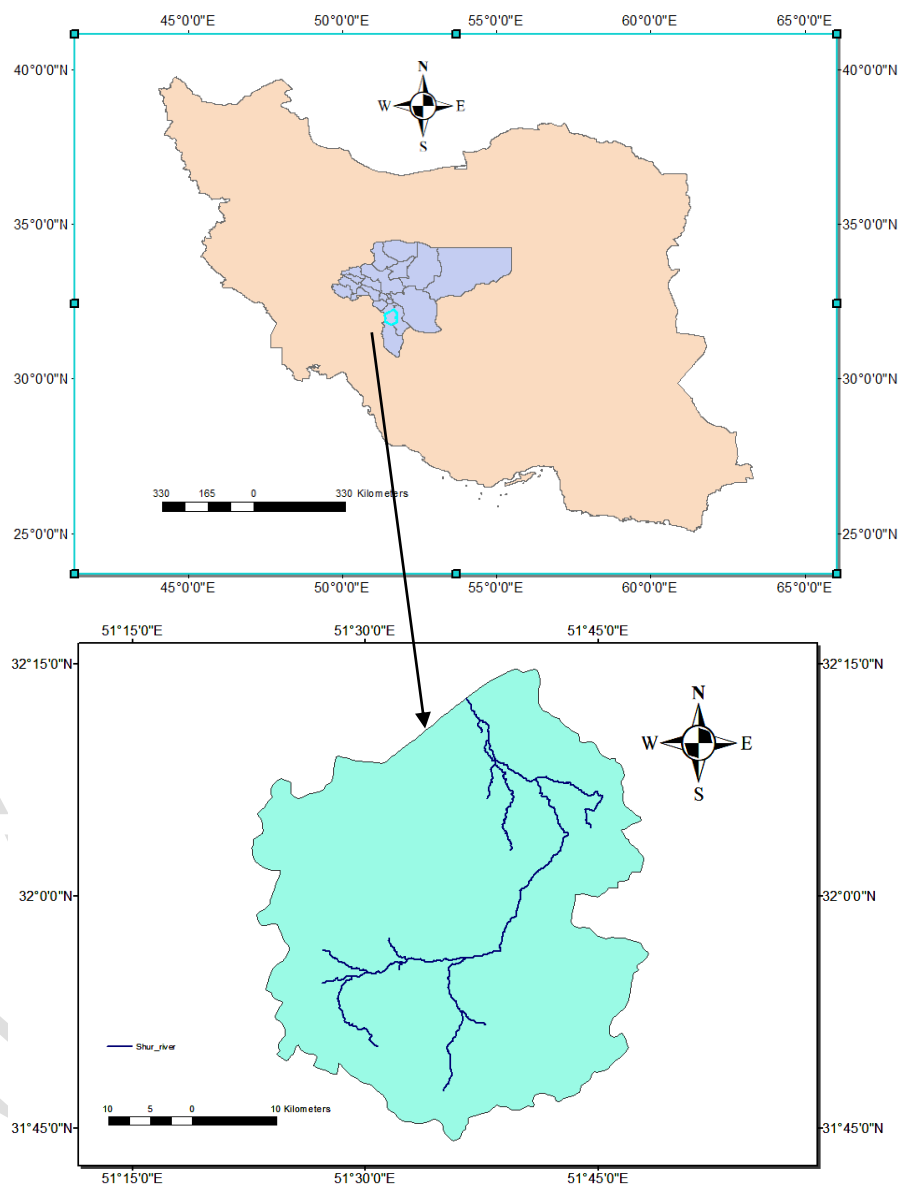
ذکر این نکته نیز ضروری است که مدل Water Yield محدودیت هایی نیز دارد، برای مثال مهمترین محدودیت مدل تولید آب این است که چرخه هیدرولوژیک آب را به طور کامل در نظر نمی گیرد و تغییرات فصلی بارش را مورد توجه قرار نمی دهد و بر اساس میانگین سالانه بارش کار می کند (۴۳). همچنین باید توجه داشت که این مدل، تبخیر از سطح خاک را در نظر نمی گیرد و برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی تنها تبخیر از سطح گیاهان را در نظر می گیرد.

#### مواد و روش تحقیق

##### الف- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز رودخانه شور در ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهر اصفهان در دامنه ارتفاعات زاگرس مرکزی و در مجاورت استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است. این منطقه با وسعتی بالغ بر ۱۵۰ هزار هکتار حد فاصل ۵۱ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۴۸ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. حداکثر ارتفاع از سطح دریا ۳۵۲۱ متر در ارتفاعات موسوم به دشتک و حداقل ارتفاع ۱۷۵۹ متر در نقطه خروجی حوزه است. حوزه آبخیز مورد مطالعه یکی از زیرحوزه های 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 نهایتاً پس از اتصال به حوزه های آبخیز مبارکه و فلاورجان، به زاینده رود منتهی می شود (شکل ۱).

بر اساس تقسیمات اقلیمی، حوزه به دو بخش شمالی-شرقی (خشک و سرد با متوسط بارندگی ۱۵۰ میلی متر)، و جنوبی-غربی (نیمه خشک سرد با متوسط بارندگی ۲۵۰ میلی متر) تقسیم می شود. قسمت های جنوبی و غربی که مراکز تولید رواناب کل حوزه محسوب می شوند،



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

جدول ۱. مشخصات ایستگاه های 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 بلند مدت بارش |
| لاریجه      | باران سنجی  | ۱۳۸۱-۱۳۹۰  | ۱۹۲۰         | ۵۱/۶۸۳           | ۳۲/۰۳         | آمار ناقص                    |
| قمیشلو      | باران سنجی  | ۱۳۸۱-۱۳۹۰  | ۲۱۲۰         | ۵۱/۴۶۶           | ۳۲/۰۵         | آمار ناقص                    |
| دهاقان      | باران سنجی  | ۱۳۷۵-۱۴۰۰  | ۲۰۵۰         | ۵۱/۶۵            | ۳۱/۹۳         | فقط دارای آمار بارش          |

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 داده‌ها یا نقشه‌های مختلفی است شامل : نقشه متوسط بارش سالانه، تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه، عمق خاک، آب قابل دسترس گیاه، "کاربری اراضی- پوشش گیاهی"، نقشه حوزه و زیرحوزه‌ها همگی در قالب رستر و همچنین جدول زیست فیزیکی با فرمت csv.

با استفاده از نرم‌افزار Arc-GIS و بر اساس مدل رقومی ارتفاع (DEM) (Digital Elevation Model) 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 زیر حوزه‌ها 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 ذیل به اختصار روش تولید هرکدام از آن‌ها توضیح داده شده است:

(۱) نقشه متوسط بارش سالانه.

با توجه به نبود داده‌های هواشناسی بلند مدت 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 جهت ارزیابی اقلیم در دوره آینده هستند. بر اساس نتایج سلیمی و همکاران مدل گردش عمومی CanESM2

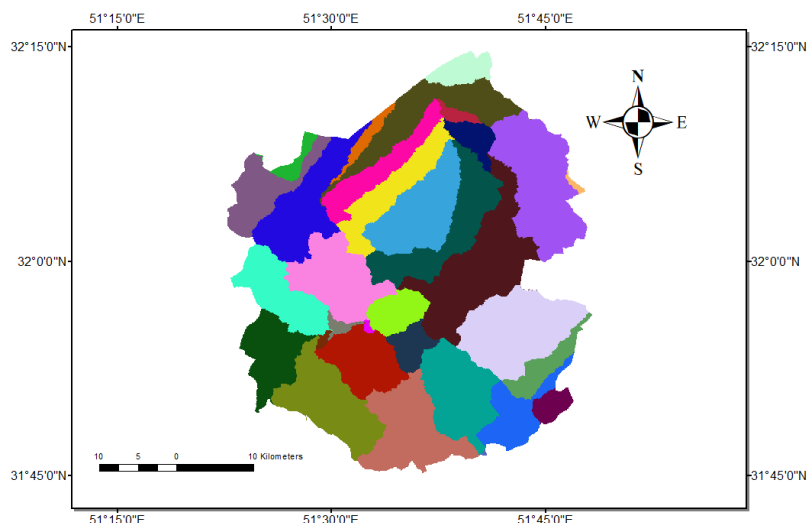
مزایای زیر را در مقایسه با دو مدل دیگر برای مدل InVEST برشمردند:

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 نهایتاً اینکه داده‌های پیش فرض اولیه برای آن موجود است.

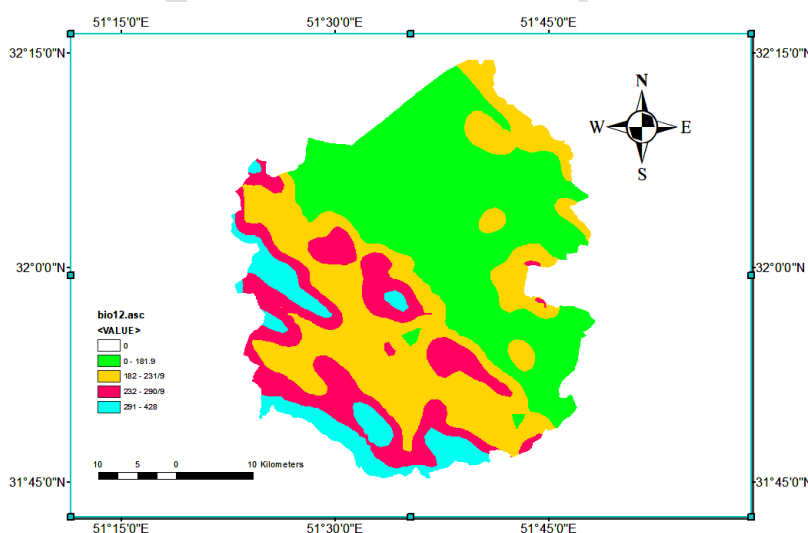
## ب ۱- مدل تولید رواناب (Water Yield model)

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 حاصل جمع 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 چشم انداز تخمین می‌زند و نشان می‌دهد چگونه تغییر در الگوی استفاده از زمین، میزان تولید رواناب و عملکرد آن در بخش‌های مختلف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌طور خلاصه می‌توان گفت مدل تولید رواناب بر پایه منحنی بادیکو، میزان رواناب تولیدی خروجی از حوزه را محاسبه و تخمین



شکل ۲. نقشه زیرحوزه های منطقه مطالعاتی



شکل ۳. نقشه بارش سالانه حال حاضر

که در محاسبات هیدرولوژی از دو جهت حائز اهمیت است. یکی محاسبه تلفات آب در حوزه های آبخیز و دیگری برآورد نیاز آبی در طرح هایی که آب مهار شده در سازه های هیدرولیک مورد استفاده قرار خواهد گرفت. محمدی و همکاران در تحقیق خود با استفاده از داده های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک شهرضا (که نزدیک ترین ایستگاه به منطقه مورد مطالعه در این تحقیق است) و ۵ ایستگاه سینوپتیک پراکنده در سایر نقاط استان اصفهان، جهت تعیین مناسب ترین روش تبخیر

کارایی بالایی جهت شبیه سازی پارامترهای بارندگی، دمای متوسط و سرعت باد در استان اصفهان دارد و می تواند به عنوان مدلی مناسب جهت پیش بینی اقلیم در دوره آینده در استان اصفهان مورد استفاده قرار گیرد (۳۵). از این رو 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 می نامند، یکی از پیچیده ترین فرایندها در چرخه هیدرولوژی است

مقدار آبی است که می‌تواند در پروفیل خاک ذخیره شود و برای استفاده گیاهان قابل دسترس است و در واقع اختلاف بین ظرفیت زراعی (Field capacity) و نقطه پژمردگی (Wilting point) است. برای محاسبه این پارامتر از اطلاعات پروفیل‌های حفر شده و داده‌های مربوط به بافت خاک (درصد شن، رس و سیلت) و همچنین اطلاعات موجود در مطالعات قبلی منطقه استفاده شد (شکل ۶).

۳) نقشه کنونی لندکاور-لندیوز (Land use \_land cover) یا نقشه پوشش اراضی-کاربری اراضی منطقه که با مدنظر قراردادن انواع مختلف پوشش و کاربری موجود در منطقه شامل مراتع گون زار، مراتع فاقد گون، اراضی زراعی، باغات، جنگل کاری و غیره و بر اساس بازدید میدانی و داده‌های در دسترس منطقه ای با کمک نرم‌افزارهای اتوکلد، آرک مپ و R تولید شد (شکل ۷).

۴) 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 ریشه دوانی و حضور یا عدم حضور پوشش گیاهی (مقدار ۰ و ۱) می‌شود. جدول بیوفیزیکی منعکس کننده ویژگی‌های هر LULC است.

۵) پارامتر هیدرو ژئولوژیکی (Z): یک عدد ثابت تجربی است که گویای الگوی بارش محلی، شدت بارش، تغییرات فصلی آب و هوا 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  $N \times 0.2$  محاسبه کرد که در آن N تعداد روزهای بارانی سالانه حوزه یا ایستگاه هواشناسی است.

**روش دوم:** استفاده از تخمین جهانی  $\omega$

**روش سوم:** تخمین زدن با استفاده از کالیبراسیون مدل با داده‌های واقعی رواناب.

و تعرق پتانسیل در سطح منطقه، اقدام به تحلیل نمودارهای مقایسه ای بین روش‌های تورنت وایت، بلانی کریدل و معادله لاری جانسون کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در استان اصفهان از بین روش‌های مذکور، روش بلانی کریدل نسبت به دیگر روش‌ها، بسیار نزدیک به تشت تبخیر (روش اندازه گیری مستقیم تبخیر و تعرق) بوده است به طوری که در ماه‌های مختلف سال همبستگی خوبی با تشت تبخیر را داشته است (۲۹). به همین منظور نقشه تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه (ETp) با استفاده از نقشه‌های متوسط دمای ماهانه سایت Chelsa (۱۲ ماه) و با کمک معادله (۲) محاسبه شد (شکل ۴):

$$ETp = [p(0.46T_{avg} + 8.1)](b) + a \quad (2)$$

P = ضریب روشنایی ماهانه که بر اساس جدول مخصوص و با توجه به عرض جغرافیایی ایستگاه هواشناسی و ماه مربوطه به دست می‌آید.

$T_{avg}$  = نقشه‌های ماهانه متوسط دما که با استفاده از داده‌های Chelsa تهیه شد.

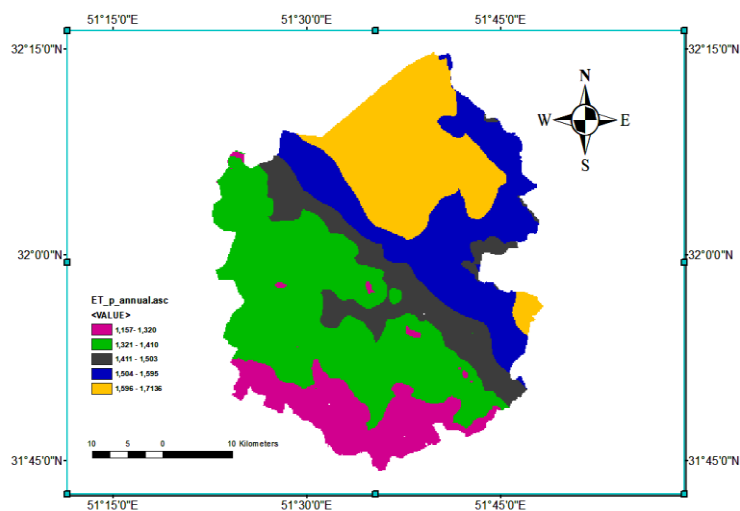
a و b ضرایب تبخیر و تعرق هستند که با توجه به مقادیر رطوبت نسبی (RHmin) و تعداد روز همراه، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (Uday)، حداکثر ساعات ممکن تابش (N) که از جدول به دست می‌آید و نیز ساعات آفتابی واقعی (n)، جداگانه برای هر ماه به وسیله معادله (۳) محاسبه شد:

$$\begin{aligned} a &= 0.0043 RH_{min} - (n/N) - 1.41 \\ b &= 0.82 - 0.0041 RH_{min} + 1.07(n/N) + 0.066(Uday) - 0.006 RH_{min} (n/N) - 0.0006(RH_{min})(Uday) \end{aligned} \quad (3)$$

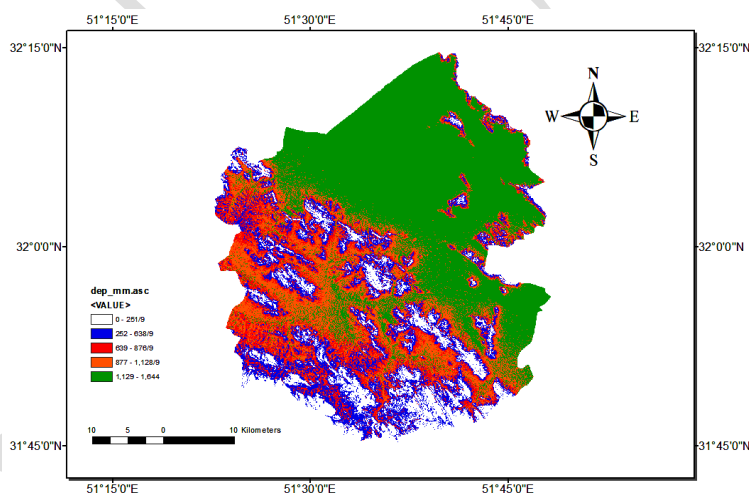
۱) نقشه عمق خاک با استفاده از داده‌های پروفیل خاک منطقه که بر اساس نقشه واحدهای اراضی خاک حفر شده بود، استفاده از نقشه DEM و نقشه‌های شیب و جهت و با کمک روش رگرسیون تولید شد (شکل ۵).

۲) نقشه میزان آب در دسترس گیاه با کمک نقشه بافت خاک و بر اساس اطلاعات پروفیل‌های حفر شده و استفاده از جدول شماره ۱۹ دستورالعمل فائو ارائه شده توسط آلن و همکاران (۳)، تهیه شد. منظور از آب قابل دسترس گیاه

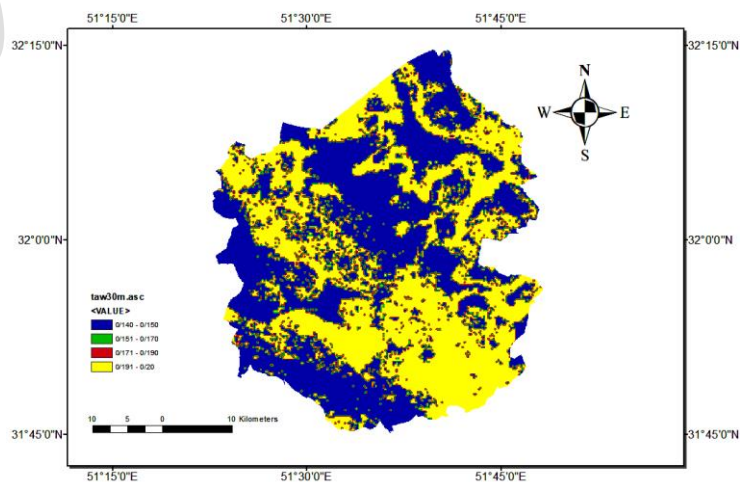




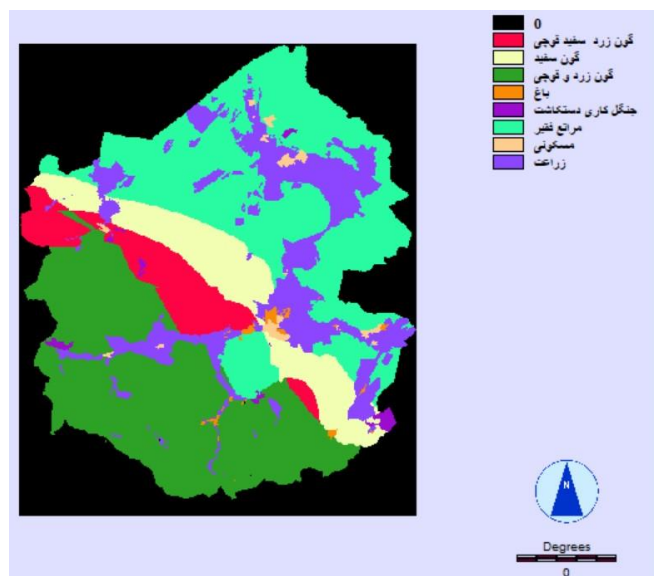
شکل ۴. نقشه تبخیر و تعرق پتانسیل



شکل ۵. نقشه عمق خاک (میلی متر)



شکل ۶. نقشه آب قابل دسترس



شکل ۷. نقشه کاربری اراضی و پوشش گیاهی حال حاضر

زمانی که هیچ بازار مشخص و آشکاری برای خدمات اکوسیستم وجود نداشته باشد، به ناچار از توانایی‌های غیرمستقیم برای ارزیابی ارزش خدمات اکوسیستم استفاده می‌شود. یکی از روش‌های ارزش‌گذاری غیرمستقیم، روش هزینه جایگزین (Replacement Cost) است (۱۹). 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، به وسیله روش هزینه جایگزین تعیین می‌شود. روش هزینه جایگزین، از جمله روش‌های مرتبط با برآورد ارزش خدمات اکوسیستم مبتنی بر هزینه‌های اقدامات پیشگیرانه به منظور جلوگیری از خسارت با توجه به خدمات از دست رفته، 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 به دست می‌دهند (۲۰).

در واقع فرض اساسی در روش هزینه جایگزین این است که ارزش کالا یا خدمات زیست محیطی از دست رفته، معادل

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:

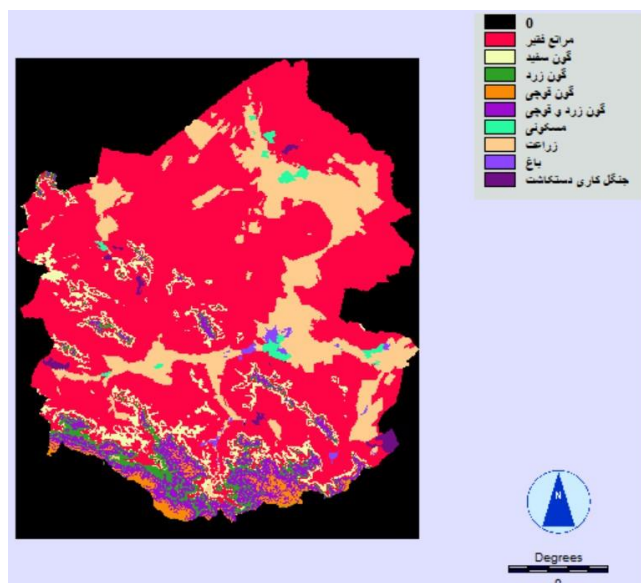
۱- نقشه لندکاور-لندپوز در شرایط تغییر اقلیم (سناریوی rcp26 سال ۲۰۵۰) که با استفاده از خروجی پیش‌بینی مدل‌های پراکنش گونه ای (Species Distribution Modelling) و با توجه به تغییرات سطح و پراکنش سه گونه گون زرد (*Astragalus verus*)، گون سفید (*Astragalus gossypinus*) و گون قوچی (*Astragalus compactus*) ساخته 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 Chelsea تهیه شد (شکل ۹).

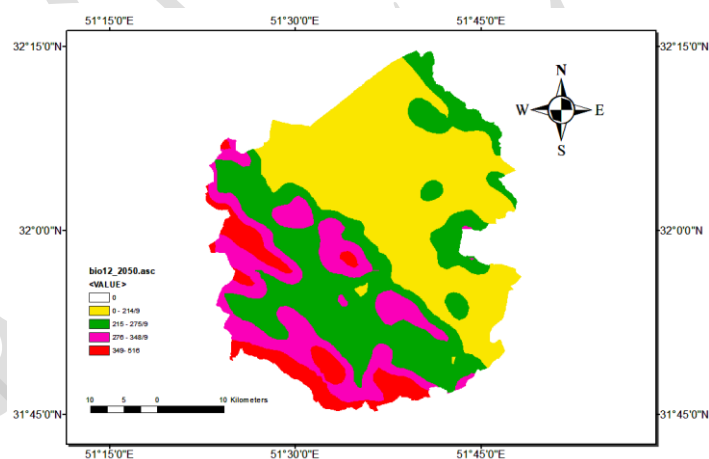
۳- نقشه تبخیر و تعرق سالانه در شرایط تغییر اقلیم (سناریوی rcp26 سال ۲۰۵۰) با استفاده از داده‌های Chelsea تهیه شد (شکل ۱۰).

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.

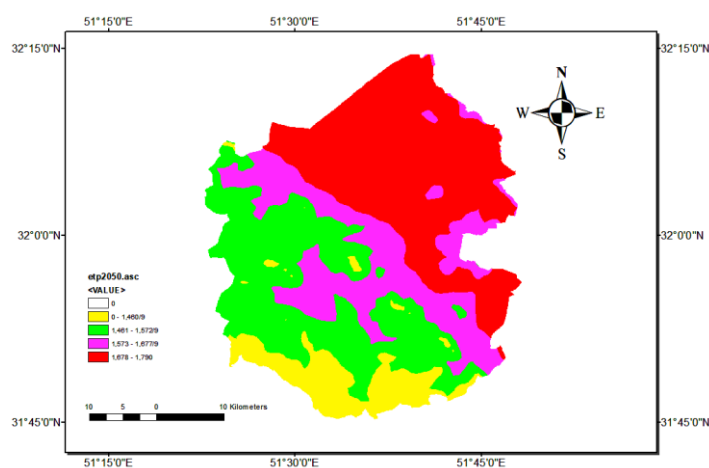
ج- ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستم با روش هزینه جایگزین



شکل ۸. نقشه کاربری اراضی و پوشش گیاهی سال ۲۰۵۰



شکل ۹. نقشه بارش سالانه (۲۰۵۰)



شکل ۱۰. نقشه تبخیر و تعرق سالانه (۲۰۵۰)

علت استفاده از این روش:

در روش هزینه جایگزین در قیاس با سایر روش‌های غیر مستقیم ارزش‌گذاری، احتمال خطا کمتر است و در نتیجه نتایج مطمئن‌تری به ما می‌دهد. مثلاً روش ترجیحات آشکار شده (بیان شده) که به اظهارات اشخاص پرسش‌شونده بستگی دارد دارای اریبی است و به خاطر بیگانه بودن افراد به این روش نوبابودن در ایران چندان قابل اتکا نیست (۴۷ و ۲۸) و یا روش انتقال منافع (Benefit transfer method) که نیاز به وجود داده‌ها و نتایج در مناطق مجاور نزدیک با شرایط اکولوژیک مشابه جهت تعمیم نتایج دارد که معمولاً این داده‌ها در ایران وجود ندارد (۲۷).

در این تحقیق به منظور ارزش‌گذاری خدمت تنظیمی کنترل رواناب با روش هزینه جایگزین، به جای محاسبه خسارات افزایش رواناب ناشی از تغییرات اقلیمی که در واقع ناشی از کاهش کارکرد تنظیمی اکوسیستم است، هزینه‌های لازم جهت 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 زاگرس برای شرایط حال حاضر (۲۰۱۳) و شرایط تغییر اقلیم آینده (۲۰۵۰)، به شرح ذیل است.

### الف- میزان تولید رواناب حال حاضر (۲۰۱۳)

مقادیر تولید رواناب در کل حوزه آبخیز رودخانه شور از حداقل صفر تا حداکثر ۳۲۷ میلی متر متغیر است (شکل ۱۱). مقادیر نشان‌دهنده میزان ارتفاع رواناب به ازای یک پیکسل ۳۰×۳۰ مترمربع و برحسب میلی متر است. با توجه به 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 داده شده است.

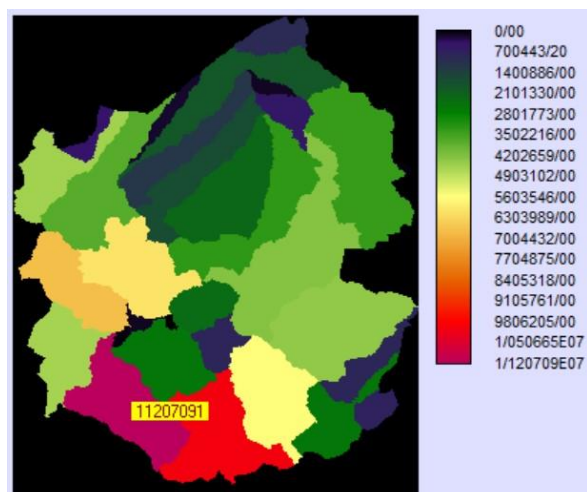
در شکل ۱۲ میزان تولید رواناب به ازای هر زیر حوزه جداگانه و برحسب میلی متر محاسبه نشان داده شده است. به این ترتیب

هزینه جایگزینی یا برگرداندن آن به حالت اولیه است. به عنوان مثال اگر پلی در اثر سیلاب تخریب شده باشد خسارت وارده معادل هزینه ساخت یا جایگزینی مجدد آن پل خواهد بود.

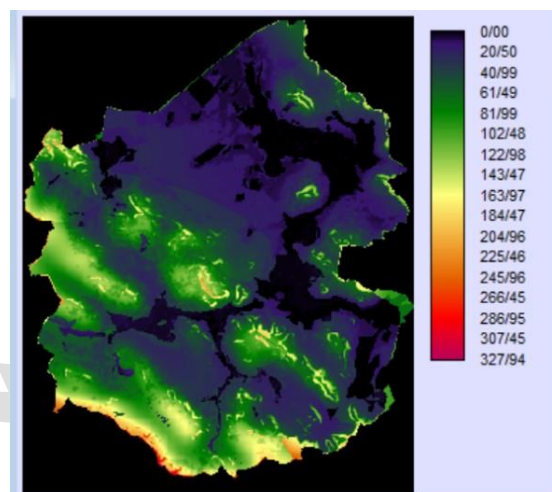
از روش هزینه جایگزین در مطالعات گذشته برای ارزش‌گذاری خدمت ترسیب‌کرن در مراتع (۱۲) و برآورد هزینه سالانه فرسایش خاک در ایران استفاده شده است (۱۱). همچنین مبرقعی و شارزه ای (۲۷)، به ارائه الگوی دیگر ارزش‌گذاری مکانی کارکرد جذب دی اکسید کربن در جنگل‌های خزری ایران با روش هزینه جایگزین پرداختند. مطالعات دیگری هم در خارج کشور در مورد ارزش‌گذاری اقتصادی اکوسیستم‌های مرتعی و جنگلی، با روش هزینه جایگزین صورت گرفته است (۴۵ و ۳۳). پاسکوال و همکاران (۲۰۱۰) به تفصیل به بحث و بررسی پیرامون روش هزینه جایگزین پرداخته اند (۳۲).

در خصوص ارزش‌گذاری اقتصادی خدمت تنظیمی کنترل رواناب و یا برآورد اقتصادی رواناب و خسارت آن در داخل کشور مطالعات اندکی صورت گرفته است، که به عنوان نمونه می‌توان به مطالعات موسوی و ارزانی در خصوص ارزش اقتصادی کارکرد تولید رواناب توسط اکوسیستم‌های مرتعی البرز مرکزی در منطقه طالقان اشاره کرد (۳۶). آن‌ها با تهیه نقشه رواناب به روش CN (شماره منحنی) تاثیر وجود یا حذف پوشش گیاهی در سطح تیپ‌های مرتعی را برآورد و نهایتاً 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 کمی کرده و ارزش اقتصادی آن را به ازای هر هکتار مرتع با کمک روش هزینه جایگزین معادل ۴۶ میلیون ریال برآورد کردند (۱۷). نتایج آن‌ها نشان داد که از بین ۴ خدمت اکوسیستمی، تولید رواناب بیشترین سهم ارزش‌گذاری (۴۶ درصد) را به خود اختصاص داد.



شکل ۱۲. نقشه تولید آب حال حاضر در سطح زیرحوزه  
(sub watershed level)



شکل ۱۱. نقشه تولید رواناب حال حاضر در مقیاس  
پیکسل (pixel level)

مقادیر رواناب دو زیرحوزه اصلی رودخانه شور (زیرحوزه‌های بودجان و همگین)، با نتایج مطالعات آبخیزداری (۱ و ۳۶) و برآوردهای به دست آمده از روش‌های تجربی به عنوان شاهد یا Control مقایسه شد (جدول ۲).

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

ب- میزان تولید رواناب تحت شرایط تغییر اقلیم آینده ( $۲۰۵۰$ ) در شکل ۱۳ و ۱۴ نقشه خروجی تولید رواناب تحت شرایط تغییر اقلیم آینده ( $۲۰۵۰$ ) به ترتیب در دو مقیاس پیکسل و زیرحوزه نشان داده شده است. مقادیر از حداقل صفر تا حداکثر  $۴۲۴$  میلی متر متغیر است (شکل ۱۳) و در مقایسه با شرایط حال حاضر (شکل ۱۱) 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  $۱۳۰۶۸۳۳۲۸$  میلی متر است. با ضرب مقدار فوق در عدد  $۰/۸۰۶$ ، متوسط میزان حجم تولید رواناب سالانه کل حوزه معادل مترمکعب ( $۱۰۵/۳۳۳$  میلیون مترمکعب) به دست آمد.

امکان مقایسه زیرحوزه‌ها از لحاظ تولید رواناب فراهم شد. با توجه به اینکه نتایج خروجی مدل Water Yield برحسب میلی متر و با ابعاد پیکسل  $۳۰ \times ۳۰$  متر است، بنابراین جهت محاسبه حجم تولید رواناب بر حسب مترمکعب، از معادله (۴) استفاده می‌کنیم:

= میزان ارتفاع تولید رواناب حوزه یا زیر حوزه (mm)  
 $\times$  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 (مثلاً زیرحوزه همگین) برحسب متر مکعب بر اساس معادله (۵) اقدام می‌کنیم:

متوسط میزان ارتفاع رواناب (mm)  $\times$  متوسط مساحت پیکسل‌ها  
حجم رواناب زیر حوزه همگین ( $m^3$ ) = زیرحوزه همگین  
 $= ۱۱۲۰۷۰۹۱(mm) \times ۰/۸۰۶$

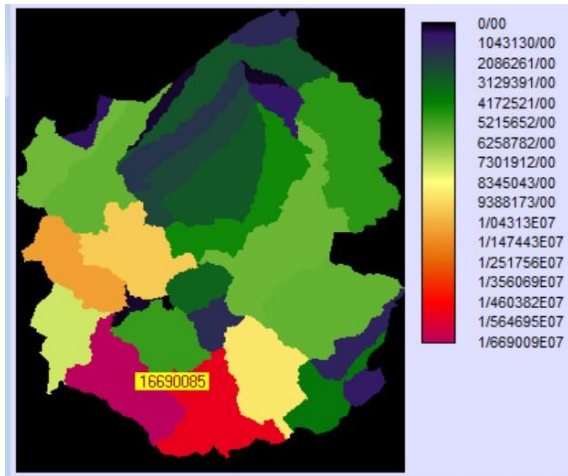
$۹۰۳۲۹۱۵m^3$  = حجم رواناب زیر حوزه همگین

(۵)

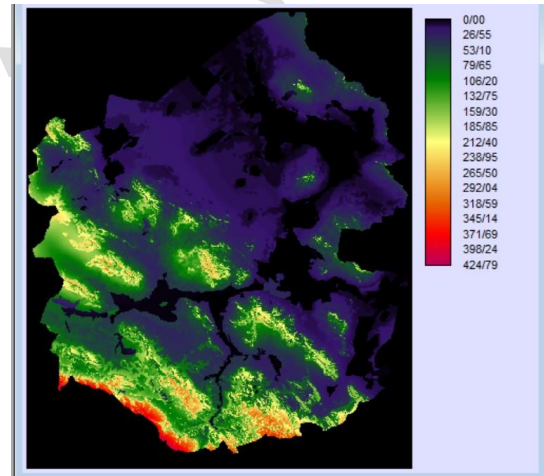
با توجه به نبود داده‌های واقعی رواناب در کل حوزه و عدم وجود ایستگاه‌های هیدرومتری و به منظور کالیبره کردن مدل،

جدول ۲. مقایسه نتایج خروجی مدل Water Yield با مدل‌های تجربی

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



شکل ۱۴. نقشه تولید رواناب در مقیاس زیرحوزه سال ۲۰۵۰



شکل ۱۳. نقشه تولید رواناب در مقیاس پیکسل، سال ۲۰۵۰

رواناب و کاهش خسارات ناشی از آن، به عنوان ارزش کاهش خدمت اکوسیستمی کنترل رواناب در حوزه آبخیز یا به تعبیر دیگر خسارت تغییر اقلیم مد نظر قرار گرفت.

در حال حاضر با توجه به نتایج تجربی و هزینه‌های واقعی اجرایی و بر اساس فهرست بهای آبخیزداری سال ۱۴۰۱، هزینه مدیریت و کنترل 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 تولید شده ناشی از تغییرات اقلیمی تا سال ۲۰۵۰، نیاز به اعتباری بالغ بر ۳۷۷,۳۵۸,۴۹۰ ریال بر اساس ارزش حال است که در این تحقیق به عنوان خسارت ناشی از تغییر اقلیم یا در واقع هزینه جایگزین به منظور کنترل رواناب اضافی تولید شده (هزینه کاهش کارکرد خدمت تنظیمی اکوسیستم) مد نظر قرار گرفت.

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

با توجه به 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 بلند مدت حوزه در شرایط معمولی است، می‌تواند منجر به خسارات قابل توجه در اراضی زیر دست 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 تحقیق هزینه‌های اجرای عملیات متنوع آبخیزداری به منظور کنترل

جدول ۳. تغییرات تولیدرواناب کل حوزه آبخیز رودخانه شور در سال ۲۰۵۰ نسبت به حال حاضر

| کل تولیدرواناب حال حاضر<br>(میلیون متر مکعب) | کل تولیدرواناب<br>(میلیون متر مکعب) سال ۲۰۵۰ | تغییرات<br>(میلیون متر مکعب) | درصد افزایش |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|-------------|
| ۷۰/۵۱                                        | ۱۰۵/۳۳                                       | ۳۴/۸۲                        | ۴۹ درصد     |

### بحث و نتیجه گیری

گرم شدن جهانی (Global warming) و تغییر اقلیم توام با تغییرات کاربری اراضی در حال حاضر یکی از مهمترین چالش های اساسی برای منابع طبیعی و مراتع در سطح جهانی و ملی است. مقابله با این تهدیدات نیازمند برنامه ریزی و تأمین اعتبار و پیش بینی سطح و میزان خسارات اقتصادی وارده به خدمات اکوسیستمی مراتع است. به منظور مدل سازی و تهیه نقشه تولید رواناب تحت شرایط تغییر اقلیم یا تحت شرایط مختلف مدیریتی و تغییرات کاربری اراضی، روش ها و مدل های متعددی وجود دارد که یکی از مهم ترین و پرکاربردترین این مدل ها InVEST است. نتایج حاصل از نقشه های تولید رواناب با مدل InVEST در شرایط تغییر اقلیم تا سال ۲۰۵۰ در حوزه آبخیز رودخانه شور حاکی از افزایش ۴۹ درصدی تولید رواناب در مقایسه با حال حاضر است (جدول ۳).

مقادیر افزایش تولید رواناب برای زیر حوزه های ۳۳ گانه، از حداقل ۱۹ درصد برای زیر حوزه شماره ۶۷ تا حداکثر ۱۰۶ درصد برای زیر حوزه شماره ۷۲ محاسبه شد (جدول ۴). تفاوت میزان افزایش رواناب در زیر حوزه های مختلف ناشی از پارامترهای مختلف نظیر وسعت زیر حوزه، درصد شیب، خصوصیات فیزیوگرافی زیر حوزه، کاربری اراضی و غیره است. به طور میانگین افزایش رواناب برای ۳۳ زیر حوزه برابر ۵۰ درصد است.

کارایی مدل InVEST در نقاط مختلف دنیا و نیز کشور ایران به اثبات رسیده است. به عنوان مثال تلمن و همکاران با بکارگیری مدل InVEST خدمات هیدرواکولوژیک اکوسیستم در یک حوزه آبخیز با پوشش غالب کائوچو در چین را مدل سازی کردند و نشان دادند که تغییرات اقلیمی توام با جنگل زدایی و تبدیل گسترده اراضی به کاشت درختان کائوچو اثرات قابل توجهی بر

تولید رواناب و تولید رسوب داشته و پیش بینی کردند میزان تولید رواناب تا سال ۲۰۷۰ افزایش خواهد یافت (۴۲). همچنین مدل InVEST در مقیاس های مختلف مکانی از حوزه آبخیزی با مساحت ۱۰۰۰ هکتار تا منطقه ای به وسعت کشور ایران در نقاط مختلف دنیا به کار رفته و نتایج قابل قبولی داشته است. به عنوان مثال یین و همکاران در منطقه ای با مساحت ۱۵۳ میلیون هکتار در شمال چین، تولید رواناب و حساسیت آن نسبت به پارامترهای اقلیمی را با InVEST مدل سازی کردند (۴۸) و نتیجه گرفتند تغییر اقلیم می تواند منجر به افزایش تولید رواناب در گراسلندها و جنگل های مناطق مرطوب شمال چین شود، ضمناً اعلام کردند که مدل InVEST در مقایسه با مدل های پیچیده تر نظیر SWAT به مراتب کاربردی تر است و نیازی به داده های روزانه ندارد چرا که با داده های متوسط بلند مدت نظیر تبخیر و تعرق و بارش کار می کند و نتایج خوب و مطمئنی می دهد آن هم برای یک منطقه وسیع با گرادیان اقلیمی زیاد. در مقایسه با مدل های دیگر، محاسبات مدل InVEST بر اساس منحنی بادیکو و بارش سالانه است و با نیازهای داده ای نسبتاً کم اجرا می شود. همچنین ابزار مؤثری برای تخمین یک خدمت اکوسیستمی، مانند تولید رواناب، با دقت مکانی بالا و در مقیاس های مختلف ارائه می کند (۱۱ و ۲۷). شفیع زاده و زارع چاهوکی نیز در مدل سازی خدمت اکوسیستمی تولید رواناب در حوزه آبخیز طالقان میانی، به این نکته اشاره کرده اند که مدل InVEST توابع خدمات اکوسیستمی را در قالب نقشه ها یی با سطح داده های ورودی کم تجسم می کند، اما حجم داده های خروجی بالایی دارد و به ساده سازی مسائل پیچیده و در نتیجه، افزایش توانایی حل مسئله می پردازد (۳۸).



جدول ۴. درصد افزایش رواناب تولیدی زیرحوزه‌های مختلف رودخانه شور در سال ۲۰۵۰ درمقایسه با حال حاضر

| کد زیرحوزه | درصدافزایش رواناب | کد زیرحوزه | درصدافزایش رواناب |
|------------|-------------------|------------|-------------------|
| ۶۳         | ۶۱/۱۶             | ۴۱         | ۳۹/۲۳             |
| ۶۶         | ۳۹/۶۵             | ۴۲         | ۴۸/۰۸             |
| ۷۳         | ۶۳/۸۴             | ۴۳         | ۴۲/۱۷             |
| ۷۰         | ۸۶/۹۳             | ۴۴         | ۵۱/۶۵             |
| ۵۷         | ۲۶/۲۱             | ۴۰         | ۵۸/۷۱             |
| ۶۸         | ۷۰/۶۶             | ۵۱         | ۴۳/۲۱             |
| ۶۹         | ۱۰۳/۵۳            | ۴۵         | ۳۷/۲۵             |
| ۷۱         | ۹۷/۴۷             | ۴۷         | ۴۷/۵              |
| ۷۲         | ۱۰۶/۵۷            | ۳۷         | ۵۵/۰۶             |
| ۷۴         | ۴۸/۹۲             | ۳۲         | ۳۴/۸۵             |
| ۷۸         | ۵۸/۳۷             | ۳۳         | ۳۰/۷۴             |
| ۶۵         | ۴۷/۸۵             | ۴۸         | ۲۹/۶۲             |
| ۷۷         | ۵۱/۸۶             | ۴۹         | ۳۲/۸۸             |
| ۶۷         | ۱۹/۵۸             | ۵۳         | ۳۳/۲۴             |
| ۸۳         | ۲۹/۵۹             | ۵۲         | ۳۸/۷۹             |
| ۸۴         | ۲۸/۱۵             | ۶۴         | ۵۹/۶۹             |
|            |                   | ۵۶         | ۳۰/۱۹             |

درویشی و آصفی در حوزه آبخیز دشت قزوین با وسعتی بالغ بر ۸۷۷۰۵۰ هکتار (۶) اشاره کرد.

در این تحقیق نیز موفقیت آمیز بودن استفاده از مدل InVEST جهت 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 صورت گرفته در داخل کشور نیز با یافته‌های این تحقیق هم راستا است. حقدادی و همکاران (۱۳) در بررسی خدمت اکوسیستم تولید آب با استفاده از

در مقیاس محلی یا منطقه ای، مدل InVEST برای بررسی الگوهای کلی و تغییرات در خدمات اکوسیستم ناشی از تغییرات کاربری زمین یا تغییرات اقلیمی در مطالعات زیادی به کار گرفته شده و با ویژگی‌های مختلف جغرافیایی و اقلیمی عملکرد خوبی داشته است (۲۶). در داخل کشور نیز می‌توان به مطالعات حقدادی و همکاران در حوزه آبخیز دلیچای استان تهران با وسعتی بالغ بر ۳۴۰۰۰ 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 (۱۷) و



مساحت کاربری های کشاورزی، مراتع و ساخته شده ها افزایش یابد. ضمناً ویژگی های ساختاری سیمای سرزمین و الگوی کاربری اراضی حاکم بر منطقه می تواند تعیین کننده تولید رواناب باشد. بر اساس نتایج آن ها کل حجم رواناب تولیدی در منطقه برای سال های ۱۹۹۰، ۲۰۲۰ و ۲۰۵۰ به ترتیب ۲۴/۸، ۲۶/۵ و ۲۸/۳ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد که روندی افزایشی را نشان می دهد (۲).

ذکر این نکته نیز ضروری است که خروجی مدل InVEST باید بر اساس داده های رواناب واقعی کالیبره شود. دکسی و همکاران تولید رواناب حوزه آبخیز رودخانه زالا مجارستان با مساحت ۱۵۲۱۰۰ هکتار را با کمک InVEST مدل سازی کردند و نتیجه گرفتند در صورت وجود آمار واقعی از رواناب خروجی حوزه و با کالیبراسیون پارامتر Z می توان به نتایج دقیق و نزدیک به واقعیت دست یافت (۷). در مطالعه کنونی با توجه به نبود مشاهدات ثبت شده در خصوص رواناب در هیچ یک از زیر حوزه های مطالعه شده، این امکان وجود نداشت و نتایج به دست آمده از مدل، با خروجی مدل های تجربی برآورد شده در مطالعات آبخیزداری مقایسه شد (۳۶ و ۳۷). در صورت وجود داده های واقعی و بلند مدت از رواناب حوزه یا زیرحوزه ها، نتایج تولید رواناب با داده های واقعی اصلاح و دقت مدل سازی به مراتب افزایش خواهد یافت. از دیگر موارد عدم قطعیت مدل InVEST نبود داده های بلند مدت واقعی از دما و بارش در این حوزه و بسیاری از حوزه های آبخیز کشور است که خود ناشی از عدم وجود ایستگاه های هواشناسی است. در چینی شرایطی استفاده از داده های اقلیمی جهانی نظیر Chelsa اجتناب ناپذیر خواهد بود.

### جمع بندی

نتایج این تحقیق نشان داد که مدل تولید آب می تواند میزان تولید رواناب را با دقت خوب پیش بینی کند. همچنین استفاده از روش ارزش گذاری غیر مستقیم هزینه جایگزین به منظور برآورد اقتصادی خسارات تغییر اقلیم به عنوان یک روش مطمئن و سریع مورد

نرم افزار InVEST نتیجه گرفتند که مدل InVEST با وجود اینکه از اطلاعات نسبتاً کم و قابل دسترسی استفاده می کند، کارایی بالایی دارد و به وسیله آن می توان خدمات اکوسیستم را نقشه سازی کرد و در تصمیمات مدیریتی از آن استفاده کرد. آن ها نتیجه گرفتند که عوامل فیزیوگرافی و اقلیمی تأثیر فراوانی بر میزان تولید رواناب در سطح حوزه آبخیز دارند که می توان از بین این عوامل ارتفاع و بارش را تأثیرگذارترین آن ها 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 شبیه سازی وجود دارد، اما نتایج آن، مبنایی برای تصمیم گیری به عنوان بخشی از مدیریت علمی منابع آب را فراهم می کند. همچنین مدل InVEST در مقیاس مکانی برای پیش بینی تهدیدات طبیعی مانند سیل در مناطق خشک مفید است (۶).

همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که مدل InVEST می تواند برآیند تغییرات کاربری اراضی توأم با تغییرات اقلیمی را به طور همزمان مدل سازی و به کمیت تبدیل کند. پیش بینی مقادیر رواناب در حال حاضر یا تحت شرایط تغییر اقلیم می تواند مبنای ارزش گذاری و برآورد خسارات یا احیاناً منافع حاصل از تغییر اقلیم قرار گیرد و به مدیران منابع طبیعی یا سیاستمداران در این خصوص کمک کند. ضمناً مشخص شد که افزایش میزان رواناب ناشی از تغییر اقلیم و نتیجتاً کاهش کارکرد تنظیمی اکوسیستم با توجه به روند گرم شدن جهانی کره زمین، امری اجتناب ناپذیر 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 آن ها نشان داد در ۳۰ سال گذشته مساحت جنگل ها و مراتع در منطقه مطالعاتی به ترتیب حدود ۳۱۹۹ و ۱۶۱۱ هکتار کاهش و مساحت اراضی کشاورزی و ساخته شده ها به ترتیب ۴۳۸۸ و ۳۸۷ هکتار افزایش یافته و پیش بینی کردند در ۳۰ سال آینده نیز ۲۴۴۲ هکتار از مساحت جنگل های منطقه کاسته شود و

حوزه‌های آبخیز استان اصفهان با شرایط مشابه به خصوص در مراتع و گون زارهای جنوب و غرب استان که از لحاظ پوشش گیاهی و پارامترهای اقلیمی دارای وضعیت مشابهی هستند، توصیه می‌شود.

همچنین با توجه به آسیب پذیری اکوسیستم‌های گون زار در برابر تغییرات اقلیمی و احتمال کاهش سطح رویشگاه‌های گون و متعاقباً تشدید شرایط خشکسالی به علت از دست رفتن این رویشگاه‌ها که عمدتاً در نقاط مرتفع و کوهستانی و مناطق تولید کننده رواناب قرار گرفته اند و با توجه به 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. ضمناً از هرگونه تخریب و دستکاری یا صدور مجوزهای بهره‌برداری نظیر معادن در این اکوسیستم‌ها باید شدیداً اجتناب کرد.

استفاده قرارگرفت. روند گرم شدن جهانی هوا و لزوم آمادگی و مقابله با تهدیدات آب و هوایی و از جمله سیل، نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و داده‌های کمی در خصوص رواناب جهت برآورد اقتصادی هزینه‌های پیشگیری است. مطالعه و اجرای طرح‌های آبخیزداری در حوزه‌های آبخیز از جمله بهترین و مفیدترین گزینه‌ها به منظور کاستن از خطرات تغییر اقلیم و سیلاب و تبدیل تهدیدها به فرصت است. با اجرای طرح‌های آبخیزداری ضمن کاهش میزان رواناب، با افزایش نفوذ آب به درون خاک شدت خطرات تغییر اقلیم و سیل به حداقل می‌رسد و تغذیه آبخوان‌ها و قنوات و چشمه‌ها به خوبی صورت می‌گیرد. با توجه به نتایج خوب مدل تولید آب در این حوزه و از آنجا که برای ارزش‌گذاری خدمت اکوسیستم کنترل رواناب نیاز به برآورد کمی تولید رواناب حوزه در شرایط حال حاضر و آینده است، بنابراین استفاده از مدل تولید رواناب برای سایر

### 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.
2. Ahmadi Mirghaeda, F. and Sour, B. 2023. The Impact of Land Use Change on Water Yield in the Teraz Watershed, Khuzestan Province, Southwestern Iran. Journal of Geography and Environmental Hazards. Vol.12, No.2, Summer 2023, pp.29-46. DOI: 10.22067/GEOEH.2022.77944.1261
3. Allen, G., Pereira, L. S., Katholieke, Dirk R., Smith, M. 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements).
4. Brisbane Declaration. 2007. *Environmental flows are essential for freshwater ecosystem health and human well-being*. 10th International River Symposium, Brisbane, Australia, 3-6 September.
5. Costanza, R. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. J. Nature. volume 387, pages 253-260.
6. Darvishi, A. and Yousefi, M. 2022. Using water yield ecosystem services to assess water scarcity in a metropolitan arid environment in Qazvin region (Iran). <https://www.researchgate.net/publication/361925016>
7. Decsi, B., Vári, Á. and Kozma, Z. 2020. The effect of future land use changes on hydrologic ecosystem services: a case study from the Zala catchment, Hungary. *Biologia Futura*.
8. Dominati, E., Patterson, M. and Mackay, A. 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69: 1858-1868.
9. Daily, G.C., Goldstein, J., Kareiva, P.M., Lonsdorf, E., Naidoo, R., Ricketts, T.H. and Shaw, M.R. 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Front. Ecol. Environ*, 7 (1): 4-11.
10. Falloon, P. and Betts, R. 2010. Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation—the importance of an integrated approach. *Sci Total Environ*, 408.
11. Ghorbani M, Hoseini S. Replacement cost method to estimate the annual cost of soil water erosion, agricultural research. *Agricultural Research. Water, soil and plants in agriculture*; 2007; 7(3).
12. Ghoreyshi, R., Motamedi, J. and Sheidai Karkaj, E. 2013. Estimating Economic Value of Carbon Sequestration Services in Rangelands with Replacement Cost Method (Case Study: Khoy Dizaj Batchy Rangeland). *Journal of Environmental Science*, year 12, no. 2, summer 2014, pp: 55-64.

13. Haqdadi, M. ; Heshmati, G. ; Azimi, M.S. 2017. Investigating water production ecosystem service using InVEST software. (Case study: Delichai watershed). Journal of Water and Soil Protection Research, Volume 25, Number 4.
14. Hewlett, J.D. and Hibbert, A.R. 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: Sopper, W.E., Lull, H.W. (Eds.), Forest Hydrology. Pergamon Press, New York, pp. 275-290.
15. Herrero, M., Wirsenius, S., Henderson, B., Rigolot, C., Thornton, P., Havlik ,.Pandde Boer, I . .2013. Livestock and the environment: What have we learned in the last decade? Annual Review of Environment and Resources, 202-177 ,40
16. IPCC, 2014. *Climate change 2014: synthesis report*. In: Pachauri, R., Meyer, L. (Eds.), Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland (ISBN: 978-92-9169-143-2).
17. Jafarzadeh, A.A., Mahdavi, A., Fallah Shamsi, S.R. and Yousefpour, R. 2020. Economic evaluation of some of the most important ecosystem services in Zagros forests. Journal of Environment Sciences. Volume 18, Issue 1, April 2020. Pages 137-150.
18. Karimzadegan, H., Rahmatian, M. , Dehghani Salmasi, M. , Jalali, R. , and Shahkarami, A. 2007. Valuing Forests and Rangelands Ecosystem Services. Int. J. Environ. Res., 1(4): 368-377, Autumn 2007.
19. Karimzadegan, H. 2011. Approaches to estimate damages of forests and rangelands in legal disputes. Journal of Biological Sciences, Lahijan Unit. fifth year Number four. Winter 2012. Volume II. 179-183 .
20. King N A. Economic valuation of environmental goods and services in the context of good ecosystem governance; 2007; 51-67.
21. Liu, S., Wen, Y. and Wang, B. 1996. Ecohydrological Functions of Forest Ecosystems in China. China Forestry Publishing House. Beijing in Chinese.
22. Maassoumi, A. A. 2000. The Genus Astragalus in Iran, vol.4 , Research Institute of Forests and Rangeland, Tehran, Iran.
23. Maassoumi, A. A. 2005. The Genus Astragalus in Iran, vol.5:1-786. Research Institute of Forests and Rangeland, Tehran, Iran.
24. Maassoumi, A.A. 2015. The role of forests in ecosystem balance. Iranian nature magazine. The first year, number 1. 47-41.
25. Maes, J., Egoh, B., Willemsen, L., Liqueste, C., Vihervaara, P., Schagner, J.Ph., Grizzetti, B., Drakou, E.G., La Notte, A., Zulian, G., Bouraoui, F., Paracchini, M.L., Braat, L. and Bidoglio, G. 2012. Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. Ecosystem Services, 1: 31-39.
26. Meijer, K.S., Krogt, W.N.M. and Beek, E. 2012. A new approach to incorporating environmental flow requirements in water allocation modeling. Water Resour Manage, 26: 1271-86.
27. Mobarghei, N., 2008. Application of the valuation of ecosystem services forests provide a location using GIS (Case Study: Forests Kheiroudkenar Noshahr). Resale for the degree of PhD, Faculty of Environmental Science, University of Tehran. (In Persian)
28. Mobarghaie N, Sharzeie G h. 2009. The estimated value of the absorption of carbon dioxide emissions by forest ecosystems (case study of forest Kheyrood Noshahr). Journal of Environmental Sciences; 2009; 6(3).
29. Mohammadi, H. ; Hanafi, A. and Soltani, M. 2019. Estimating the rate of potential evaporation and transpiration in the stations of Isfahan province. Geographical Perspective Magazine (scientific-research), fifth year, number 12, 153-167.
30. Mousavi, A. and Arzani, 2013. Estimating the economic value of the function of water regulation by alborz central pasture ecosystems. Journal of Ecohydrology. Volume 1, number 1.
31. Nelson et al. 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. Front Ecol Environ, 7(1): 4-11.
32. Pascual, U., Muradian., R. , Brander., L. , Gómez-Baggethun., E. , Martin-López., B. , Verma, M. and Farley, J. 2010. The economics of valuing ecosystem services and biodiversity. TEEB-Ecological and Economic Foundation.
33. Pearce D, Pearce C, Palmer C. Valuing the environment in developing countries: case studies, Cheltenham, Edward Elgar; 2002.
34. Reid, R. S., Galvin, K. A., & Kruska, R. S. 2008. Global significance of extensive grazing lands and pastoral societies: An introduction. In K. A. Galvin, R. S. Reid, R. H. Behnke, & N. T. Hobbs (Eds.), Fragmentation in semi-arid and arid landscapes: Consequences for human and natural systems (pp. 1-24). Dordrecht, The Netherlands: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4906-4
35. Salimi, A. , Tayyebbeh Mesbahzadeh, T. , Malekian, A. and Mirakbari, M. 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, Summer 2022, 2(2), 1-15 , doi: 10.22034/IWM.2022.554926.1033.

36. Sepahan Consulting Company. 2003. Flood control studies in the watershed area of Hamgin. Watershed management of Isfahan Province Agricultural Jihad Organization.
37. Seppelt, R., Dormann, C.F., Eppink, F.V., Lautenbach, S. and Schmidt, S. 2011. A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, short comings and the road ahead. *Journal of Applied Ecology*, 48: 630-636.
38. Shafizadeh, M. ; Zare Chahoki, M. A. 2020. Modeling ecosystem production services (water production) in the Middle Taleghan watershed. *Ecohydrology Journal*, Volume 7, Number 2, Summer 2019, p. 419.
39. Sharps, K., Masante, D., Thomas, A., Jackson, B., Redhead, J., May, L. 2017. Comparing strengths and weaknesses of three ecosystem services modelling tools in a diverse UK river catchment. *Science of The Total Environment*.
40. Shin, E. 1997. Valuating the Economic Impacts of Urban Environmental Problems: Asian Cities; USA Washington, DC, UNDP/UNCHS/The World Bank-Ump.
41. Tallis, H. 2011. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes. *J. Global and Planetary Change*. Volume 101, February 2013, Pages 119-128.
42. Thellmann, K., Golbon, R., Cotter, M., Cadisch, G. and Asch, F. 2019. Assessing Hydrological Ecosystem Services in a Rubber-Dominated Watershed under Scenarios of Land Use and Climate Change. *J. Forests*.
43. Terrado, M., Acuña, V., Ennaanay, D., Tallis, H., and Sabater, S. 2014. Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean basin. *Ecological Indicators*, 37: 199-209.
44. Thornton, P. K. and Herrero, M. 2014. Climate change adaptation in mixed crop-livestock systems in developing countries. *Global Food Security*, 3, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.02.002>.
45. Van Beukering P J H, Cesar H S J, Janssen M A. Economic valuation of the Leuser National Park on Sumatra, Indonesia. *Ecological Economics*; 2003; 44: 43-62.
46. Willemen, L., Verburg, P.H., Hein, L. and van Mensvoort, M.E.F. 2008. Spatial characterization of landscape functions. *Landscape and Urban Planning*, 88(1):34- 43.
47. Yeganeh H., Azarnivand., H., Saleh., I., Arzani, H. and Amirnejad, H. 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 Persian)
48. Yin, G., Wang, X., Zhang, X., Fu, Y., Hao, F. and Hu, Q. 2020. InVEST Model-Based Estimation of Water Yield in North China and Its Sensitivities to Climate Variables. *J. Waters*.