



## Calibration and Economic Evaluation of the Water Yield Ecosystem Services in Basins by the Eastern Border of the Country

Sh. Joorabian Shooshtari<sup>1</sup>, F. Jahanishakib<sup>2\*</sup>, and  
T. Ardakani<sup>3</sup>

## واسنجی و ارزش گذاری اقتصادی خدمت بوم سازگان آبدهی در حوضه های آبخیز مرز شرقی کشور

شریف جورابیان شوشتاری<sup>۱</sup>، فاطمه جهانی شکیب<sup>۲\*</sup>  
و طاهره اردکانی<sup>۳</sup>

### Abstract

Water yield is a key indicator of the performance and valuable service of the ecosystem that directly affects the sustainable development of the economy, human well-being, and ecosystems of a basin. Using the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs model (InVEST), water yield changes were simulated in 10 basins by the eastern border in South Khorasan province under the influence of land use/land cover changes. The model was calibrated using the long-term data of flow at Efin, Khonik Olia, Mansourabad, Gezik, and Ahangaran stations. Also, the economic value of water yield service was calculated in each of the different land uses/land covers. The results showed the highest and the lowest volume of produced water respectively in Esfadan basin with 8,126,129 cubic meters and in Namakzar-Khaf Basin with 185,590 cubic meters. The amount of water yield in the whole studied area was 14,836,168 cubic meters. In terms of the land use/land cover, the highest amount of water yield was obtained in lands with dense and semi-dense range with more than 12,430,000 cubic meters followed by the lands with sparse range with more than 1,990,000 cubic meters. The total economic value of the water yield in the eastern border basins was equal to 16,115,806.5 million Rials. The spatial distribution of economic values of the ecosystem, which was carried out in this research through quantification, mapping and valuation, of ecosystem services, can be used as an important and reliable tool for natural capital management and policy making.

**Keywords:** Ecosystem Service, Water Yield, Accuracy Assessment, South Khorasan Province.

Received: April 18, 2023

Accepted: September 26, 2023

### چکیده

آبدهی یک شاخص کلیدی عملکرد و خدمت بوم سازگان با ارزشی است که مستقیماً بر توسعه پایدار اقتصاد، رفاه انسان و بوم سازگان حوضه تأثیر می گذارد. با استفاده از مدل ارزش یکپارچه خدمات محیط زیستی (InVEST)، تغییرات آبدهی در ۱۰ حوضه آبخیز واقع در مرز شرقی کشور (استان خراسان جنوبی) تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی و پوشش سرزمین شبیه سازی شد. مدل با استفاده از داده های طولانی مدت دبی در ایستگاه های افین، خونیک علیا، منصورآباد، گزیک و آهانگران واسنجی شد. همچنین، ارزش اقتصادی خدمت تولید آب در هر کدام از کاربری اراضی/پوشش های مختلف سرزمین محاسبه شد. نتایج، بیشترین حجم آبدهی را حوضه آبخیز اسفدان با میزان ۸۱۲۶۱۲۹ مترمکعب و کمترین را حوضه نمکزار خواف با میزان ۱۸۵۵۹۰ مترمکعب نشان داد. میزان آبدهی در کل منطقه مورد مطالعه ۱۴۸۳۶۱۶۸ مترمکعب بدست آمد. بیشترین میزان تولید آبدهی در کاربری مرتع تراکم و نیمه تراکم با بیش از ۱۲ میلیون و ۴۳۰ هزار مترمکعب و پس از آن در کاربری مرتع تنک با بیش از ۱ میلیون و ۹۹۰ هزار مترمکعب قرار داشت. آبدهی از جنوب شرق به شمال غرب در حوضه های آبخیز منطقه مورد مطالعه افزایش می یابد. ارزش کل اقتصادی تولید آب در حوضه آبخیز مرزی شرقی معادل ۱۶۱۱۵۸۰۶/۵ میلیون ریال بدست آمد. نمایش فضایی توزیع ارزش های اقتصادی اکوسیستم که در این پژوهش از طریق کمی سازی، نقشه سازی و ارزش گذاری خدمات بوم سازگان انجام شد می تواند به عنوان ابزارهای مهم و قابل اعتماد برای مدیریت سرمایه های طبیعی و سیاست گذاری استفاده شود.

**کلمات کلیدی:** خدمت بوم سازگان، آبدهی، ارزیابی صحت، خراسان جنوبی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۷/۴

1- Assistant Professor, Department of Nature Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran. Email: Joorabian@asnrkh.ac.ir

2- Assistant Professor, Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran. Email: Jahanishakib@birjand.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Environmental Sciences & Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, P.O. Box 184, Ardakan, Iran. Email: ardakani@ardakan.ac.ir

\*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2023.180210](https://doi.org/10.22034/IWRR.2023.180210)

۱- استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران.

۲- استادیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۲ امکان پذیر است.



گیاهی، مانند زبری، آلبو، ظرفیت نفوذ، عمق ریشه، مقاومت، شاخص سطح برگ و هدایت روزه‌ای داشته باشد (Wei et al., 2021). تغییرات کاربری اراضی/پوشش سرزمین همچنین می‌تواند با تأثیر بر انواع، الگو و فرآیندهای اکولوژیکی زیربنای بوم‌سازگان، اثرات معناداری بر ویژگی‌ها، فرآیندها و اجزای بوم‌سازگان داشته باشد (Rafiei-Sardooi et al., 2022).

خدمات بوم‌سازگان می‌توانند انواع مختلفی از جمله هم‌افزایی، جبران<sup>۳</sup> و خنثی را در پاسخ به تغییرات مرتبط با کاربری اراضی و مدیریت سرزمین ارائه دهند. نوع همبستگی معمولاً در مقیاس‌های مختلف با شناسایی اینکه آیا خدمات بوم‌سازگان نسبت به یکدیگر غیرمرتبط، همبستگی مثبت و یا منفی دارند تجزیه و تحلیل می‌شوند. استدلال شده است که پیش نیاز مدیریت بوم‌سازگان پایدار، درک عمیق از تعاملات خالص بین چندین خدمت بوم‌سازگانی است. درک و مدیریت این تعاملات کلید برخورد با جبران و یافتن هم‌افزایی میان خدمات بوم‌سازگان است (Adelisardou et al., 2021). افزایش برخی از خدمات بوم‌سازگانی، به‌ویژه خدمات تأمینی، ممکن است باعث کاهش سایر خدمات بوم‌سازگان شود و مدیریت ناپایدار، ممکن است ارائه خدمات در آینده را نیز تضعیف کند. بنابراین، سیاست‌گذاران به اطلاعات صحیح برای درک بهتر جبران بین شیوه‌های مختلف مدیریت بوم‌سازگان و اطمینان از ارائه مؤثر خدمات بوم‌سازگانی مطلوب، نیاز دارند.

تأمین آب یک خدمت بوم‌سازگانی مهم است که پایه‌ای برای بقا و توسعه انسان فراهم می‌کند. با توجه به پیچیدگی مربوط به نقش‌ها و مسیرهای منابع آب در بوم‌سازگان، محاسبه و نقشه‌سازی تأمین آب هنوز یک چالش است (Yang et al., 2020). مدل‌ها نقش مهمی در ارزیابی خدمات بوم‌سازگان بویژه در مقیاس بزرگ بازی می‌کنند. مدل‌های هیدرولوژیکی فیزیکی توزیعی، مبنی بر ادغام فرآیندهای هیدرولوژیکی با فرآیندهای زمین-شیمیایی و بیولوژیکی جهت پیش‌بینی پویایی منابع آب در مقیاس حوضه نظیر ابزار ارزیابی آب و خاک<sup>۳</sup> (SWAT)، ظرفیت نفوذ متغیر<sup>۴</sup> (VIC) و ارزش یکپارچه خدمات محیط‌زیستی<sup>۵</sup> (InVEST) به کار می‌روند. با وجود ارائه خروجی‌های مختلف، مدل SWAT جهت تخمین متغیرها در مقیاس حوضه نسبت به مقیاس پیکسل توسعه داده شد. مدل VIC برای تحقیق در مقیاس بزرگ مناسب است و خروجی‌ها بر اساس مرحله زمانی (از ساعتی تا روزانه) و مقیاس مکانی (شامل نتایج رستری و حوضه آبخیز) متفاوت است. در مقایسه با مدل‌های دیگر، مدل InVEST بر اساس منحنی بادیکو و بارش سالانه است و با ورودی

خدمات بوم‌سازگان تا سال ۱۹۷۰ که اصطلاح "خدمات بوم‌سازگان" ابداع شد در سیاست‌های دولت و شیوه‌های مدیریت سرزمین مورد توجه قرار نگرفت (Su and Fu, 2013). خدمات بوم‌سازگان<sup>۱</sup>، که نشان‌دهنده مزایایی است که انسان مستقیم یا غیرمستقیم از بوم‌سازگان به دست می‌آورد، با توسعه اجتماعی-اقتصادی و رفاه انسان مرتبط است. بر اساس ارزیابی بوم‌سازگان هزاره<sup>۲</sup>، دو سوم همه خدمات بوم‌سازگان در چند دهه گذشته عمدتاً به علت فعالیت‌های انسانی کاهش یافته است (Ma, 2003). کاهش خدمات بوم‌سازگان به شدت، توسعه و پایداری منطقه‌ای و حتی جهانی را محدود می‌کند. در حال حاضر، نحوه بازبازی و بهبود خدمات تخریب شده بوم‌سازگان توجه گسترده دانشمندان، سیاست‌گذاران و مردم را به خود جلب کرده است (Qi et al., 2019). بسیاری از خدمات بوم‌سازگان به‌ویژه خدمات مرتبط با آب مانند آبدی که نقش اساسی را در کشاورزی، صنعت و کیفیت زندگی انسان ایفا می‌کند برای بقای انسان حیاتی هستند (Lian et al., 2019). آبدی نقش مهمی را در توسعه پایدار بخش‌های مذکور ایفا و به‌طور مستقیم بر اقتصاد و جامعه منطقه تأثیر می‌گذارد. آب یک منبع طبیعی حیاتی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر استان خراسان جنوبی است؛ زیرا سبب ایجاد تعادل در توسعه اقتصادی-اجتماعی و امنیت اکولوژیکی می‌شود و بنابراین یک موضوع اساسی برای مدیریت منابع آب است (Yang et al., 2020). در ضمن، تغییرات زمانی-مکانی آبدی جهت تخصیص منابع آب بین مناطق بسیار مهم است. علاوه بر این، تغییرات اقلیم و کاربری اراضی به‌عنوان عوامل اصلی مؤثر بر تغییرات زمانی-مکانی آبدی در نظر گرفته می‌شوند. باید توجه داشت که تغییر در الگو و ترکیب کاربری اراضی در طول زمان بر توزیع مکانی خدمات بوم‌سازگان و میزان عرضه آینده آنها تأثیرگذار است (Asadolahi, 2016). بنابراین نوع کاربری اراضی/پوشش سرزمین و موقعیت حوضه‌های آبخیز به طور معناداری بر حجم آبدی تأثیر می‌گذارند. از این‌رو، ارزیابی و تحلیل تغییرات زمانی و مکانی آبدی و متغیرهای مؤثر جهت تحقق مدیریت مؤثر و حفاظت از منابع آب، به‌ویژه برای مناطق خشک و نیمه‌خشک مفید هستند (Wei et al., 2021). پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبخیز می‌تواند تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی مانند توسعه شهر قرار گیرد و بر کمیت و کیفیت آب تأثیر گذارد. یکی از تهدیدهای اصلی برای کیفیت آب و امنیت تأمین آن، توسعه کشاورزی متراکم، افزایش ورود نهاده‌های شیمیایی کشاورزی به بدنه‌های آبی و ایجاد مشکلات پرغذایی است (Joorabian Shooshtari et al., 2021). تغییر کاربری اراضی می‌تواند اثرات معناداری بر جریان هیدرولوژیکی به دلیل تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی سطح زمین، خاک و پوشش

در حوضه آبخیز دارابکلا استان مازندران محاسبه کردند. بیشترین میزان تولید آب را کاربری انسان‌ساخت و پس از آن اراضی کشاورزی نشان دادند. کاربرد مدل خدمات بوم‌سازگان InVEST از نظر آبدی در حوضه آبخیز شهر بندرعباس مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشانگر کاهش ۲۳٪ در تولید آب کل حوضه طی دوره ۲۰ ساله داشت. (Daneshi et al., 2021) مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی را بر آبدی با استفاده از InVEST در حوضه آبخیز جنگلی، شمال ایران بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان از تغییرات مکانی قابل توجهی از اثرات منفی در تأمین آب و امنیت آب آینده در سراسر حوضه، افزایش بیشتر فشار بر ساکنان، فعالیت‌های اقتصادی و ارزش‌های اکولوژیکی آن‌ها داشت. (Guo et al., 2021) با استفاده از مدل InVEST در حوضه رودخانه جینگه به تعیین سه مورد از مهم‌ترین خدمات اکوسیستمی یعنی تولید آب، کنترل رسوب و ذخیره‌سازی کربن از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ پرداختند و نتیجه گرفتند که در مقایسه با سال ۲۰۰۰ مساحت زمین‌های کشاورزی به میزان ۴۶۶ کیلومتر مربع و مساحت مرتع تخریب شده به میزان ۳۹۴ کیلومتر طی برنامه اجرا شده GFGP کاهش یافته است. در حالی که مساحت زمین‌های جنگلی ۳۳۹ کیلومتر مربع افزایش داشته است. ضمن اینکه کنترل فرسایش با افزودن محرک‌های پوشش گیاهی به کاهش عملکرد آب به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک کمک می‌کند (Guo et al., 2021). (Li et al., 2021) سه خدمت اکوسیستمی تولید آب، حفاظت خاک و تصفیه آب را برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۸ و با استفاده از مدل InVEST اندازه‌گیری و نتیجه گرفتند عملکرد سالانه آب و حفاظت خاک در ابتدا افزایش و سپس از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ به ترتیب با ۲۴،۴۸ درصد و ۲۲،۵۰ درصد کاهش کلی یافته است.

(Mo et al., 2021) در حوضه دریاچه دونگی جانگ با استفاده از مدل InVEST برای تخمین عملکرد آب ضمن ارائه شش سناریو برای بررسی تأثیر تغییرات اقلیم و کاربری زمین نتیجه گرفتند که طبق تجزیه و تحلیل سری زمانی، کاهش اولیه و سپس افزایش را در روند عملکرد آب در این حوضه نشان می‌دهد و همچنین بیان داشتند تغییرات اقلیم تأثیر چشمگیری بر عملکرد آب داشته است و بیش از ۹۸/۲۶ درصد روی تنوع عملکرد آب در حوضه کمک کرده و در مقابل تأثیر پوشش گیاهی کمتر از آن و حدود ۱/۷۴ درصد برآورد شده است. (Mo et al., 2021).

در مطالعه حاضر ۱۰ حوضه آبخیز در استان خراسان جنوبی به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. این استان در حاشیه شمال شرقی

مکانی نسبتاً کم، اجرا و ابزار موثری جهت تخمین خدمات بوم‌سازگان مانند آبدی، با قدرت تفکیک مکانی بالا و در مقیاس‌های مختلف فراهم می‌کند (Yin et al., 2020). مدل‌های خدمات بوم‌سازگان مانند InVEST را می‌توان به راحتی مورد استفاده قرار داد و یک روش کمی ساده جهت برآورد منابع آب تحت محدوده وسیعی از شرایط ارائه داد. افزونه آبدی مدل InVEST جهت برآورد خدمات بوم‌سازگان مرتبط با آب بسیار مهم و می‌تواند ظرفیت تأمین آب یا آبدی در زیرحوضه‌های مختلف را در مقیاس بزرگ به صورت کمی ارزیابی کند. مدل InVEST به‌طور موفقیت‌آمیزی جهت ارزیابی آبدی در حوضه‌های آبخیز کوچک و بزرگ استفاده شده است (Yang et al., 2020). روش‌های کمی برای تخمین آبدی بر اساس شرایط مختلف وجود دارد، و تمرکز اصلی بر مدل‌هایی از جمله ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT)، هوش مصنوعی برای خدمات اکوسیستمی (ARIES)، ظرفیت نفوذ متغیر (VIC) و ارزش یکپارچه خدمات محیط‌زیستی (InVEST) جهت تخمین آبدی بوده است. در مقایسه با سایر مدل‌ها، بر اساس توازن آب، مدل InVEST به داده‌های کمتری نیاز دارد و تغییرات مکانی و زمانی آبدی را به صورت رستری، برداری و جدول نشان می‌دهد. بنابراین، مدل InVEST در مناطق مختلف مطالعاتی توسط بسیاری از محققان در سراسر جهان، از جمله ۲۲ حوضه آبخیز در کشور انگلستان (Redhead et al., 2016)، حوضه آبخیز رودخانه Xiangjiang در چین (Yang et al., 2019)، حوضه آبخیز سد نرمام در ایران (Daneshi et al., 2021) اعمال شده است. هرچند انتخاب مدل در مطالعه حاضر بر اساس شرایط منطقه مورد مطالعه نبوده است و واسنجی و اعتبار سنجی مدل SWAT در اقلیم‌های خشک بسیار مشکل است. اما مدل InVEST در حوضه‌های آبخیز با اقلیم‌های خشک نظیر Bayan Obo Mine چین (Wang et al., 2023) (با میانگین سالانه بارش ۲۴۹ میلی‌متر) و حوضه آبخیز رودخانه Halil در استان کرمان ایران (Rafiei-Sardooi et al., 2022) (با میانگین سالانه بارش ۱۵۵ میلی‌متر) با موفقیت کالیبره و مورد استفاده قرار گرفته است.

(Haghdadi et al., 2018) خدمت بوم‌سازگان آبدی را با استفاده از InVEST در حوضه آبخیز دلچای استان تهران بررسی و نتایج نشان داد که تولید رواناب سالانه به میزان ۴۲ میلیون مترمکعب در کل حوضه است. (Shafizadeh and Zare Chahouki, 2020) مدل‌سازی خدمت تولید آب را در حوضه آبخیز طالقان میانی، استان تهران با استفاده از InVEST انجام دادند. بیشترین میزان تولید آب را در زیرحوضه حسنجون و کمترین را در زیرحوضه دنبلید گزارش کردند. (Pirikiya et al., 2021) ارزش‌گذاری اقتصادی خدمت تولید آب را

جغرافیایی  $35^{\circ} 58'$  تا  $55^{\circ} 55'$  طول شرقی و  $32^{\circ} 13'$  تا  $34^{\circ} 08'$  عرض شمالی در حوضه مرزی شرقی در استان خراسان جنوبی واقع شده و شامل ۱۰ حوضه آبخیز است (شکل ۱). در شکل ۱، مرز جهت کالیبراسیون ایستگاه‌های هیدرومتری با رنگ بنفش مشخص شده است. میانگین سالانه بارش و دما به ترتیب در منطقه مورد مطالعه  $190/49$  میلی‌متر و  $16/25$  درجه سانتیگراد است. میانگین سالانه دبی ایستگاه هیدرومتری آهنگران  $0/01$  مترمکعب بر ثانیه (دوره  $1396-1389$ )، ایستگاه گزیک  $0/041$  مترمکعب بر ثانیه (دوره  $1397-1388$ )، ایستگاه خونیک علیا  $0/034$  مترمکعب بر ثانیه (دوره  $1397-1377$ )، ایستگاه افین  $0/061$  مترمکعب بر ثانیه (دوره  $1397-1377$ )، و ایستگاه منصور آباد  $0/011$  مترمکعب بر ثانیه (دوره  $1397-1377$ ) است. بیشترین درصد پوشش سرزمین را مرتع پرتراکم ( $45/54\%$ ) و پس از آن جنگل تنک با  $29/06\%$  به خود اختصاص داده است. همچنین مراتع کم‌تراکم،  $14/26\%$ ، اراضی بایر  $7/28\%$ ، اراضی کشاورزی  $3/26\%$  و مناطق مسکونی  $0/54\%$  از محدوده مورد مطالعه را پوشش داده است. پوشش‌های جنگل پرتراکم و پالایا نیز به ترتیب  $0/05\%$  و  $0/02\%$  را دربرگرفته است. کم‌ترین و بیشترین ارتفاع منطقه مورد مطالعه به ترتیب  $578$  و  $2855$  متر است.

دشت لوت و با اقلیم خشک و نیمه‌خشک تحت تنش آبی شدید (Ansari et al., 2019) و تغییرات شدید کاربری اراضی و توسعه (Jahanishakib et al., 2020) قرار دارد. لذا مطالعه ارزشگذاری و برآورد میزان آبدهی در تیپ‌های کاربری اراضی به‌منظور پشتیبانی از تصمیمات عالمانه مدیران سرزمینی، ضرورت دارد. نوآوری این پژوهش معطوف به اجرای مدل InVEST است که در مقیاس چندین حوضه به‌همراه واسنجی انجام شده است و نتایج ارزشگذاری اقتصادی برپایه داده‌های مکانی آن، وجه تمایز با مطالعات پیشین است. هدف اصلی مطالعه حاضر تغییرات پویایی تولید آب در انواع کاربری اراضی/پوشش سرزمین با استفاده از مدل InVEST در ۱۰ حوضه آبخیز واقع در مرز شرقی در استان خراسان جنوبی و ارزشگذاری اقتصادی این خدمت اکوسیستم است. همچنین، ارزیابی کارایی مدل InVEST جهت شبیه‌سازی آبدهی در استانی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک از دیگر اهداف پژوهش حاضر است.

## ۲- مواد و روش کار

منطقه مورد مطالعه با مساحت بیش از ۲ میلیون هکتار با مختصات

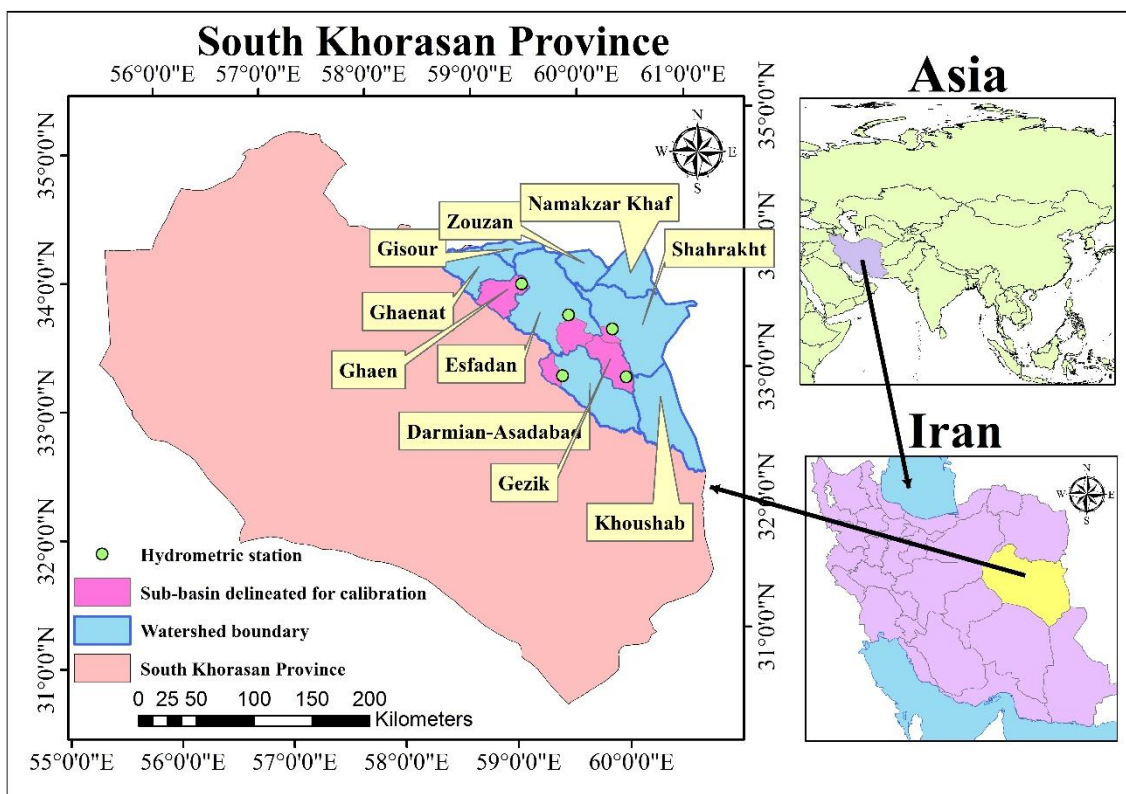


Fig. 1- Location of studied Basins in South Khorasan province

شکل ۱- موقعیت حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه در استان خراسان جنوبی به همراه نام آن‌ها

Table 1- Characteristics of the studied basins

جدول ۱- مشخصات حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه

Name of basins	Area (ha)	Minimum height (m)	Maximum height (m)
Darmian-Asad abaad	306100.28	1143	2757
Gazik	101881.93	1259	2733
Shah rakht	406646.32	612	2855
Namakzar-e-Khaf	132846.98	578	1606
Esfadan	432649.24	924	2728
Zuzan	97657.34	787	2842
Gisoor	55248.54	940	2310
Ghaenat	155108.72	1446	2838
Ghaen	92669.81	1286	2621
Khushab	270708.28	587	2061

$$Z = 0.2 \times N$$

(۵)

### ۳- داده و آماده‌سازی

بسته نرم‌افزاری آبدی در مدل InVEST به داده‌های بارندگی سالانه، میانگین سالانه تبخیر تعرق مرجع، عمق لایه محدودکننده ریشه، محتوای آب در دسترس گیاه، کاربری اراضی/پوشش سرزمین، مرز حوضه آبخیز، زیرحوضه‌ها، جدول بیوفیزیکال و فاکتور فصلی (Z) نیاز دارد.

داده‌های سالانه دما و بارش از سازمان هواشناسی کشور بدست آمد. داده‌های اصلی نیز داده‌های هواشناسی روزانه مشاهداتی بود که با استفاده از درون‌یابی با روش IDW<sup>۶</sup> به صورت نقشه رستری تبدیل شدند. در پژوهش حاضر از معادله پنمن-مانیتیت که به دلیل قابلیت استفاده در سطح جهانی بدون نیاز به کالیبراسیون محلی یکی از مناسبترین معادلات تخمین تبخیر تعرق مرجع به‌شمار می‌رود (Lian et al., 2019)، جهت تولید لایه تبخیر و تعرق مرجع استفاده شده است. نقشه عمق لایه محدودکننده ریشه با نقشه عمق خاک مرجع به‌عنوان لایه تقریبی جایگزین شد. شاخص PAWC<sup>۷</sup> به‌عنوان تفاوت بین ظرفیت نگهداری آب خاک و نقطه پژمردگی دائمی تعریف می‌شود. Zhou et al. (2005) روشی را جهت تخمین PAWC با استفاده از خواص فیزیکی و شیمیایی خاک توسعه دادند که عبارت است از معادله ۶:

$$PAWC = 54.509 - 0.132 * SAND\% - 0.003 * (SAND\%)^2 - 0.055 * SILT\% - 0.006 * (SILT\%)^2 - 0.738 * CLAY\% + 0.007 * (CLAY\%)^2 - 2.688 * OM\% + 0.501 * (OM\%)^2$$

(۶)

مدل بازده آب InVEST بر روی یک نقشه شبکه‌بندی شده اجرا و میزان آبدی را در هر پیکسل براساس اصل بیلان آب تخمین می‌زند. میزان آب سالانه در هر پیکسل با استفاده از معادله (۱) تعیین می‌شود:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) \times P_x$$

(۱)

که  $Y_{xj}$  و  $AET_{xj}$  به ترتیب بازده آب سالانه و تبخیر تعرق واقعی برای پیکسل  $x$  بر کاربری  $j$  هستند.  $P_x$  نیز میزان بارندگی سالانه بر پیکسل  $x$  است. ارتباط بین  $AET_{xj}$  و  $P_x$  براساس روش توسعه یافته توسط Budyko (1974) است که پس از آن توسط (Zhang et al., 2001) توسعه یافت.  $AET_{xj}/PET_{xj}$  با استفاده از یک روش ساده مکانی روی پیکسل  $x$  تخمین زده شد یعنی (معادله ۲):

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = 1 + \frac{PET_{xj}}{P_x} - \left[1 + \left(\frac{PET_{xj}}{P_x}\right)^\omega\right]^{1/\omega}$$

(۲)

که  $PET_{xj}$  به‌عنوان تبخیر تعرق بالقوه برای پیکسل  $x$  در کاربری  $j$  و  $\omega$  یک پارامتر غیرفیزیکی که ویژگی‌های اقلیم- خاک طبیعی را توصیف می‌کند. با استفاده از معادله ۳ محاسبه می‌گردد (Yin et al., 2020):

$$PET_x = K_c(I_x) * ET_0(x)$$

(۳)

که  $K_c(I_x)$  ضریب تبخیر تعرق پوشش گیاهی مرتبط با کاربری اراضی/پوشش سرزمین نوع  $(I_x)$  در هر پیکسل است.  $K_c$  نیز از راهنمای مدل InVEST استخراج شده است (Allen et al., 1998).  $\omega$  با استفاده از بارش، محتوای آب در دسترس گیاه، و پارامتر ثابت  $Z$  از طریق معادله ۴ محاسبه می‌شود:

$$\omega(x) = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25$$

(۴)

که  $AWC(x)$  حجم آب قابل دسترس گیاه است. Donohue et al. (2012) یک روش را برای محاسبه پارامتر  $Z$  که الگوی بارش محلی را نشان می‌دهد (معادله ۵) ارائه کردند. که  $N$  تعداد رخداد های بارش بیشتر از ۱ میلی‌متر/سال طی دوره زمانی مورد مطالعه است.

که در آن SAND، SILT، CLAY و OM به ترتیب بیانگر نسبت شن، سیلت، رس و مواد آلی در خاک می‌باشند (Lian et al., 2019) در مطالعه حاضر از فرمول مذکور جهت محاسبه PAWC استفاده شد. جدول بیوفیزیکیال جدولی است که حاوی ضرایب بیوفیزیک مورد استفاده در افزونه آبدی است. هر ستون حاوی یک ویژگی متفاوت است. Lucode کد منحصر به فرد مربوط به هر کلاس کاربری اراضی/پوشش سرزمین می‌باشد. Lucc-desc حاوی نام هر کلاس اراضی/پوشش سرزمین می‌باشد. Lucc\_veg شامل اطلاعاتی است که در معادله (۱) استفاده می‌شود. Root\_depth اغلب به‌عنوان عمقی است که ۹۵٪ از زیست‌توده ریشه یک نوع گیاه رخ می‌دهد. Kc ضریب تبخیر تعرق گیاه برای هر کلاس کاربری اراضی/پوشش سرزمین است.

ضریب فصلی (Z) یک پارامتر تجربی است که شدت بارندگی و ویژگی‌های توپوگرافی را با مقادیر ۱ تا ۳۰ توصیف می‌کند. سه روش برای محاسبه ضریب (Z) وجود دارد: با استفاده از داده‌های دبی مشاهداتی، با استفاده از برآوردهای جهانی (w)، به‌عنوان تابعی از تعداد متوسط سالانه رخدادهای بارش. در پژوهش حاضر از رویکرد سوم استفاده شد (Lian et al., 2019).

لایه کاربری اراضی/پوشش سرزمین در این پژوهش با رویکرد پیسکل-پایه تهیه شد (Eslami et al., 2022). بدین منظور نخست لایه پردازش شده کاربری اراضی/پوشش زمین از سایت Esri که حاصل تفسیر تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ با درجه تفکیک ۱۰ متر و با دقت کاپا بالاتر از ۸۵٪ مربوط به سال ۲۰۲۰ تهیه شد. این لایه از طریق الگوریتم یادگیری عمیق طبقه‌بندی شده است (Karra et al., 2021). در ادامه با تصاویر موجود در سازمان‌ها، منابع معتبر موجود و گوگل ارث تطابق داده شد و از صحت بالای (ضریب کاپای ۸۹٪) آن برای منطقه مورد مطالعه اطمینان حاصل شد. در مرحله بعد هر کدام از طبقات جنگل‌ها و مراتع بر اساس آماره میانه شاخص پوشش گیاهی (NDVI<sup>10</sup>) مستخرج از تصاویر مادیس ۱۱ سپتامبر ۲۰۲۰ (USGS, 2020) به دو طبقه کم‌تراکم و پرتراکم در مناطق خشک و نیمه‌خشک تفکیک شد. نهایتاً پس از تبدیل اندازه سلول دو لایه به ۳۰ متر، هشت طبقه از جمله پلایا (شامل دق و بدنه آبی)، مناطق مسکونی، اراضی کشاورزی، اراضی بایر، جنگل‌های پرتراکم، جنگل‌های کم‌تراکم، مراتع پرتراکم و مراتع کم‌تراکم به دست آمد.

نتایج حاصل از تهیه نقشه‌های ورودی مدل آبدی در شکل ۲ ارائه شده‌اند. میزان تبخیر تعرق مرجع نیز در دامنه ۱۴۶۹ تا ۱۵۷۴ میلی‌متر محاسبه شد (شکل ۲-a). نقشه میانگین سالانه بارش از ۱۰۵ تا ۳۳۲

میلیمتر در شکل (۲-b) نشان داده شده است. نقشه عمق خاک نشان داد دامنه مقادیر از ۶۲۰ تا ۲۰۰۰ میلی‌متر است (شکل ۲-c). ظرفیت آب قابل دسترس گیاه از ۰/۱۷ تا ۰/۵۴ به دست آمد (شکل ۲-d).

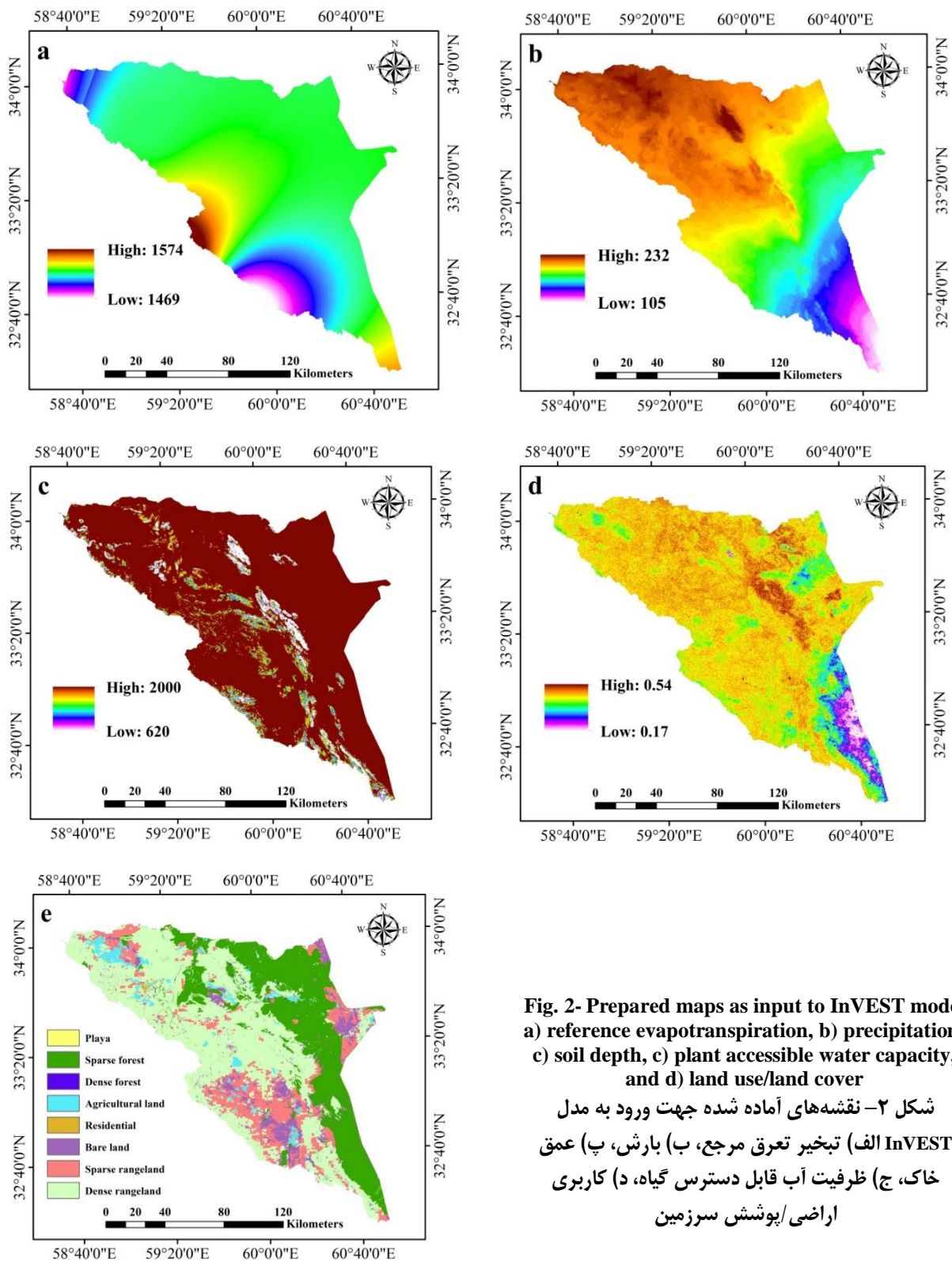
#### ۴- ارزیابی مدل

مدل با استفاده از داده‌های طولانی مدت میانگین دبی (دوره زمانی ۱۰ ساله) واسنجی شد. به‌عنوان یک قاعده کلی، از یک دوره زمانی استفاده می‌شود که اجازه ثبت درجاتی از تغییرپذیری اقلیمی را فراهم کند. با توجه به در دسترس بودن داده‌های دبی برای ایستگاه‌های افین، خونیک علیا، منصورآباد، گزیک و آهنگران، از این ۵ ایستگاه جهت واسنجی مدل استفاده شد. مرز جهت واسنجی هر ایستگاه هیدرومتری نیز در شکل ۱ مشخص شده است. حجم رواناب شبیه‌سازی شده (مترمکعب بر سال) توسط مدل با داده‌های دبی ایستگاه‌های مشاهداتی با تغییر پارامتر Z بین ۱ و ۳۰ برازش داده شد. تغییر در پارامتر Z اثر قابل توجهی بر رواناب شبیه‌سازی شده دارد و در نتیجه بر فرآیند تطابق با داده‌های دبی مشاهداتی اثر می‌گذارد (Daneshi et al., 2021). خطای نسبی با استفاده از معادله ۷ جهت ارزیابی کارایی مدل در هر ایستگاه مورد استفاده قرار گرفت. که  $Q_r$  میزان رواناب مشاهداتی و  $Q_p$  میزان رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل است.

$$RE = \left[ \frac{(Q_r - Q_p)}{Q_r} \right] * 100 \quad (7)$$

#### ۵- ارزش‌گذاری اقتصادی خدمت تولید آب

در این پژوهش، برای ارزش‌گذاری اقتصادی آبدی از روش هزینه اجتناب‌شده یا جایگزین استفاده شده است. وقتی محاسبه ارزش برحسب تغییر در تولید و با بهره‌وری ناممکن باشد، می‌توان از روش هزینه جایگزینی دارای زیان دیده در اثر تغییرات محیطی استفاده کرد. برآورد چنین هزینه‌هایی و فرض اینکه این هزینه‌ها می‌تواند معادل منافع هزینه‌های محیط‌زیستی تلقی شود، کاذب خواهد بود و تنها می‌توان فرض نمود که این مخارج نشانگر ارزش حداقل منافع هزینه‌های محیط‌زیستی است. باید در نظر داشت که این روش در واقع جانمایی است برای هنگامی که امکان استفاده از اندازه‌گیری مستقیم فراهم نیست (Ghorbani and Firouzzare, 2010). بنابراین تعرفه خسارت وارده به آبخوان‌ها با توجه به نظر کارشناسان رسمی دادگستری ۲۱۱/۲ مورخ ۹۹/۲/۲۳ به ازای هر یک مترمکعب برداشت غیرمجاز با هدایت الکتریکی (EC) کمتر از ۲۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر در محدوده عملیاتی شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی بر اساس نقش اقتصادی آب در فرآیند تولیدات غیرکشاورزی است.



**Fig. 2- Prepared maps as input to InVEST model**  
 a) reference evapotranspiration, b) precipitation,  
 c) soil depth, c) plant accessible water capacity,  
 and d) land use/land cover

شکل ۲- نقشه‌های آماده شده جهت ورود به مدل  
 InVEST الف) تبخیر تعرق مرجع، ب) بارش، پ) عمق  
 خاک، ج) ظرفیت آب قابل دسترس گیاه، د) کاربری  
 اراضی/پوشش سرزمین

تبدیل شده است (هر پیکسل ۳۰ در ۳۰، در تصویر معادل ۹۰۰ مترمربع است) و سپس ارزش اقتصادی آبدهی با ضرب در مبلغ میانگین تعرفه خسارت برداشت غیرمجاز آب (۰/۳۵ میلیون ریال) مطابق با معادله (۲) برآورد شد.

$$\text{Water Yield} * 0.9 * 0.035 \quad (8)$$

در منطقه مورد مطالعه برحسب مساحت دشت‌ها و تعرفه‌ها، میانگین حسابی تعرفه خسارت برداشت غیرمجاز محاسبه شد. لذا بر اساس ارزشگذاری به روش هزینه اجتناب شده، میانگین نسبی تعرفه خسارت برداشت غیرمجاز آب از آبخوان‌های حوضه مرزی شرقی محاسبه شد. بدین ترتیب میانگین تعرفه خسارت برداشت غیرمجاز آب، میزان ۳۵۰۰۰ ریال به ازای هر مترمکعب برآورد شد. خروجی رستری مدل Water Yield از طریق ضرب ۰/۹ از میلیمتر به مترمکعب

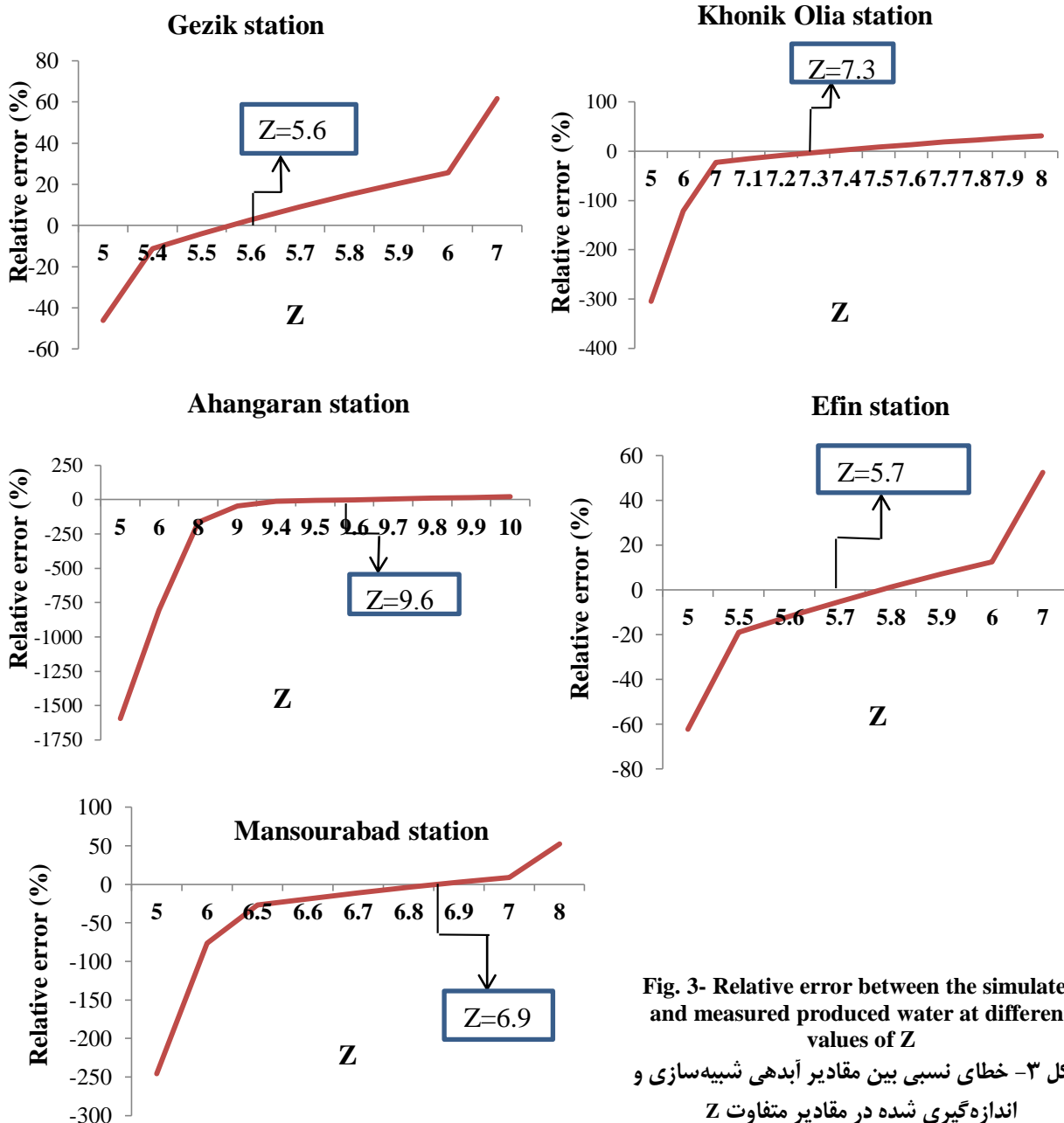


Fig. 3- Relative error between the simulated and measured produced water at different values of Z

شکل ۳- خطای نسبی بین مقادیر آبدهی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در مقادیر متفاوت Z



## ۶- نتایج

### ۱-۶- ارزیابی مدل

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده می‌شود، تغییرات در مقدار Z اثرات معناداری را در شبیه‌سازی میزان آبدهی دارد. کمترین تفاوت بین میزان آبدهی مشاهداتی و شبیه‌سازی در Z با مقادیر ۵/۶ در ایستگاه هیدرومتری گزیک، ۷/۳ در ایستگاه هیدرومتری خونیک علیا، ۹/۶ در ایستگاه هیدرومتری آهنگران، ۵/۷ در ایستگاه هیدرومتری افین و ۶/۹ در ایستگاه هیدرومتری منصورآباد مشاهده شد.

### ۲-۶- تولید آب

بیشترین میزان میانگین تبخیر تعرق بالقوه در حوضه آبخیز نمکزار

خواف با میزان ۱۱۶۱ میلیمتر و کمترین در حوضه آبخیز درمیان-اسدآباد با میزان ۹۱۶ میلیمتر محاسبه شد. کمترین و بیشترین میزان میانگین تبخیر تعرق واقعی نیز از ۱۳۶ تا ۲۱۴ میلیمتر به ترتیب برای حوضه‌های خوشاب و گیسور بدست آمد. کمترین و بیشترین میزان بارش را به ترتیب حوضه‌های خوشاب (۱۳۶/۷ میلیمتر) و گیسور (۲۱۵/۲ میلیمتر) نشان دادند (شکل ۴). بیشترین حجم آبدهی را حوضه آبخیز اسفدان با میزان ۸۱۲۶۱۲۹ مترمکعب و کمترین را حوضه نمکزار خواف با میزان ۱۸۵۵۹۰ مترمکعب نشان داد (شکل ۵). میزان آبدهی در کل منطقه مورد مطالعه ۱۴۸۳۶۱۶۸ مترمکعب بدست آمد. در سطح پیکسل نیز میزان تولید آب از ۰ تا ۷/۶ میلیمتر در حوضه مرزی شرقی متغیر بود (شکل ۶).

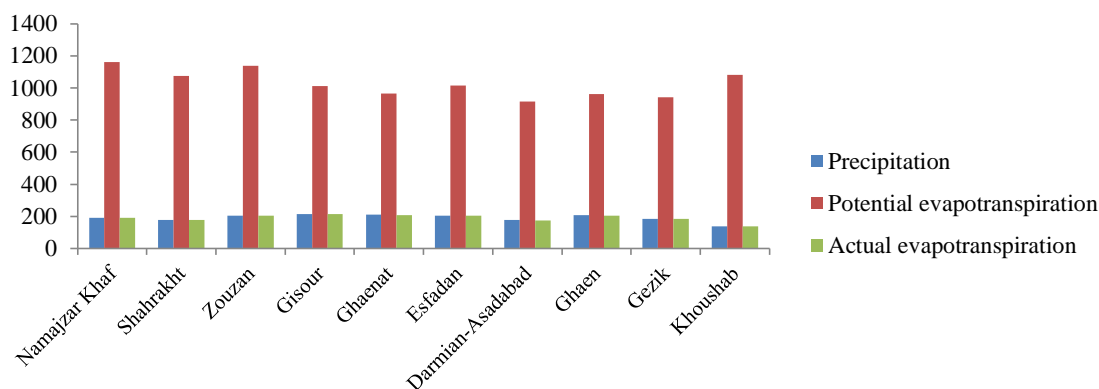


Fig. 4- Average precipitation and potential and actual evapotranspiration (mm) in the studied Basins

شکل ۴- میانگین بارش، تبخیر تعرق بالقوه و واقعی (میلیمتر) در حوضه‌های آبخیز مطالعه‌شده

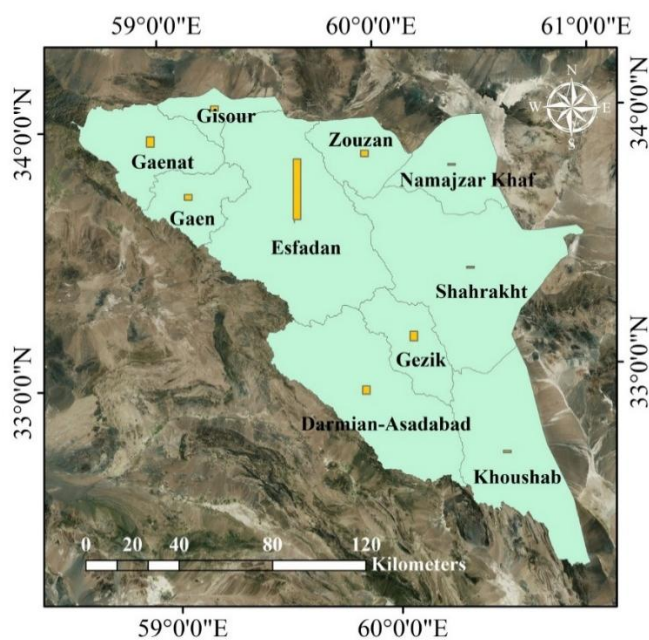
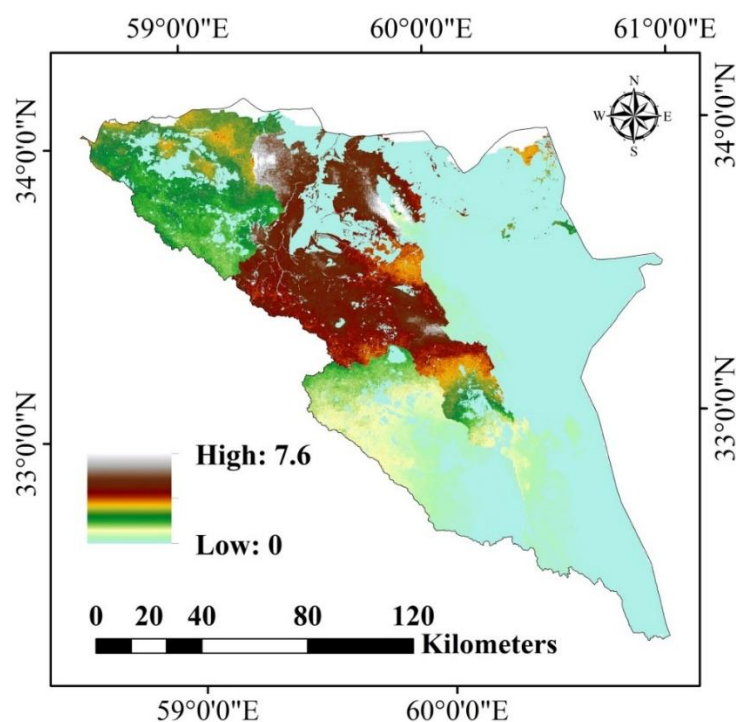


Fig. 5- Produced water value ( $m^3$ ) in studied basins

شکل ۵- حجم آبدهی (مترمکعب) در حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه



**Fig. 6- Map of water yield per pixel (mm)**  
 شکل ۶- نقشه میزان تولید آب در هر پیکسل (میلیمتر)

۳-۶- ارزشگذاری اقتصادی خدمت تولید آب  
 ارزش کل اقتصادی تولید آب در حوضه آبخیز مرزی شرقی معادل ۱۶۱۱۵۸۰۶/۵ میلیون ریال بدست آمد. شکل ۷ مقادیر مجموع و میانگین ارزش آب تولید شده را در حوضه‌های آبخیز مطالعه شده نمایش می‌دهد. مطابق با این نمودار ارزش کل تولید آب در حوضه آبخیز اسفدان با ۸۹۹۴۵۹۷ میلیون ریال بالاترین و حوضه آبخیز نمکزار خواف با ۱۸۷۰۰۳ میلیون ریال کمترین مقدار را داراست. از طرفی میانگین عملکرد تولید آب در حوضه آبخیز شاه رخت کمترین و در اسفدان بیشترین میزان را داشت.

میانگین آبدهی در کاربری مرتع متراکم و نیمه متراکم با میزان ۱/۳۴ میلیمتر بیشترین و در کاربری‌های دق، سکونتگاه‌ها و بایر با ۰ میلیمتر کمترین میزان را نشان دادند. پس از مرتع متراکم و نیمه متراکم، کلاس مرتع تنک با میانگین آبدهی ۰/۶۹ میلیمتر بالاترین میزان را به خود اختصاص داد. کاربری‌های کشاورزی (۰/۰۶۸ میلیمتر)، جنگل انبوه و نیمه انبوه (۰/۰۳۳ میلیمتر) و جنگل تنک (۰/۰۱۸ میلیمتر) میانگین آبدهی نسبتاً کمی را نشان دادند. میزان آب تولید شده توسط مرتع متراکم و نیمه متراکم بیش از ۱۲ میلیون و ۴۳۰ هزار مترمکعب است. پس از آن کاربری مرتع تنک بیش از ۱ میلیون و ۹۹۰ هزار مترمکعب آب تولید می‌کند (جدول ۲).

**Table 2- Amount of water yield ecosystem services in different land use/covers**

جدول ۲- میزان خدمت بوم‌سازگان آبدهی در کاربری اراضی / پوشش‌های مختلف سرزمین

LULC	Mean (mm)	Mean (m3/total area)	Area (ha)
Playa	0	0	401.49
Sparse forest	0.0185	107876.7	582896.88
Dense forest	0.0331	308.3	930.42
Agriculture	0.0684	44867.6	65543.31
Residential	0	0	11094.66
Bare	0	0	141793.47
Sparse range	0.6912	1994132.6	28840.05
Dense range	1.3424	12430121.1	925953.57

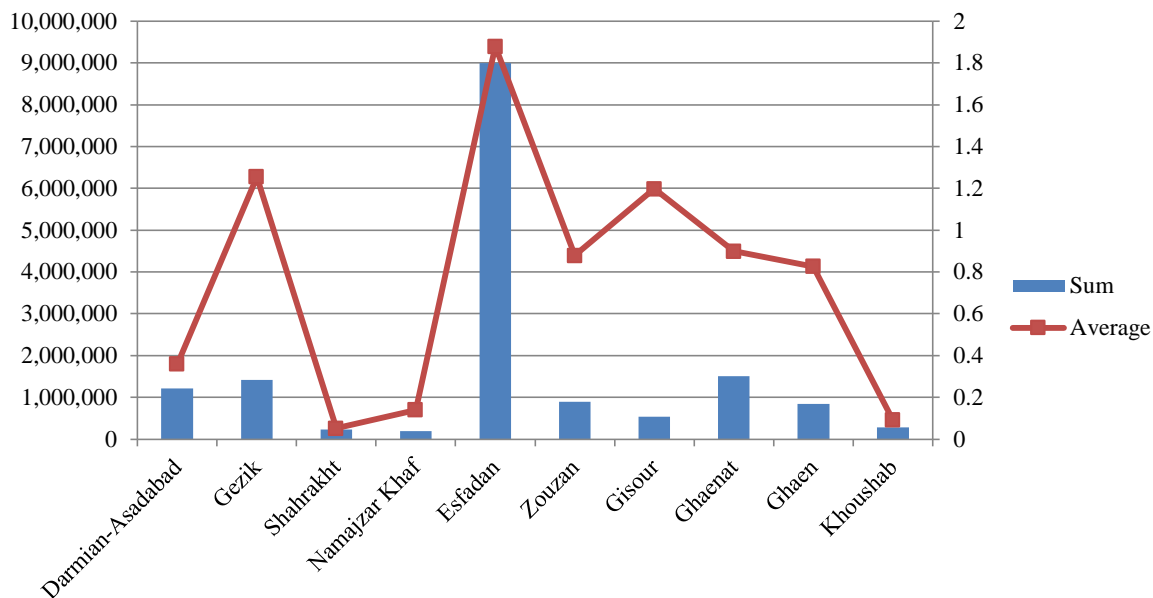


Fig. 7- The economic value of water yield (millions Rials/pixel) in the basins for 2021

شکل ۷- ارزش آب تولیدشده در هر پیکسل به میلیون ریال در حوضه‌های آبخیز سال ۲۰۲۱

۱۰ زیر حوضه آبخیز در استان خراسان جنوبی تعیین شد. این مدل در حال حاضر یک از کامل‌ترین مدل‌ها جهت نمایش مکانی خدمات بوم‌سازگان محسوب می‌شود، به‌ویژه زمانی که عدم‌دسترسی به داده‌های مکانی با حد تفکیک بالا مطرح باشد (Vigerstol and Aukema, 2011) که مصداق اجرای آن در ایران با تمرکز بر تغییر در آبدی تحت تأثیر تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی در حوضه آبخیز هلیل‌رود، استان کرمان (Rafiei-Sardooi et al., 2022)، تغییر در کمیت و کیفیت آب تحت تأثیر تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی در حوضه آبخیز نکارود، استان‌های مازندران و گلستان (Joorabian and Shooshtari et al., 2021)، تغییر در کمیت آب تحت تأثیر تغییر اقلیم و تغییر کاربری در حوضه آبخیز سد نرم‌آب، استان گلستان (Daneshi et al., 2021)، خدمت بوم‌سازگانی تولید آب در حوضه آبخیز دلپچای، استان تهران (Haghdadi et al., 2018) قابل مشاهده است.

جدول ۳ مقادیر آماری ارزش اقتصادی تولید آب را برحسب میلیون ریال به تفکیک طبقات کاربری و پوشش اراضی استان را نمایش می‌دهد. مطابق با این جدول پهنه‌ی مراتع متراکم و نیمه‌متراکم و سپس مراتع تنک در حوضه آبخیز مری شرقی بیشترین میزان تولید آب را به ازای هر پیکسل دارا هستند.

## ۷- بحث و نتیجه‌گیری

ارزیابی فضایی خدمات بوم‌سازگان می‌تواند روند برنامه‌ریزی را برای دستیابی به پایداری به‌عنوان یک چالش عمده برای جامعه محلی پشتیبانی کند. آب، علاوه بر اینکه از مهمترین خدمات بوم‌سازگان‌های زمین است، یکی از ارزش‌ترین خدمات بوم‌سازگان نیز از نظر دینفعان است (Stein et al., 2013). در پژوهش حاضر میزان تولید آب به‌عنوان یک خدمت بوم‌سازگانی مهم با استفاده از مدل InVEST

Table 3- Statistical investigation of the economic value of produced water per LULC

جدول ۳- بررسی آماری ارزش اقتصادی تولید آب بتفکیک طبقات کاربری و پوشش اراضی

LULC	Min (mm)	Max (m3/ ha)	Mean (m3/total area)	Sum
Playa	0	0	0	0
Sparse forest	0.000035	0.00213	0.00058	3750.02
Dense forest	0.00028	0.00164	0.00104	10.69
Agriculture	0.00030	0.00427	0.00215	1566.64
Residential	0	0	0	0
Bare	0	0	0	0
Sparse range	0.00019	0.09778	0.02177	69454.65
Dense range	0.00020	0.24121	0.04228	432865.88

بطور کلی مطالعات مذکور، هدف مشترکی را بدین مضمون دنبال می‌کنند که از طریق مدل‌سازی خدمت آب، به موضوع پیش‌بینی وضعیت آینده تولید آب در حوضه و زیرحوضه‌های تحت مطالعه پرداخته شود و متعاقب آن، مکان‌هایی با توان تولید بالای آب شناسایی و در آینده تحت مدیریت بهتری قرار گیرند و در نقطه مقابل مناطق با توانایی کمتر تولید آب جهت حفاظت بیشتری از جنبه بهره‌برداری اصولی از منابع آب شناسایی و مدیریت شود و همچنین مدل‌ها را می‌توان جهت شناسایی مناطق مستعد سیل و خشکسالی تحت سناریوهای تغییر کاربری اراضی استفاده کرد (Scordo et al., 2018). در مطالعه حاضر بیشترین میزان آبدهی در حوضه آبخیز اسفندان با میزان ۸۱۲۶۱۲۹ مترمکعب و کمترین را حوضه نمکزار خواف با میزان ۱۸۵۵۹۰ مترمکعب نشان داد. آبدهی از جنوب‌شرق به شمال‌غرب در حوضه‌های آبخیز منطقه مورد مطالعه افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن عامل کاربری اراضی می‌توان بیان نمود که در این مطالعه، بیشترین میانگین تولید آب را مرتع پرتراکم به خود اختصاص داده است که با مطالعه (Yang et al., 2020) کاملاً همخوانی داشته است، بطوری‌که بیشترین میزان تولید آب را در حوضه آبخیز دریاچه Bosten چین، برای کاربری مرتع گزارش کردند و دلیل این امر بدین صورت قابل توجه است که این نوع پوشش سرزمین، سهم کمتری آب را از طریق مقادیر کمتر تبخیر تعرق مصرف می‌کند. همچنین، مراتع نسبت به زمین‌های کشاورزی اصولاً در مناطق با شیب و ارتفاع بالاتری قرار دارند که شرایط تولید آب بیشتر را فراهم می‌سازد و علاوه بر آن بیشتر تحت تأثیر بارگزارای مازاد دام هم قرار می‌گیرند و در پی آن پدیده کاهش تخلخل ظاهری و کاهش نفوذپذیری آب و عدم‌احیای ویژگی‌های خاک هم اتفاق می‌افتد (Jokar, 2017). Khosravi (2015) در مطالعه خود علاوه بر موارد ذکر شده عامل تراکم کپه‌ای مرتع و وجود فضای خالی یا همان خاک لخت بین لکه‌های گیاهی را هم بیان نمودند. طبق مطالعه (Haghdadi et al., 2018) میزان آبدهی در اراضی کشاورزی نیز کمتر از مراتع است؛ زیرا محصولات کشاورزی، آب بیشتری را در مراحل رشد و تبخیر تعرق مصرف می‌کنند، پوشش گیاهی فشرده‌تری دارند و اصولاً در مناطق دشتی که ارتفاع و شیب کمتری دارند واقع شده است و کمتر تحت چرای بی‌رویه قرار می‌گیرند. در پژوهش حاضر میانگین خدمت بوم‌سازگان آبدهی در مراتع بیشتر از پوشش جنگلی است. این موضوع بدین دلیل است که درختان معمولاً آب بیشتری مصرف می‌کنند (استخراج بیشتر آب از ذخیره آبخوان به دلیل سیستم ریشه عمیق و تعرق بیشتر به دلیل رسانایی آئرودینامیکی بزرگتر) و بنابراین کاربری جنگلی، میزان آب (بازدهی آب) کمتری تولید می‌کند. در مقایسه با جنگل، مراتع دارای سطح تاج‌برگ کمتر، عمق ناحیه ریشه‌زایی کمتر

و دمای سطح بالاتر هستند که منجر به کاهش تبخیر تعرق و نفوذ و در نتیجه افزایش تولید آب می‌شود (de Oliveira Serrão et al., 2022). آبدهی از جنوب‌شرق به شمال‌غرب در حوضه‌های آبخیز منطقه مورد مطالعه افزایش می‌یابد. بنابراین به‌طور کلی میزان آبدهی با توجه به شرایط سطح، خاک و نوع پوشش گیاهی تعیین می‌شود. از سوی دیگر، تاج پوشش، پوشش و ریشه گیاهان باعث افزایش تبخیر و تعرق، نگهداشت خاک و آب و نفوذ آب به همراه ظرفیت گیاهان برای جذب رطوبت می‌شود (Guo et al., 2023). ارتباط زیادی بین میزان بارش با آبدهی وجود دارد. میانگین بارش در حوضه آبخیز اسفندان ۲۰۵ میلیمتر و در نمکزار خواف ۱۹۲ میلیمتر بدست آمد. Lian et al. (2019) نیز همبستگی بالایی بین میزان آبدهی و بارش در حوضه آبخیز دریاچه Qinghai چین یافتند. همبستگی بالا بین میزان بارش و آبدهی سالانه در منطقه Beijing-Tianjin-Hebei چین نیز توسط Yang et al. (2020) گزارش شد.

ارزیابی عملکرد مدل InVEST در ایستگاه‌های مختلف نشان از خطای بسیار کم و کارایی بالای آن در شبیه‌سازی آبدهی در مناطق خشک داشت. با این حال، عدم قطعیت‌هایی در ارزیابی آبدهی به علت محدودیت داده‌ها و پیچیدگی ساختار و پارامترهای مدل وجود دارد. بارش و تبخیر تعرق مرجع، داده‌های کلیدی برای شبیه‌سازی آبدهی هستند. با این وجود، به دلیل پیچیدگی تغییرات اقلیمی یا داده‌های پراکنده اقلیم، درون‌یابی دقیق بارش و استفاده از روش هارگریوز برای محاسبه تبخیر تعرق مرجع دشوار است که به میزان زیادی بر دقت شبیه‌سازی آبدهی تأثیر می‌گذارد که این دلایل منجر به محدودیت داده می‌شود. طبق مطالعه (Haghdadi et al., 2018) استفاده از این مدل بدون انجام کالیبراسیون توصیه نمی‌شود، بنابراین یکی از نقاط قوت پژوهش حاضر استفاده از مقادیر متفاوت Z در حوضه‌های آبخیز متفاوت است که سبب کاهش عدم قطعیت می‌شود. مقدار Z ویژگی‌های فصلی اقلیم، شدت بارندگی و توپوگرافی را در سطح حوضه آبخیز نشان می‌دهد که با محتوای آب در دسترس گیاه و سطح بارندگی سالانه توصیف نمی‌شوند (Daneshi et al., 2021). افزایش این پارامتر سبب کاهش حجم آبدهی در منطقه مورد مطالعه می‌شود. علاوه بر محدودیت‌های ذکر شده، میزان تولید آب ارتباط زیادی با توسعه اقتصادی اجتماعی و فعالیت‌های انسانی دارد. با این وجود، داده‌های ورودی مدل داده‌های طبیعی هستند و داده‌های اجتماعی-اقتصادی به ندرت در نظر گرفته می‌شوند (Wei et al., 2021). در این راستا مطالعات خوبی در ایران جهت مدل‌سازی خدمت آب انجام شده ولی هیچ‌کدام به تغییرات آبدهی تحت تأثیر گرادان مکانی کاربری راضی/پوشش سرزمین و محاسبه ارزش اقتصادی این خدمت

بوم‌سازگان به‌طور همزمان در استان خراسان جنوبی نپرداخته است. مهم‌تر از آن قابلیت نمایش فضایی توزیع ارزش‌های اقتصادی اکوسیستم با درجه تفکیک بالا در سطح سرزمین فراهم نشده است که در این مطالعه این مهم انجام پذیرفته است تا بتوان با کمی‌سازی، نقشه‌سازی و ارزش‌گذاری خدمات بوم‌سازگان به‌عنوان ابزارهای مهم و قابل اعتماد برای مدیریت سرمایه‌های طبیعی و سیاست‌گذاری استفاده نمود.

- پی‌نوشت‌ها
- 1- Ecosystem Services
  - 2- Millennium Ecosystem Assessment
  - 3- Tradeoff
  - 4- Soil and Water Analysis Trend
  - 5- VIC: Variable Infiltration Capacity
  - 6- Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs
  - 7- Inverse Distance Weighted
  - 8- Plant Available Water Capacity

#### ۸- تشکر و قدردانی

مقاله حاضر، مستخرج از بخشی از گام ۴ و ۵ طرح پژوهشی به شماره قرارداد ۰۰/۱۰/۱/۲۴۲۴ مورخ ۰۳/۰۵/۱۴۰۰ و با نظارت علمی و فنی دفتر اقتصاد و فناوری محیط‌زیست سازمان حفاظت محیط‌زیست کشور بوده که بدین‌وسیله از کلیه دست‌اندرکاران سازمان حفاظت محیط‌زیست، اداره کل محیط‌زیست استان خراسان جنوبی و دانشگاه بیرجند تشکر و قدردانی می‌شود.

## ۹- مراجع

- Adelisardou F, Jafari HR, Malekmohammadi B, Minkina T, Zhao W, and Karbassi A (2021) Impacts of land use and land cover change on the interactions among multiple soil-dependent ecosystem services (Case study: Jiroft plain, Iran). *Environmental Geochemistry and Health*, Springer 43(10):3977–3996
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, and Smith M (1998) Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and Drainage paper 56. Fao, Rome 300(9):D05109
- Ansari M, Fahiminia M, and Farzadkia M (2019) Needs assessment and prioritization of establishment of rural wastewater management facilities in order to supply a safe and alternative water source in the provinces of Iran with severe water stress. *Iranian Journal of Health and Environment*, Research Center for Environmental Health Technology, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran AND Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran 11(4):599–612 (In Persian)
- Asadolahi Z (2016) Assessing the impact of land use/land cover change scenarios on supply and interaction of selected ecosystem services (Case study: Gorganrud watershed). *Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources* (In Persian)
- Budyko MI (1974) *Climate and Life International Geophysics Series*. New York
- Daneshi A, Brouwer R, Najafinejad A, Panahi M, Zarandian A, and Maghsood FF (2021) Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST. *Journal of Hydrology* 593:125621
- de Oliveira Serrão EA, Silva MT, Ferreira TR, de Ataíde LCP, dos Santos CA, de Lima AMM, da Silva V de PR, de Sousa F de AS, and Gomes DJC (2022) Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model. *International Journal of Sediment Research* 37(1):54–69
- Donohue RJ, Roderick ML, and McVicar TR (2012) Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *Journal of Hydrology* 436:35–50
- Eslami A, Anvari S, Karimi N, and Mohamadi S (2022) Application of pixel-based and object-based approaches for LULC mapping in Jiroft region, SE Iran. *Ecopersia*. *Ecopersia* 10(1):71–83
- Ghorbani M and Firouzzare A (2010) Valuation of environment. Mashhad: Mashhad Ferdowsi University. (In Persian)
- Guo M, Ma S, Wang L-J and Lin C (2021) Impacts of future climate change and different management scenarios on water-related ecosystem services: A case study in the Jianghuai ecological economic Zone, China. *Ecological Indicators* 127:107732
- Guo Q, Yu C, Xu Z, Yang Y, and Wang X (2023) Impacts of climate and land-use changes on water yields: Similarities and differences among typical watersheds distributed throughout China. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 45:101294
- Haghdadi M, Heshmati GA, and Azimi MS (2018) Assessment of Water yield service on the basis of InVEST tool (case study: Delichai watershed). *Journal of Water and Soil Conservation*, Gorgan University Of Agricultural Sciences 25(4):275–290 (In Persian)
- Jahanishakib F, Erfani M, and Yusefi Rubiat E (2020) Explanation of effective drivers in environmental management of South Khorasan Province using structural analysis. *Journal of Spatial Planning* 24(1):109–127 (In Persian)
- Jokar H (2017) Assessment of Sediment retention ecosystem service using InVEST Software (Case Study: Dalichai Watershed, north of Hablehrood Basin). *Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources* (In Persian)
- Joorabian Shooshtari S, Shayesteh K, Gholamalifard M, Azari M, and López-Moreno JI (2021) Responses of surface water quality to future land cover and climate changes in the Neka River basin, Northern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* 193(7):411
- Karra K, Kontgis C, Statman-Weil Z, Mazzariello JC, Mathis M, and Brumby SP (2021) Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, IEEE, 4704–4707
- Khosravi Moshizi A (2015) Ecological assessment of semi-arid shrublands with an emphasis on ecosystem services (Case study: Bardsir, Kerman Province). *Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources* (In Persian)
- Li J, Zhou K, Xie B, and Xiao J (2021) Impact of landscape pattern change on water-related ecosystem services: Comprehensive analysis based on heterogeneity perspective. *Ecological Indicators* 133:108372

- Lian X, Qi Y, Wang H, Zhang J, and Yang R (2019) Assessing changes of water yield in Qinghai Lake Watershed of China. *Water* 12(1):11
- MA: Millennium ecosystem Assessment (2003) Ecosystems and their services. Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment, 49–70, Available at: <http://www.millenniumassessment.org/en/Framework.html>
- Mo W, Zhao Y, Yang N, Xu Z, Zhao W, and Li F (2021) Effects of climate and land use/land cover changes on water yield services in the Dongjiang Lake Basin. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 10(7):466
- Pirikiya M, Fallah A, Amirnejad H, and Mohamadi J (2021) Economic valuation of water production service in forest ecosystems (case study: Darabkola watershed). *Ecology of Iranian Forests, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University* 9(18):22–33
- Qi W, Li H, Zhang Q, and Zhang K (2019) Forest restoration efforts drive changes in land-use/land-cover and water-related ecosystem services in China's Han River basin. *Ecological Engineering* 126:64–73
- Rafiei-Sardooi E, Azareh A, Shoostari SJ, and Parteli EJR (2022) Long-term assessment of land-use and climate change on water scarcity in an arid basin in Iran. *Ecological Modelling* 467:109934
- Redhead JW, Stratford C, Sharps K, Jones L, Ziv G, Clarke D, Oliver TH, and Bullock JM (2016) Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. *Science of the Total Environment* 569:1418–1426
- Scordo F, Lavender TM, Seitz C, Perillo VL, Rusak JA, Piccolo MC, and Perillo GME (2018) Modeling water yield: Assessing the role of site and region-specific attributes in determining model performance of the InVEST seasonal water yield model. *Water* 10(11):1496
- Shafizadeh M and Zare Chahouki MA (2020) Modeling ecosystem production services (Water Production) in Taleghan Middel Watershed. *Iranian journal of Ecohydrology, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran* 7(2):411–419 (In Persian)
- Stein T, Kil N, Frank A, Adams AE, Adams DC, and Escobedo FJ (2013) Public land management agencies' and nonindustrial private forest landowners' perceptions about ecosystem services. *University of Florida–IFAS, EDIS, FOR 312*
- Su C and Fu B (2013) Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes. *Global and Planetary Change* 101:119–128
- USGS (2020) eModis NDVI V6. United States Geological Survey, Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov>
- Vigerstol KL and Aukema JE (2011) A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of Environmental Management* 92(10):2403–2409
- Wang Q-Q, Geng C-X, Wang L, Zheng T-T, Jiang Q-H, Yang T, Liu Y-Q, and Wang Z (2023) Water conservation and ecological water requirement prediction of mining area in arid region based on RS-GIS and InVEST: A Case Study of Bayan Obo Mine in Baotou, China. *Sustainability* 15(5):4238
- Wei P, Chen S, Wu M, Deng Y, Xu H, Jia Y, and Liu F (2021) Using the InVEST model to assess the impacts of climate and land use changes on water yield in the upstream regions of the Shule River Basin. *Water* 13(9):1250
- Yang D, Liu W, Tang L, Chen L, Li X, and Xu X (2019) Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: Applicability of the InVEST model. *Landscape and Urban Planning* 182:133–143
- Yang D, Liu W, Xu C, Tao L, and Xu X (2020a) Integrating the InVEST and SDSM Model for estimating water provision services in response to future climate change in monsoon basins of South China. *Water* 12(11):3199
- Yang X, Chen R, Meadows ME, Ji G, and Xu J (2020b) Modelling water yield with the InVEST model in a data scarce region of northwest China. *Water Supply, IWA Publishing* 20(3):1035–1045
- 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. *Water* 12(6):1692
- Zhang L, Dawes WR, and Walker GR (2001) Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water resources research. Wiley Online Library* 37(3):701–708
- Zhou W, Liu G, Pan J, and Feng X (2005) Distribution of available soil water capacity in China. *Journal of Geographical Sciences* 15:3–12