



## Spatial Gradient Modeling of Water Yield Service Using Invest in Northern Sub-Basins of Kerman Province

Malihe Erfani<sup>1</sup> | Sharif Joorabian Shooshtari<sup>2</sup> | Tahereh Ardakani<sup>3</sup> |  
Fatemeh Jahanishakib<sup>4</sup>

1. Corresponding Author, Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: [maliheerfani@uoz.ac.ir](mailto:maliheerfani@uoz.ac.ir)
2. Department of Nature Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran. E-mail: [joorabian@asnrukh.ac.ir](mailto:joorabian@asnrukh.ac.ir)
3. Department of Environmental Sciences & Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, P.O. Box 184, Ardakan, Iran. E-mail: [ardakani@ardakan.ac.ir](mailto:ardakani@ardakan.ac.ir)
4. Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran. E-mail: [jahanishakib@birjand.ac.ir](mailto:jahanishakib@birjand.ac.ir)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received: October 11, 2022

Received in revised form:

November 28, 2022

Accepted: April 3, 2023

Published online: April 14, 2023

#### Keywords:

Arid and semi-arid regions,  
Economic valuation,  
Ecosystem service,  
modeling.

### ABSTRACT

The ecosystem service of water yield is affected by damaging human activities, and the estimation of its quantity through modeling is the first step to sustainable management of this service. This research applied the InVEST hydrological model to quantify the ecosystem service of water yield and its valuation in the northern arid and semi-arid sub-basins of Kerman province. First, for modelling the water yield were entered the maps such as annual average precipitation, depth of root limiting layers, plant accessible water capacity, land use/land cover (LULC), and the boundaries of the basin and sub-basins, and the approximate amount of actual evapotranspiration (AET) in each pixel. Then maps of estimated water yield in each pixel was obtained. The model calculated 5112.43 million cubic meters of water with a value of more than 418500 billion Rials are produced annually, the highest amount of water yield is in sub-basin one (Abargho-Sirjan) with 2103 million cubic meters per year and the lowest amount of water yield in sub-region three (north Kavir-e lut) with the amount of 741.84 million cubic meters. The results showed that the value of supply the water yield service is strongly influenced by the spatial changes of LULC. Dense range lands produce 27630.7 MCM of water per hectare, and each hectare of dense forest can produce 1104.6 MCM of water. Therefore the role of vegetation shows the influence of water infiltration and feeding of aquifers in high areas. The results of this study can be used in spatial planning to reduce the destructive effects of floods and droughts, prevent land degradation and develop vegetation, feed aquifers, and also estimate damages in green accounting.

**Cite this article:** Erfani, M., Joorabian Shooshtari, Sh., Ardakani, T., & Jahanishakib, F. (2023). Spatial Gradient Modeling of Water Yield Service Using Invest in Northern Sub-Basins of Kerman Province. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (1), 63-81. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.349742.1024>





## مدل سازی گرادیان مکانی خدمت اکوسیستمی تولید آب با InVEST در زیر حوضه های شمالی استان کرمان

ملیحه عرفانی<sup>۱</sup> | شریف جورابیان شوشتری<sup>۲</sup> | طاهره اردکانی<sup>۳</sup> | فاطمه جهانی شکیب<sup>۴</sup>

۱. نویسنده مسئول، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: [maliheerfani@uoz.ac.ir](mailto:maliheerfani@uoz.ac.ir)

۲. گروه مهندسی طبیعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران. رایانامه: [joorabian@asnrk.ac.ir](mailto:joorabian@asnrk.ac.ir)

۳. گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران. رایانامه: [ardakani@ardakan.ac.ir](mailto:ardakani@ardakan.ac.ir)

۴. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: [jahanishakib@birjand.ac.ir](mailto:jahanishakib@birjand.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵

### کلیدواژه‌ها:

ارزش گذاری اقتصادی،

خدمات اکوسیستمی،

مدل سازی،

مناطق خشک و نیمه خشک.

خدمت اکوسیستمی تولید آب متأثر از فعالیت های مخرب انسانی است و اولین گام جهت مدیریت پایدار این خدمت، برآورد کمیت آن از طریق مدل سازی است. پژوهش حاضر با هدف به کارگیری مدل هیدرولوژیک InVEST در کمی سازی خدمت اکوسیستمی تولید آب و ارزش گذاری آن در زیر حوضه های خشک و نیمه خشک شمالی استان کرمان انجام شد. ابتدا، نقشه های میانگین بارندگی سالیانه، عمق لایه های محدود کننده ریشه، مقدار آب در دسترس گیاه، کاربری اراضی / پوشش سطح زمین (LULC) و مرز حوضه و زیر حوضه های منطقه به عنوان ورودی های مدل وارد شدند و نقشه مقدار تقریبی تبخیر و تعرق واقعی (AET) در هر پیکسل و نقشه تولید آب برآورد شده در هر پیکسل به دست آمد. بر اساس محاسبات انجام شده توسط مدل در منطقه مورد نظر، سالانه ۵۱۱۲/۴۳ میلیون مترمکعب آب با ارزشی بیش از ۴۱۸۵۰۰ میلیارد ریال تولید می شود که بیشترین مقدار تولید آب، در زیر حوضه یک (ابرقو- سیرجان) با ۲۱۰۳ میلیون مترمکعب در سال و کمترین میزان تولید آب، در زیر حوضه سه (کوپرلوت شمالی) با مقدار ۷۴۱/۸۴ میلیون مترمکعب است. نتایج نشان داد که سطح عرضه خدمت تولید آب به شدت تحت تأثیر تغییرات مکانی LULC است. به طوری که در مجموع، اراضی مرتعی پرتراکم ۲۷۶۳۰/۷ میلیون مترمکعب در هکتار و همچنین هر هکتار از جنگل پرتراکم، قادر به تولید ۱۱۰۴/۶ میلیون مترمکعب آب است که نقش پوشش گیاهی را در نفوذ آب و تغذیه آبخوان ها در مناطق مرتفع نشان می دهد. نتایج این مطالعه در برنامه ریزی مکانی جهت کاهش اثرات مخرب سیل و خشک سالی، جلوگیری از تخریب اراضی و توسعه پوشش گیاهی، تغذیه آبخوان ها و همچنین برآورد خسارت ها در حسابداری سبز قابل کاربرد است.

**استناد:** عرفانی، م، جورابیان شوشتری، ش، اردکانی، ط. و جهانی شکیب، ف (۱۴۰۲). مدل سازی گرادیان مکانی خدمت اکوسیستمی تولید آب با InVEST در زیر حوضه های شمالی استان کرمان. *تشریح مدیریت آب و آبیاری*، ۱۳ (۱)، ۶۳-۸۱.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.349742.1024>



## ۱. مقدمه

مفهوم خدمات اکوسیستمی (ES)<sup>۱</sup> در ابتدا برای نشان‌دادن مزایایی که اکوسیستم‌های طبیعی برای جامعه فراهم می‌آورند و همچنین جهت افزایش آگاهی در مورد تنوع‌زیستی و حفاظت از اکوسیستم توسعه یافت (Birkhofer *et al.*, 2015). در دهه‌های اخیر، خدمات اکوسیستم که نقش مهمی در تعادل اکوسیستم طبیعی و توسعه اجتماعی-اقتصادی ایفا می‌کنند، بیش از پیش از تخریب ناشی از فعالیت‌های انسانی و تغییرات آب‌وهوایی متأثر شده‌اند (Cui *et al.*, 2021). به‌عنوان تجلی مستقیم فعالیت‌های انسانی، تغییر کاربری اراضی/ پوشش سطح زمین (LULC)<sup>۲</sup> عامل محرک اصلی در تغییرات فرایندهای بوم‌شناختی و خدمات اکوسیستم است. از این‌رو، جهت مدیریت بهتر LULC در آینده، ارزیابی خدمات اکوسیستم متأثر از تغییر LULC و شناسایی روابط بین خدمات اکوسیستم ضروری است (Liang *et al.*, 2021). همچنین از آنجایی که خدمات اکوسیستم بنا به تعریف به کارکردهای بوم‌شناختی وابسته‌اند، انتظار می‌رود که آشکارکردن ارزش آن‌ها در تئوری، مدیران و سیاست‌گذاران را برای محافظت از این عملکردها ترغیب کند (Birkhofer *et al.*, 2015).

تولید آب یکی از حیاتی‌ترین خدمات ارائه‌شده توسط اکوسیستم‌ها است. منظور از تولید آب، مجموع میانگین بلندمدت جریان سالانه رودخانه‌ها و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی بوسیله بارش است (Haghdadi *et al.*, 2018). تولید آب برای توسعه پایدار اقتصاد و اکوسیستم منطقه‌ای اهمیت زیادی دارد و پاسخگوی نیاز آبیاری، تولیدات صنعتی و مصارف آب خانگی بوده و دارای ارزش سرگرمی و زیبایی‌شناختی است. همچنین بر عملکردهای بوم‌شناختی مانند زیست‌توده، چرخه کربن و خروجی رسوب تأثیر می‌گذارد (Yang *et al.*, 2021).

چندین مطالعه نشان داده‌اند که فعالیت‌های انسانی می‌تواند باعث تغییر در واکنش هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز شود و بر بارش، رواناب و فراوانی سیل تأثیر بگذارد (Sun *et al.*, 2015; Tahiru *et al.*, 2020). تغییرات LULC با تغییر سطح حوضه آبخیز بر عملکرد آب اثرگذار است (Song and Deng, 2017). با توجه به بهره‌برداری‌های مختلف از اراضی و تفاوت در میزان تولید آب در هر یک از این LULC، برآورد و پیش‌بینی تولید آب هر یک از این اراضی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Haghdadi *et al.*, 2018). کمبود آب یکی از معضلاتی است که معیشت مردم را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک تحت تأثیر قرار می‌دهد و از این‌رو می‌باید تعادل پایدار بین نیاز آب و منابع آب برقرار شود (Sharafatmandrad and Khosravi Mashizi, 2021; Yang *et al.*, 2020). جهت مدیریت پایدار خدمات اکوسیستم آب نیز اطلاعات قابل اعتماد برای حمایت از تصمیم‌گیری موردنیاز است (Benra *et al.*, 2021). این اطلاعات از طریق مدل‌سازی قابل‌حصول بوده و در این رابطه تاکنون مدل‌های هیدرولوژیک فراوانی برای برآورد تولید آب توسعه یافته‌اند که برخی از محبوب‌ترین آن‌ها عبارتند از مدل ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT<sup>3</sup>) (Munoth and Goyal, 2020)، مدل‌های ارزش‌گذاری یکپارچه خدمات اکوسیستم و معاملات (InVEST)<sup>۴</sup> (Zhao *et al.*, 2019) و مدل هوش مصنوعی برای خدمات اکوسیستمی (ARIES)<sup>۵</sup> (Bagstad *et al.*, 2015). از این بین، مدل InVEST به‌طور گسترده در ارزیابی عملکرد خدمات اکوسیستم، به‌ویژه در ارزیابی تأمین آب استفاده شده است. از مزایای این مدل، نیاز به داده‌های کمتر و کاربرد جهانی است (Yang *et al.*, 2021).

با وجود پیچیدگی ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستم، این مفهوم پیامدهای عمده‌ای بر توسعه پژوهش‌ها و سیاست‌های محیط‌زیستی در دهه‌های گذشته داشته است (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). طرح‌های پرداخت برای خدمات اکوسیستم (PES)<sup>۶</sup> از آن جمله است که سعی دارد هم‌زمان به حفاظت از اکوسیستم و برابری اجتماعی با حداقل هزینه دست یابد (López-Cubillos *et al.*, 2022). ارزش‌گذاری اقتصادی خدمات اکوسیستمی به روش‌های مختلف بازاری و غیربازاری (ترجیحات مصرف‌کننده)<sup>۷</sup> انجام می‌شود. روش‌های آشکارسازی ترجیحات مصرف‌کنندگان در

دو دسته کلی قرار می‌گیرند؛ روش‌های ترجیح آشکار شده<sup>۸</sup> (آن‌هایی که متکی بر مشاهده رفتار مردم برای اثبات ارزش خدمات اکوسیستمی هستند) و روش‌های ترجیح بیان شده<sup>۹</sup> (آن‌هایی که به‌طور مستقیم از مردم درباره ارزشی خدمات اکوسیستم، پرسیده می‌شود) (Ghermandi *et al.*, 2010). متأسفانه، جمع‌آوری داده‌های اولیه و خاص منطقه موردنظر جهت ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستم پرهزینه است، از این‌رو ارزش‌گذاری‌های تجربی منابع طبیعی برای سیاست‌گذاران و مدیران در بخش منابع طبیعی و محیط‌زیست اغلب در دسترس نیستند (Plummer, 2009).

در یک تلاش اولیه، Costanza *et al.* (1997) ارزش پولی ۱۷ سرویس اکوسیستمی را بین ۱۶ تا ۵۴ تریلیون دلار آمریکا در سال تخمین زد و موجی از پژوهش‌ها را در مورد چگونگی ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستمی آغاز کرد (TEEB, 2010). مرور منابع نشان می‌دهد که تعداد مقالات چاپ‌شده در سال‌های اخیر بسیار زیاد بوده، به‌طوری‌که در بررسی انجام‌شده در تاریخ ۲۷ فروردین‌ماه ۱۴۰۱ در گوگل اسکولار با جستجو عبارت water yield تعداد ۴۲۲۰ مقاله در سال ۲۰۲۲ چاپ شده و از سال ۲۰۲۱ و ۲۰۲۰ به‌ترتیب تعداد ۸۰۷۰۰ و ۲۸۵۰۰۰ مقاله تاکنون منتشر شده است که نگرانی بر هشدار تغییر اقلیم و کمبود آب را نشان می‌دهد. ارزش‌گذاری اقتصادی آب در تخصیص کارآمد منابع آب، اتخاذ سیاست‌های مناسب و تصمیمات مؤثر، دارای نقش مهم و تعیین‌کننده‌ای است (Ghobadi and Moridi, 2022). دو نمونه از مطالعات اخیر در خصوص ارزش‌گذاری اقتصادی آب در ایران توسط Balali and Kasbian Lal (2022) و Pirikiya *et al.* (2021) انجام شده است. Balali and Kasbian Lal (2022) ارزش‌گذاری آب زیرزمینی را در منطقه دشت همدان - بهار در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ انجام دادند و ارزش اقتصادی هر مترمکعب از این منبع را بین ۳۵۴۳ ریال تا ۴۵۳۸ ریال در مناطق مختلف این دشت تخمین زدند. براساس مطالعه Pirikiya *et al.* (2021) بیش‌ترین میزان تولید رواناب به‌ترتیب در LULC انسان‌ساخت، کشاورزی و باغی و به مقدار ۳۷۴۳، ۳۶۰۱ و ۳۵۹۲ مترمکعب در هکتار به‌دست آمد که بیان‌گر نقش تاج پوشش درختان جنگلی و چگونگی توزیع مکانی آن‌ها بر افزایش نفوذ آب در خاک و کاهش تولید رواناب دارد. ارزش آب نیز در دامنه ۲۴ تا ۴۳ میلیون ریال در هر هکتار در نوسان بود. از مطالعات اخیر منتشرشده در خصوص مدل‌سازی خدمت تولید آب با مدل InVEST می‌توان به مواردی اشاره کرد.

در مطالعه Jafarzadeh *et al.* (2019) در حوضه میسرخان ناحیه زاگرس به تأثیر LULC بر تولید آب با مدل InVEST پرداختند و دریافتند که LULC زراعت بیش‌ترین میزان تولید آب به میزان ۲۴۴۹ مترمکعب در هکتار را نسبت به سایر LULCها (مرتع با ۲۱۹۶، جنگل با ۲۲۶۹ و باغ با ۲۲۵۷ مترمکعب در هکتار) برخوردارند. مطالعه Yang *et al.* (2020) در حوضه آبخیز خشک دریاچه بوستن در شمال‌غربی چین نشان داد که ظرفیت تولید آب، که با بارش همبستگی مثبت دارد، در پوشش اراضی مرتع بیش‌ترین و در زمین‌های زیر کشت و بایر کم‌ترین است. مطالعه Sharafatmandrad and Khosravi Mashizi (2021) در جیرفت نشان داد که خدمت تولید آب در مراتع بوته‌ای - علفی و جنگلی برگ‌ریز به‌ترتیب با ۱۱۰۰ دلار و ۹۳۶ دلار در هکتار بالاترین مقادیر در بین انواع LULC بودند. Adelisardou *et al.* (2021) اثر تغییرات LULC شامل افزایش زمین‌های زراعی و شهری و کاهش اراضی بایر، آب و جنگل در جیرفت را بر تولید آب بررسی و این اثر را منفی برآورد کردند. Cui *et al.* (2021) در مطالعه خود در اکتون جنگلی - استپی نشان دادند که گسترش زمین زراعی و شهرنشینی تأثیر مثبتی بر تولید آب داشته است. مطالعه انجام‌شده توسط Balist *et al.* (2022) در حوضه رودخانه سیروان واقع در استان‌های کردستان و کرمانشاه حاکی از کاهش تولید آب تحت تأثیر تغییرات LULC و تغییرات اقلیمی طی یک فرایند پیچیده است. Yang *et al.* (2021) در مطالعه دیگری تغییرات زمانی و مکانی تولید آب و عوامل کنترل‌کننده آن را در حوضه رودخانه زرد چین بررسی کردند و نشان دادند که تأثیر بارش بر تولید آب معنادارتر از LULC است. اثربخشی مناطق حفاظت‌شده در حفاظت از خدمات

اکوسیستم از جمله تولید آب در سرادوی برزیل در مطالعه Resende *et al.* (2021) مورد توجه قرار گرفت و شواهدی مبنی بر بهتر از حد انتظار عمل کردن شبکه مناطق حفاظت‌شده نسبت به سایر اراضی ارائه شد. براساس نتایج مطالعه Benra *et al.* (2021) در ۲۲۴ حوضه آبخیز در جنوب شیلی تخمین‌های سالانه تولید آب با مدل InVEST تطابق خوبی بین مقادیر مشاهده‌شده و مدل‌سازی‌شده، به‌ویژه برای مقادیر کم‌تر از ۱۰۰۰ میلی‌متر در سال نشان داد. همچنین پیش‌بینی‌های بهتر در مناطق با بارندگی زیاد و در سال‌های خشک مشاهده شد، درحالی‌که پیش‌بینی‌های ضعیف‌تر در مناطق تحت سلطه برف و خشک‌تر مشاهده شد. در مطالعه Ma *et al.* (2021)، در پناهگاه بوم‌شناختی چوان-دیان چین خدمات اکوسیستمی و از جمله خدمت تولید آب برای انواع مختلف پوشش گیاهی بررسی شد و نشان داده شد که به‌جز تولید آب، جنگل‌های طبیعی خدمات اکوسیستمی بالاتری را نسبت به سایر انواع پوشش گیاهی ارائه می‌کنند. Wu *et al.* (2022) تولید آب در رودخانه Weihe در استان Shaanxi کشور چین از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۹ شبیه‌سازی کردند و اثرات عوامل اقلیمی و LULC را مورد بحث قرار داد. نتایج آن‌ها نشان داد که تولید آب انواع مختلف LULC متفاوت است و مقدار آن در مناطقی با توزیع وسیع اراضی ساخت‌وساز شده و علفزار بیش‌تر از سایر LULC‌ها است.

همان‌طوری‌که پیش‌تر بیان شد، تغییرات اقلیمی و LULC در دهه‌های اخیر تشدید شده است که می‌تواند منجر به تشدید تنش‌های اجتماعی و بوم‌شناختی از طریق افزایش تقاضا برای آب به‌ویژه در مناطق خشک شود (Balist *et al.*, 2022). پیش‌بینی‌ها حاکی از کاهش ۵ تا ۲۵ درصد بارندگی سالانه در خاورمیانه و ۲۰ تا ۲۵ درصد در ایران است (Mansouri Daneshvar *et al.*, 2019). علاوه بر این، سوء مدیریت منابع آب، مساله را چالش برانگیزتر می‌کند. از این‌رو ارزیابی موجودی آب، تغییرات احتمالی آن و استفاده‌های فعلی و آینده آب مورد نیاز برای حفظ کیفیت اقتصادی و محیط‌زیست مورد نیاز است (Bozorg-Haddad *et al.*, 2020). استان کرمان یکی از استان‌های کشور است که با کمبود شدید آب دست به گریبان بوده به‌نحوی که عمده آب مصرفی آن از منابع زیرزمینی تأمین می‌شود (Management and Planning Organization of Kerman province, 2018). تغییر شدید LULC در اثر خشک‌سالی‌های ممتد و سوء مدیریت سرزمین نیز بر خدمت اکوسیستمی تولید آب اثرگذار بوده و از آنجایی‌که میزان تولید آب وابسته به نوع LULC است (Adelisaridou *et al.*, 2021)، تجزیه و تحلیل روابط بین LULC و خدمت تأمین آب در این استان جهت برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار این خدمت اکوسیستمی ضروری است. همچنین با توجه به این‌که در اکثر مطالعات نتایج مدل‌سازی خدمت اکوسیستمی تولید آب، ارزش‌گذاری نشده‌اند، مطالعه حاضر با درک این خلاء اطلاعاتی سعی در ارزش‌گذاری اقتصادی این خدمت اکوسیستمی به‌صورت مکانی دارد. از این‌رو مطالعه حاضر در بخش شمالی استان کرمان که دارای اقلیم خشک‌تر و کم‌آبی بیش‌تر است و بنابراین اهمیت این خدمت اکوسیستمی بالاتر است، جهت پاسخ‌دادن به سؤالات زیر انجام شد:

- ۱- مقدار و توزیع فضایی تولید آب در زیرحوضه‌های آبخیز شمال استان کرمان چقدر است؟
- ۲- تغییرات تولید آب در انواع مختلف LULC چگونه است؟
- ۳- ارزش اقتصادی خدمت اکوسیستمی تولید آب چقدر است؟

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. منطقه مورد مطالعه

استان کرمان پهناورترین استان ایران با مساحت ۶۸۹۱۱۱ کیلومتر مربع است که بیش از ۱۱/۱۵ درصد از مساحت کشور را به خود اختصاص داده است. این استان در جنوب‌شرقی فلات ایران و بین ۵۴ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۴

دقیقه طول شرقی و ۲۶ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱) (سالنامه آماری استان کرمان، ۱۳۹۶). استان کرمان با متوسط بارندگی سالیانه ۱۲۹ میلی‌متر جزو مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شود و از نظر تقسیمات هیدرولوژیک در دو حوضه درجه یک؛ الف- ایران مرکزی، ب- خلیج فارس واقع شده که این دو حوضه، خود به شش حوضه درجه دو تقسیم می‌شوند. مطالعه حاضر در زیرحوضه‌های مربوط به حوضه ایران مرکزی انجام شد. دلیل در نظر گرفتن این زیرحوضه‌ها، اقلیم متفاوت و خشک‌تر آن نسبت به زیرحوضه‌های جنوبی استان است. به نحوی که براساس ضریب خشکی دومرتن شمال استان بیش‌تر خشک و فراخشک و جنوب آن تنوعی از اقلیم‌های مذکور و اقلیم‌های نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای دارد. از نظر تطابق با زیرحوضه‌های شماره دو کشور می‌توان زیر حوضه شماره یک تا چهار را به ترتیب ابرقو- سیرجان، کویر در انجیر و کویر لوت شمالی و میانی نامید. زیرحوضه کویر لوت در استان کرمان به علت وسعت زیاد با توجه به تغییرات لایه رقمی ارتفاع (DEM) به سه بخش تقسیم شد که دو بخش شمالی و میانی آن به علت شباهت اقلیمی با سایر زیرحوضه‌های مورد بررسی، در این مطالعه در نظر گرفته شدند (شکل ۱). به‌طوربه‌طور کلی، ۷۶۴۰۰ کیلومترمربع از حوضه آبخیز کویر لوت در این استان واقع شده است که در برگیرنده بخشی از شهرستان‌های کرمان، جیرفت، شهرستان‌های بم و راور است. رودخانه‌های نساء فاشکوه، تهرود، سیرچ، شهداد، شیرین رود و قدرونی رودخانه‌های مهم این حوضه می‌باشند. حوضه آبخیز ابرقو- سیرجان مساحت ۳۳۱۱۴ کیلومترمربع داشته و در غرب استان کرمان واقع شده و شهرستان‌های سیرجان و شهربابک در این محدوده قرار دارند. در این حوضه جریان آب کلیه رودخانه‌ها و مسیل‌ها به سمت کویرهای سیرجان، قطرویه و مروست جریان می‌یابند و پرآب‌ترین رودخانه آن تنگویی است. حوضه آبخیز کویر در انجیر نیز مساحت ۳۱۷۹۴ کیلومترمربع داشته و در شمال استان واقع شده است. شهرستان‌های بردسیر، زرند، رفسنجان و بخشی از شهرستان کرمان در این محدوده قرار دارد و رودخانه‌های آن عبارتند از هفت کوسک، چاری، آبخشاء، گیودری، شور و چادرچی.

سطح عمده زیرحوضه‌های آبخیز مورد مطالعه به LULC بایر، مراتع کم‌تراکم و پرتراکم اختصاص دارد. جدول (۱) مساحت هر یک از LULC را نشان می‌دهد. بیش از ۹۰ درصد آب استان از طریق آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود و عمده مصرف آن در بخش کشاورزی و پس از آن در بخش شرب و صنعت قرار دارد (Sahidasht and Abasnejad, 2011).

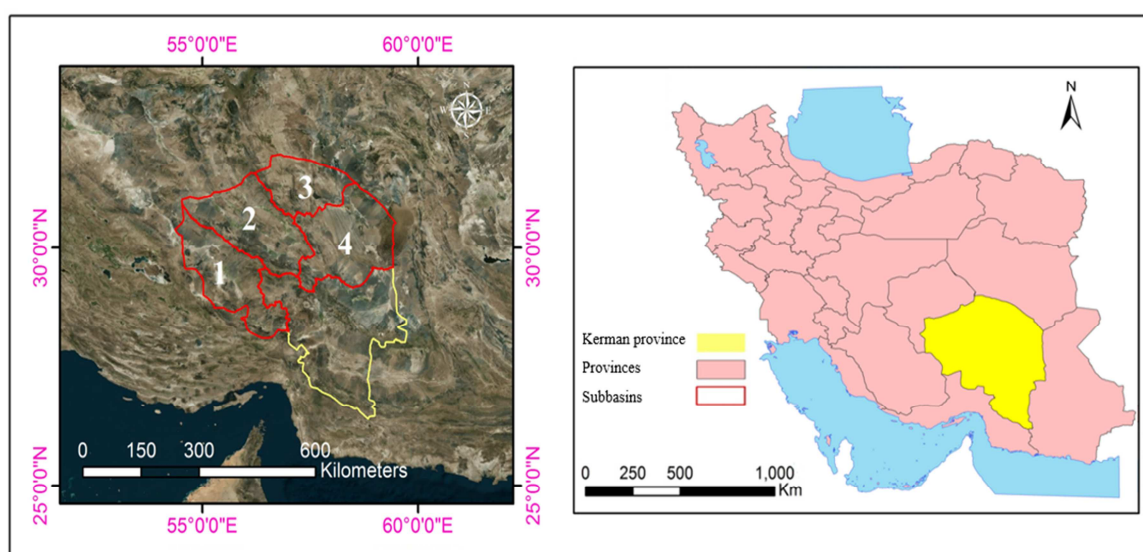


Figure 1. Geographical location of the study area in Kerman province and number of sub-basins

## ۲.۲. روش پژوهش

مدل InVEST میزان آب را در نقاط مختلف یک حوضه آبخیز تخمین می‌زند و نشان می‌دهد چگونه تغییر در الگوی LULC میزان تولید آب و عملکرد آن در بخش‌های مختلف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این مدل، جریان آب را با ترکیب جریان آب‌های سطحی و زیرزمینی ساده‌سازی می‌کند، با این فرض که آب‌های زیرزمینی همان مسیر جریان را مانند آب‌های سطحی دنبال می‌کنند. تولید آب در هر پیکسل به‌عنوان مقدار بارندگی سالانه که تبخیر نمی‌شود محاسبه و با ویژگی‌های پوشش گیاهی پیکسل تعیین می‌شود (Daneshi *et al.*, 2021). ورودی‌های مدل عبارتند از لایه‌های رستری شامل LULC، میانگین بارش سالیانه، پتانسیل ET مرجع، عمق لایه محدودکننده ریشه و میزان آب در دسترس گیاه (PAWC)، لایه وکتوری حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها، پایگاه داده‌های زیستی- فیزیکی LULC (جدول بیوفیزیکال) و فاکتور فصل‌گرایی (Z). در پژوهش حاضر این مدل در نرم‌افزار InVEST 3.9.0 اجرا شد. اجرای معادلات برای به‌دست‌آوردن تولید آب در این نرم‌افزار در حالت جعبه‌سیاه انجام می‌شود که جهت شفافیت بیش‌تر روش کار در ادامه به جزئیات روش و سپس نحوه تهیه داده‌های ورودی پرداخته شده است.

مدل تولید آب InVEST بر پایه منحنی بادیکو براساس تعادل آب و انرژی موجود است و طبق تعریف آن، تولید آب میزان آبی است که از خروجی حوضه خارج می‌شود و از تفریق میزان بارش از تبخیر- تعرق (ET) و نفوذ سطحی حاصل می‌شود. این رویکرد فرض می‌کند نرخ ET به‌طور مستقیم به منابع آبی در دسترس (بارش) و نیاز اتمسفر (ET) بستگی دارد (Shirmohammadi *et al.*, 2020). منحنی بادیکو یک تابع تجربی است که ارتباط نسبت AET به بارش را نسبت به تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) به بارش نشان می‌دهد. عملکرد سالیانه آب  $Y_j(x)$  در پیکسل  $x$  درون حوضه آبخیز را می‌توان با توجه به LULC نوع  $Z$  با توجه به معادله (۱) تخمین زد که در آن  $AET_j(x)$  همان AET سالانه و  $P(x)$  بارش سالانه در پیکسل  $x$  می‌باشد (Sharafatmandrad and Khosravi Mashizi, 2021). به علاوه نسبت  $AET_j(x) / P(x)$  با استفاده از مدل Zhang *et al.* (2001) محاسبه می‌شود (معادله ۲).

$$Y_j(x) = \left(1 - \frac{AET_j(x)}{P(x)}\right) \cdot P(x) \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\frac{AET_j(x)}{P(x)} = \frac{1 + \omega(x)R_j(x)}{1 + \omega(x)R_j(x) + 1/R_j(x)} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن،  $R_j(x)$  شاخص خشکی بادیکو در پیکسل  $x$  هنگامی که LULC نوع  $Z$  است و  $w(x)$  که با معادله (۳) محاسبه می‌شود، نسبت بدون واحدی از آب قابل دسترس گیاهان به مدت بارندگی است. در معادله (۳)،  $AWC(x)$  حجم آب قابل دسترس گیاه است که نشان‌دهنده میزان آبی است که می‌توان در خاک نگه داشت و در اختیار گیاهان قرار داد و  $Z$  ضریب ژانگ می‌باشد که یک پارامتر بارندگی فصلی است (Zhou *et al.*, 2005). معادله (۴) جهت محاسبه شاخص خشکی بادیکو استفاده شد، که  $ET_o(x)$  همان تبخیر- تعرق مرجع (RET) و  $k_j(x)$  ضریب ET پوشش گیاهی در پیکسل  $x$  است (Allen *et al.*, 1998).

$$\omega(x) = Z \cdot \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$R_j(x) = \frac{K_j(x) \cdot ET_o(x)}{P(x)} \quad \text{رابطه ۴}$$

## ۳.۲. داده‌های مورد استفاده در مدل Water Yield

لایه حوضه‌ها و زیرحوضه‌های آبخیز از لایه DEM ماهواره استر (SRTM 1 Arc-Second Global) دانلود شده از

سایت <https://earthexplorer.usgs.gov/> استخراج شده و تبدیل به وکتوری شد. همه لایه‌های رستری مورد استفاده در این مطالعه با اندازه پیکسل ۳۰×۳۰ متر و سیستم تصویر مشابه (GCS\_WGS\_1984) تهیه شدند که در ادامه نحوه به‌دست‌آوردن هر یک توضیح داده شده است.

#### ۱.۳.۲. لایه LULC

این لایه با رویکرد پیکسل- پایه تهیه شد (Eslami *et al.*, 2022). به این منظور ابتدا از سایت Esri لایه LULC حاصل از تفسیر تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ با درجه تفکیک ده متر و با دقت بالاتر از ۸۵ درصد مربوط به سال ۲۰۲۰ تهیه شد. این لایه با کمک مدل‌های یادگیری عمیق آموزش دیده طبقه‌بندی شده است (Karra *et al.*, 2021). در ادامه با تصاویر گوگل‌ارث تطابق داده شد و از صحت بالای آن برای منطقه مورد مطالعه اطمینان حاصل گردید. در مرحله بعد هر کدام از طبقات جنگل‌ها و مراتع براساس آماره میانه شاخص پوشش گیاهی (NDVI) مستخرج از تصاویر مادیس ۱۱ سپتامبر ۲۰۲۰ (eModis NDVI V6) دانلود شده از سایت [\(https://earthexplorer.usgs.gov/\)](https://earthexplorer.usgs.gov/) به دو طبقه کم‌تراکم و پرتراکم تفکیک شد. در نهایت، پس از تبدیل اندازه پیکسل دو لایه به ۳۰ متر، هشت طبقه شامل پلایا، مناطق مسکونی، اراضی کشاورزی، اراضی بایر، جنگل‌های پرتراکم، جنگل‌های کم‌تراکم، مراتع پرتراکم و مراتع کم‌تراکم به‌دست آمد.

#### ۲.۳.۲. لایه بارش

در مطالعه حاضر، از داده‌های اقلیم و آب‌وهوای جهانی (WorldClim version 2.1) جهت تولید نقشه میانگین بارش سالانه استفاده شد.

#### ۳.۳.۲. لایه ET

از مدل تورک جهت تولید لایه رستری ET مرجع به کمک معادله (۵) استفاده شد.

$$ET_o = aT * 0.013 * \frac{T_{mean}}{T_{mean}+15} * \frac{23.8856*Rs+50}{\gamma} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن،  $ET_o$  همان ET روزانه ( $\text{mm.d}^{-1}$ )،  $T_{mean}$  دمای متوسط روزانه برحسب درجه سانتی‌گراد،  $Rs$  تشعشع خورشیدی ( $\text{MJ.M}^{-2}.\text{d}^{-1}$ )،  $\mu$  گرمای نهان تبخیر ( $\text{MJ.Kg}^{-1}$ ) است.

#### ۴.۳.۲. لایه عمق لایه محدودکننده ریشه

این نقشه رستری نشان‌دهنده میانگین عمق لایه محدودکننده ریشه در هر پیکسل می‌باشد. عمق خاک منطقه مورد مطالعه از پایگاه داده جهانی خاک (FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2009) به‌دست آمد. به‌علاوه حداکثر عمق ریشه برای انواع مختلف LULC براساس (1996) Canadell *et al.* و (2011) Tallis *et al.* به‌دست آمد.

#### ۵.۳.۲. لایه ظرفیت آب قابل دسترس گیاه

ظرفیت آب قابل دسترس گیاه طبق معادله (۶) محاسبه شد:

$$PAWC = 54.509 - 0.132 * SAND - 0.003 * SAND^2 - 0.055 * SILT - 0.006 * SILT^2 - 0.738 * CLAY + 0.007 * CLAY^2 - 2.688 * SOC + 0.501 * SOC^2 \quad \text{رابطه (۶)}$$



که در آن، SAND، SILT، CLAY و SOC به ترتیب بیانگر نسبت شن، سیلت، رس و مواد آلی در خاک می باشند. لایه های عمق و بافت خاک از لایه پایگاه داده جهانی خاک به دست آمدند (Fischer *et al.*, 2008). پارامتر Z به عنوان یک ضریب ثابت، ویژگی های بارش را در دامنه یک تا ۳۰ ارائه می کند و هنگامی که رخدادهای بارش بیش تر باشند میزان آن نیز بیش تر است. این ثابت می تواند با معادله  $0.2 * N$  تخمین زده شود که N تعداد رخدادهای بارش در سال ( $N > 1 \text{ mm}$ ) است. بررسی ها نشان داده است که این مدل بالاترین حساسیت را به مقادیر پارامتر Z و بارش دارد (Haghdadi *et al.*, 2018). بنابراین در این مطالعه پس از مکاتبه با سازمان هواشناسی استان و تعیین تعداد رخدادهای بارش در سال در شمال استان کرمان میزان این پارامتر ۸ در نظر گرفته شد.

### ۶.۳.۲. جدول بیوفیزیکی

داده های ضرایب بیوفیزیکی مورد استفاده در مدل براساس طبقات LULC در جدول بیوفیزیکی وارد می شود. این داده ها ویژگی های هر طبقه LULC را به جای ویژگی های هر سلول در نقشه رستری دارا هستند (جدول ۱). هر ردیف یک طبقه LULC و هر ستون شامل یک ویژگی متفاوت هر طبقه LULC است و باید در آن LuCode حاوی عدد صحیح برای هر طبقه LULC، LULC\_desc، LULC توصیف نام هر کلاس LULC، LULC\_Veg دارای مقدار یک برای طبقات LULC گیاهی و صفر برای سایر طبقات، Root\_depth حداکثر عمق ریشه برای طبقات پوشش گیاهی (میلی متر) و  $K_c$  ضریب ET گیاه برای هر طبقه LULC باشد. ضریب ET مربوط به  $k_j$  در پیکسل x با توجه به نوع LULC ( $K_j$ ) با توجه به معادله (۷) محاسبه می شود. این ضریب بسته به نوع LULC در محدوده صفر تا ۱/۵ قرار دارد (Sharp *et al.*, 2018) و مقادیر آن در جدول (۱) ارائه شده است.

$$K_j(x) = \frac{\sum_{m=1}^{12} K_{j,m}(x) \cdot (ET_o(x))_m}{\sum_{m=1}^{12} (ET_o(x))_m} \quad (\text{رابطه ۷})$$

مدل تولید آب در مقیاس پیکسل محاسبه می شود و به دنبال آن در مقیاس های زیرحوضه و حوضه نیز نتایج را ارائه می کند.

**Table 1. Biophysical table used in Kerman province to implement the water production model**

Land use/land cover	Kc	Root depth	Area (ha)
Playa	1	0	8944.65
Sparse forest	0.5	1200	160112.34
Dense forest	0.5	1200	217604
Agriculture	0.7	800	269466.75
Residential	0.6	0	101122.74
Bare	0.1	5	3244385
Sparse range	0.5	1000	3375481
Dense range	0.5	1000	4750376.13

### ۴.۲. ارزش گذاری اقتصادی خدمت تولید آب

با توجه به وضعیت آب استان جهت ارزش گذاری اقتصادی آب، عمده ترین منبع تأمین آب (چاه ها) و عمده ترین مصرف آن (کشاورزی) مورد توجه قرار گرفت. از آنجائی که در ارزش گذاری سوبسیدها را نباید در نظر گرفت، هزینه برداشت آب غیرمجاز مبنای کار قرار گرفت. از این رو، قیمت سایه ای که به معنی بالاترین قیمتی است که کسی مایل است برای یک واحد اضافی از خدمتی بپردازد، برای آب در نظر گرفته شد. در مطالعه Gholami (2013) ارزش گذاری منابع آب در بخش های مختلف استان کرمان به روش داده- به کارگیری عوامل- ستاده و با کمک برنامه ریزی ریاضی محاسبه شد. در این مطالعه قیمت های سایه ای آب کشاورزی، صنعت و شرب برای هر مترمکعب به روش داده- ستاده، به ترتیب برابر با

۱۳۹۹۰ ریال، ۲۵۵۷۰ ریال و ۲۵۶۶۰ ریال به دست آمد، که نشان دهنده قیمت حقیقی آب در سال ۱۳۹۱ است. با اعمال نرخ تورم از طریق محاسبه گر نرخ تورم درگاه ملی آمار ایران ([www.amar.org.ir](http://www.amar.org.ir)) با وارد کردن سال و مبلغ مربوط به قیمت، هزینه آب کشاورزی برای سال ۱۴۰۰ طبق معادله ذیل محاسبه شد:

= ارزش ریالی مبلغ در مقطع زمانی مورد نظر

مبلغ ریالی  $\times$  (عدد شاخص در مقطع زمانی اول / عدد شاخص در مقطع زمانی مورد نظر)

در نهایت، هزینه آب برای LULC کشاورزی، مبلغ ۸۱۹۴۹ ریال (تقریباً معادل ۸۲۰۰ تومان) برای هر مترمکعب آب

در سال ۱۴۰۰ جهت ارزش گذاری در نظر گرفته شد.

## ۳. نتایج و بحث

### ۳.۱. داده های ورودی مدل

نتایج حاصل از تهیه نقشه های ورودی مدل تولید آب در شکل (۲) ارائه شده اند. نقشه میانگین سالانه بارش از ۱۰۷ تا ۲۳۱ میلی متر در شمال استان کرمان در شکل (۲-ا) نشان داده شده است. میزان ET مرجع نیز در دامنه ۱/۱۲۹۲ تا ۸/۱۷۵۶ میلی متر محاسبه شد (شکل ۲-ب). نقشه عمق خاک نشان داد دامنه مقادیر از صفر تا ۸۱ میلی متر در منطقه مورد مطالعه می باشد (شکل ۲-ج). ظرفیت آب قابل دسترس گیاه از ۰/۱۵ تا ۰/۵۴ به دست آمد (شکل ۲-د).

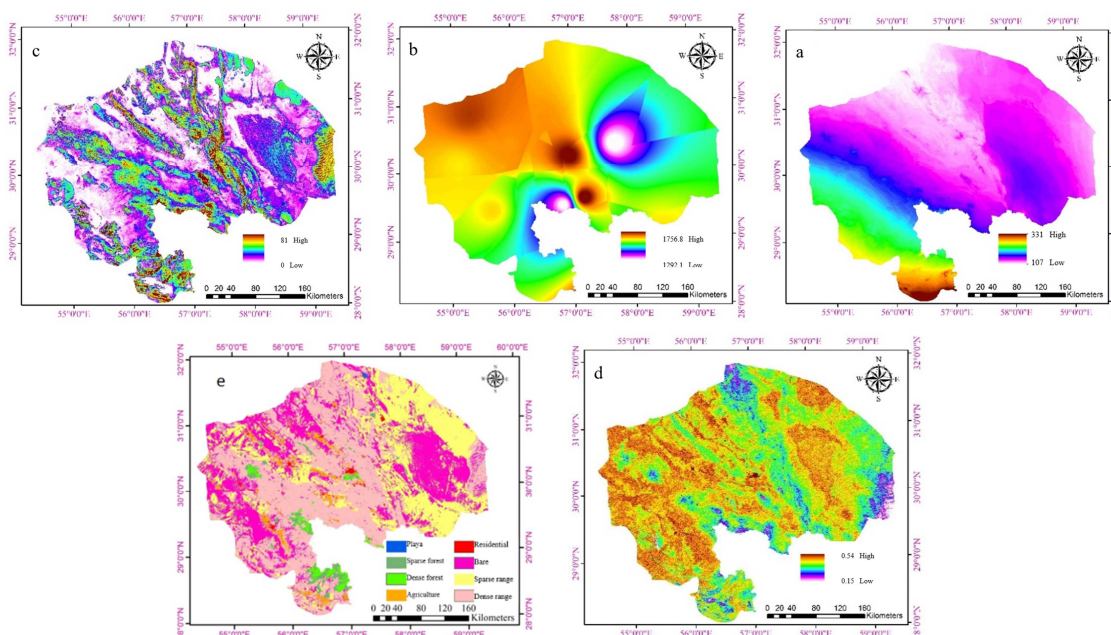


Figure 2. Maps used in the InVEST water yield model a: annual average precipitation, b: reference evapotranspiration, c: soil depth, d: plant accessible water capacity and e) land use/land cover

### ۳.۲. مدل تولید آب

با استفاده از مدل InVEST 3.9.0 میزان تولید آب در هر پیکسل و هر زیرحوضه به دست آمد. دامنه تغییرات میزان تولید آب در سطح پیکسل در استان کرمان از صفر تا ۱۷۷/۴ میلی متر بوده و بیشترین میزان تولید آب در جنوب و جنوب غرب محدوده مورد مطالعه مدل سازی شد (شکل ۳).

نتایج نشان داد میزان مجموع آب تولیدشده و AET به‌دست‌آمده در طبقه LULC مختلف به‌شرح جدول (۲) است. بیش‌ترین میزان کل تولید آب در مرتع پرتراکم و پس از آن در LULC مرتع کم تراکم مشاهده شد. میانگین تولید آب در هر هکتار در اراضی کشاورزی بالاترین و در اراضی پلایا و مسکونی کم‌ترین مقدار به‌دست آمد (جدول ۲). بررسی میزان تولید آب در سطح زیرحوضه‌ها نشان‌دهنده این است که زیرحوضه شماره ۱ با میزان ۲۱۰۳ میلیون مترمکعب در سال بیش‌ترین و زیرحوضه شماره ۳ با ۷۴۱/۸ میلیون مترمکعب در سال کم‌ترین میزان تولید آب را دارند (جدول ۳). میزان AET در هر پیکسل در منطقه مورد مطالعه در دامنه ۵۶ تا ۲۹۴ میلی‌متر تخمین زده شد (شکل ۴).

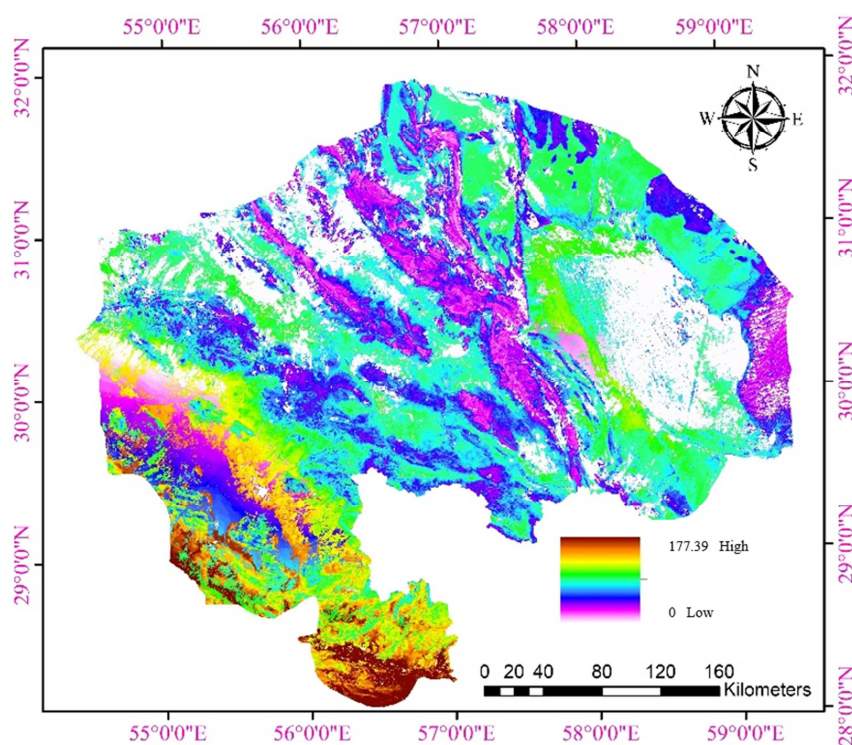


Figure 3. Map of water yield per pixel (mm)

Table 2. Amount of produced water ( $M^3/ha$ ) in different land use/covers in Kerman province

LULC	Sum	Mean	Min	Max	SD
Playa	0	0	0	0	0
Sparse forest	1663704961.6	659.7	69.2	1703.4	260.6
Dense forest	1104558789.7	620.9	38.7	1461.5	197.3
Agriculture	2201157216.7	735.8	71.01	1481.1	275.2
Residential	0	0	0	0	0
Bare	3058259198	84.9	0	1679.9	187.1
Sparse range	21049121921.5	561.8	60.6	1681.9	187
Dense range	27630736571.7	524	11.9	1766.5	268.1

Table 3. Actual evapotranspiration, precipitation and produced water in each sub-basin in Kerman province

Sub-Basin	Water yield ( $M^3/ha/year$ )	Water yield (MCM/year)	Precipitation (mm)	Actual evapotranspiration (mm)	Area (ha)
1	673.9	21030.0	192.6	125.2	3120030
2	328.03	1110.3	130.2	97.4	3385030
3	375.6	741.8	122.7	85.2	1975200
4	317.2	1157.1	135.1	103.4	3647700

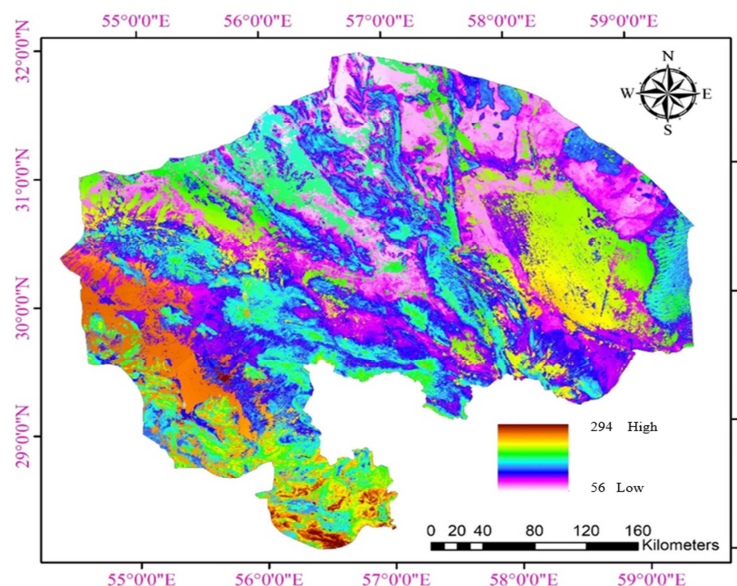


Figure 4. Estimated actual evapotranspiration per pixel (mm)

زیرحوضه‌های شماره ۱ و ۴ بالاترین میزان تولید آب را داشته (جدول ۴) و LULC‌های مرتع پرتراکم و کم‌تراکم و اراضی بایر بالاترین مقدار ارزش تولید آب را دارند. براساس آماره‌های مربوط به میانگین ارزش پیکسل‌ها نیز اراضی کشاورزی، جنگل کم تراکم و پرتراکم بیش‌ترین سهم را در ارزش خدمت تولید آب استان دارند (جدول ۵). ارزش کل تولید آب منطقه ۴۱،۸۵۰،۴۳۸،۳۶۷،۵۷۰ تومان است.

Table 4. The economic value of water yield service under sub-basins in 2021

Sub-basin	Total value of water yield (Rail)	Pixel statistics of each sub-basin			
		Mean	Min	Max	SD
1	172000348873000	497364320	0	130374750	253838460
2	90966110720000	242082320	0	582307940	167960430
3	60730816888200	277230070	0	531001880	170368950
4	94807107194500	234146630	0	587294560	1915627290

Table 5. The economic value of water yield service by land use class in 2021

LULC	Total value of water yield (Rail)
Playa	0
Sparse forest	136423806851200
Dense forest	90573820755400
Agriculture	180494891769400
Residential	0
Bare	250777254236000
Sparse range	1726027997563000
Dense range	2265720398879400

### ۳. بحث

در این پژوهش، به منظور برآورد دقیق منابع آب مناطق شمالی استان کرمان، هم‌چنین شناسایی مناطق تولیدکننده آب و در نهایت برآورد کمبود یا مازاد این منبع استراتژیک از تکنیک‌های مدل‌سازی بهره گرفته شد. واضح هست که مسئله مدیریت منابع آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، همیشه به‌عنوان یک چالش بزرگ مطرح بوده است و به‌تازگی هم به‌دلیل رشد جمعیت و متعاقب آن افزایش تقاضا برای این منبع و از طرف دیگر، عواملی مانند تغییرات اقلیمی بر روی

میزان عرضه این منبع تأثیر گذاشته و به تبع آن منجر به بزرگ‌تر شدن این چالش شده است. بنابراین بررسی وضعیت موجود و پیش‌بینی شرایط پیش‌روی منابع آب از اهمیت زیادی در امر برنامه‌ریزی برخوردار می‌باشد. نتایج این پژوهش جهت بررسی مقوله مطرح‌شده نشان داد که وضعیت بارش که در مقوله تولید آب نقشی بسیار حیاتی دارد، در منطقه مورد مطالعه (شکل ۳) از شمال به جنوب افزایشی است و کم‌ترین میزان بارش ۱۰۷ میلی‌متر در شمالی‌ترین نقطه منطقه در زیرحوضه‌های ۲ و ۳ و بیش‌ترین میزان بارش در جنوبی‌ترین قسمت و ۳۳۱ میلی‌متر در زیرحوضه شماره ۱ است. پارامتر ET مرجع نقش مؤثری در تعیین میزان تولید آب دارد، چرا که باعث از بین رفتن بخش بزرگی از بارش می‌شود. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده، کم‌ترین میزان آن ۱۲۹۲/۱ میلی‌متر واقع در زیر حوضه‌های شماره ۲ و ۴ و بیش‌ترین میزان آن ۱۷۵۶/۸ میلی‌متر واقع در زیرحوضه شماره ۲ است. پارامتر بعدی عمق لایه محدودکننده ریشه (میلی‌متر) است که در شکل (۲) با دامنه مقادیر از صفر تا ۸۱ میلی‌متر در منطقه مشاهده می‌شود. با توجه به عمق خاک در منطقه مورد مطالعه، در زیرحوضه‌هایی که شیب کم‌تر بوده، عمق خاک بیش‌تر بوده و بافت خاک نیز تکامل‌یافته‌تر شده است، بنابراین، توان نگهداشت آب نیز بیش‌تر است، و حتی احتمال استقرار اراضی کشاورزی هم در این محدوده بیش‌تر هست که با تقابل نقشه LULC در این منطقه و هم‌خوانی مناطق کشاورزی با این اراضی در این منطقه مورد مطالعه تأیید واقع شد. پارامتر آخر، ظرفیت آب قابل‌دسترس گیاه است. این پارامتر نشان‌دهنده میزان آبی است که قابل نگهداری در خاک بوده و برای استفاده گیاه قابل‌دسترس است. ظرفیت آب قابل‌دسترس گیاه همان‌طور که در شکل (۲) قابل مشاهده است، در دامنه ۰/۱۵ تا ۰/۵۴ که به ترتیب کم‌ترین مقدار در زیر حوضه شماره ۴ با پوشش گیاهی غالب مرتع کم‌تراکم و بیش‌ترین مقدار در زیرحوضه شماره ۲ با پوشش گیاهی غالب مرتع پرتراکم به دست آمد.

مقدار تولید آب مدل‌سازی‌شده با مدل InVEST در مطالعه حاضر، ۵۱۱۲/۴ میلیون مترمکعب برآورد شد که مجموع تولید آب در چهار زیرحوضه است و هم‌چنین براساس این مدل‌سازی، بیش‌ترین میزان تولید آب مربوط به زیرحوضه ابرقو-سیرجان با ۲۱۰۳ میلیون مترمکعب می‌باشد که دارای پوشش گیاهی غالب مرتع پرتراکم است که در مطالعه‌های Yang et al. (2020)، Adelisardou et al. (2021)، Balist et al. (2022) اهمیت نقش تراکم پوشش گیاهی در حفظ رطوبت خاک و عدم تغییر LULC به تفصیل بیان شده است که مصداق این امر می‌باشند. زیرحوضه کویر لوت میانی در رده بعدی تولید آب قرار دارد و تولید آب کم‌تری نسبت به زیرحوضه ابرقو-سیرجان دارد که می‌تواند به دلیل غالبیت مرتع کم‌تراکم و اراضی بایر باشد. زیرحوضه کویر در انجیر با مقدار ۱۱۱۰۳۸۵۳۴۶/۸ مترمکعب آب، میزان کم‌تری از تولید را نسبت به زیرحوضه شماره ۴ دارد ولی اختلاف فاحشی مشاهده نمی‌شود. کم‌ترین مقدار تولید آب حدود ۷۴۱/۸ میلیون مترمکعب می‌باشد که مربوط به زیرحوضه کویر لوت شمالی است که دلایلی چون نوع LULC و شرایط اقلیمی در آن مؤثرند.

در مطالعه حاضر نقش LULC در تولید آب بسیار کلیدی است. به نحوی که اراضی کشاورزی بالاترین میانگین تولید آب در واحد هکتار را داراست که با مطالعه Pirikiya et al. (2021)، Jafarzadeh et al. (2019) و Wu et al. (2022) هم‌راستا است.

عمده اراضی جنگلی استان کرمان در ارتفاعات پرشیب قرار دارند. به همین دلیل فرصت نفوذ آب کم‌تری در این اراضی مهیاست و تولید آب بالایی در واحد هکتار دارند. این مقدار در اراضی جنگلی کم تراکم (۶۵۹/۷ مترمکعب در هکتار) طبق انتظار بالاتر از اراضی جنگلی پرتراکم (۶۲۰/۹ مترمکعب در هکتار) است. در مطالعه Jafarzadeh et al. (2019) نیز پس از زراعت و باغ، اراضی جنگلی بالاترین میزان تولید آب را دارند که به علت شباهت در شرایط توپوگرافی با منطقه مورد مطالعه حاضر است. نقش پوشش جنگلی بر کاهش تولید رواناب و افزایش نفوذ آن به خاک در مطالعات

Haghdadi *et al.* (2018) و Pirikiya *et al.* (2021) نیز به اثبات رسیده است. اراضی مرتعی کم‌تراکم و پرتراکم در رده‌های بعدی تولید آب قرار دارند که به ترتیب معادل ۵۶۱/۸ و ۵۲۴ مترمکعب در هکتار است و پس از آن اراضی بایر با ۸۴/۹ مترمکعب در هر هکتار قرار دارد. با توجه به پراکنش LULC در شرایط توپوگرافی مختلف استان تغییرات میزان تولید آب قابل توجهی است. اراضی جنگلی در مناطق مرتفع‌تر پرشیب، اراضی بایر در دشت‌های مسطح و اراضی مرتعی در مناطق بینابینی قرار دارند. از این رو با کاهش شیب، فرصت نفوذپذیری بالاتری برای آب تولیدی فراهم است که نقش بالاتر شرایط توپوگرافی را نسبت به LULC کلان نشان می‌دهد. در مطالعه Jafarzadeh *et al.* (2019) نیز از بین LULCها، کم‌ترین میزان تولید آب از اراضی مرتعی گزارش شده است.

در هر LULC واجد پوشش گیاهی نیز میزان تراکم پوشش گیاهی در میزان آب تولیدشده مؤثر است. نقش تراکم پوشش گیاهی در مطالعه Pirikiya *et al.* (2021) نیز نشان داده شده است. علاوه بر عامل توپوگرافی می‌توان نقش عوامل اقلیمی را نیز بر گردان تولید آب در LULC مختلف مؤثر دانست، چراکه مناطق کوهستانی پر شیب نسبت به اراضی بایر استان بارندگی کم‌تری دریافت می‌کنند. این مطلب به‌وضوح در شکل (۲-الف) دیده می‌شود. این نتایج با نتایج مطالعات Yang *et al.* (2020) و Balist *et al.* (2022) هم‌خوانی دارد. همچنین در مطالعه Yang *et al.* (2021) نیز تأیید شده است. Yang *et al.* (2021) نشان دادند که حتی تأثیر بارش بر تولید آب معنادارتر از LULC است.

اگرچه بسیاری از مطالعات مناطق شهری را به‌علت نفوذپذیری پایین اراضی ساخت‌وسازشده دارای تولید آب بالایی معرفی کرده‌اند (از جمله Pirikiya *et al.*, 2021)، اما در این پژوهش به‌دلیل این که مدل استفاده‌شده تنها برای مناطق شهری کاربرد چندانی ندارد و بیش‌تر در مقیاس‌های منطقه‌ای کارآمدتر است، به‌طور عمده مقادیر نزدیک به صفر در مناطق شهری به‌دست آمده است. همچنین به‌دلیل عدم دسترسی به درصد رس، شن و ماسه در مناطق شهری ناشی از توسعه سطوح نفوذناپذیر، نتایج به‌دست‌آمده موردانتظار بوده است. پوشش اراضی دق (کویر) که مساحت ناچیزی از منطقه را به خود اختصاص داده است طبق انتظار در مناطق گوذر بوده و اندک آب باران دریافتی را به زمین نفوذ می‌دهد و از این رو تولید آب ندارد.

با توجه به موارد موردبحث می‌توان نتیجه گرفت که پوشش گیاهی طبیعی نقش حیاتی در خدمت اکوسیستمی تولید آب ایفا می‌کند، بنابراین، ایجاد مناطق حفاظت‌شده و اجرای اقدامات حفاظت از پوشش گیاهی از اهمیت بالایی برخوردار است، همان‌طور که در مطالعه Resende *et al.* (2021) و Pirikiya *et al.* (2021) هم به این موضوع صحت‌گذاشته شد. خدمات اکوسیستم به نوع LULC بستگی دارد، اما این موضوع به‌طور مفصل در اجرای سیاست‌ها در نظر گرفته نشده است (Ma *et al.*, 2021).

در استان کرمان یکی از پرمصرف‌ترین LULCها برای آب، کشاورزی است و منبع اصلی تأمین آن با توجه به خشک و نیمه‌خشک بودن منطقه از آب‌های زیرزمینی است، بنابراین ارزش‌گذاری تولید آب همان‌طوری که پیش‌تر اشاره شد در بخش کشاورزی انجام شد که این بخش مبنای ارزش‌گذاری آب در سایر مطالعات (Balali and Kasbian Lal, 2022) نیز قرار گرفته است که هم‌راستا با نتایج این مطالعه است. براساس نتایج ارزش‌گذاری آب، زیرحوضه‌های شماره ۱ تا ۴ به ترتیب قادرند ۵۵۲۵۷۱۸، ۲۶۸۹۵۳۵، ۳۰۸۰۰۲۶ و ۲۶۰۱۳۶۹ تومان در هر هکتار آب تولید نمایند و ارزش کل خدمت اکوسیستمی تولید آب منطقه مورد مطالعه قریب به ۴۲ هزارمیلیارد تومان در سال ۱۴۰۰ است. همان‌طوری که قابل انتظار است ارزش هر مترمکعب آب با توجه به کمیابی آن در مناطق مختلف متفاوت است، به همین دلیل در مطالعه حاضر براساس ارزش به‌روز شده هر مترمکعب آب به‌دست‌آمده از مطالعه انجام‌شده در استان کرمان (Gholami, 2013) استفاده شد. لازم به ذکر است که اگرچه ارزش هر مترمکعب آب براساس نرخ تورم درگاه ملی آمار ایران به‌روز شده است، اما این هزینه با در نظر گرفتن شرایط سال ۹۱ بوده که برای به‌دست‌آوردن آب نیاز کم‌تری نسبت به سال ۱۴۰۰ به

هزینه‌های مربوط به کف‌شکنی و احداث چاه، انرژی کم‌تر موتورپمپ‌ها و غیره وجود داشته و همین‌طور آب چاه‌ها از کیفیت بالاتری نیز برخوردار بودند. از این‌رو، عدد موردنظر حداقل ارزش آب را در سال ۱۴۰۰ نشان می‌دهد. همچنین اجرای طرح‌های رفع بحران آب در استان کرمان نیز بر ارزش آب در آینده نزدیک خواهند افزود. نکته قابل‌توجه در مطالعات مختلف مربوط به ارزش‌گذاری خدمت تولید آب در کم‌بودن ارزش نسبت به ارزش واقعی است (Gholami, 2022; Balali and Kasbian Lal, 2013). است که لزوم افزایش هزینه آب را از طریق ابزارهای مختلف سیاست‌گذاری جهت کنترل بهره‌برداری و تخلیه آبخوان نشان می‌دهد و در مطالعه Ghobadi and Moridi (2022) نیز توصیه شده است.

#### ۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

برآورد تولید آب به‌عنوان یکی از خدمات اکوسیستمی و ارزش‌گذاری آن به‌ویژه زمانی که جهان با تنش و مشکلات آبی دست و پنجه نرم می‌کند دارای اهمیت زیادی است و با در اختیار قراردادن اطلاعات به‌صورت کمی، مسئولین و دولت‌مردان را با دید باز به‌سمت سیاست‌گذاری‌های درستی که منجر به حفاظت از این منابع می‌شود، هدایت می‌کند. بررسی خدمت اکوسیستمی تولید آب در زیرحوضه‌های شمالی استان کرمان نشان داد که علاوه بر نقش بارز انواع LULC، نقش میزان بارندگی و شرایط توپوگرافی نیز تعیین‌کننده است. به‌عبارتی توزیع انواع LULC در مناطق مختلف از کوهستانی تا دشتی که میزان بارندگی را نیز تحت تأثیر خود قرار می‌دهد، در میزان تولید آب مؤثرند. از این‌رو، هر هکتار از اراضی جنگلی که در مناطق پرشیب‌تر با بارندگی بالاتر از اراضی مرتعی قرار دارند، میزان آب بالاتری را نیز نسبت به مراتع تولید می‌کنند. میزان کل تولید آب در منطقه مورد مطالعه ۵۱۱۲/۴ میلیون مترمکعب و با ارزش ۴۱۸۵۰،۴۳۸،۳۶۷،۵۷۰ تومان به دست آمد که به‌علت وسعت بالای اراضی مرتعی، نقش این اراضی بیش از سایر LULC‌ها بوده است. بنابراین این اراضی با توجه به واقع‌شدن در شیب‌های بینابینی در صورت تقویت پوشش گیاهی، می‌توانند نقش مؤثری در تغذیه آبخوان‌ها داشته باشند. اراضی جنگلی منطقه که به‌طور عمده در مناطق کوهستانی واقعند نیز نیازمند تقویت پوشش گیاهی جهت کاهش سرعت رواناب و جلوگیری از تبدیل آن به سیلاب هستند.

این مطالعه دیدگاه‌های جدیدی را برای حفاظت از پوشش گیاهی در مناطق کوهستانی و مدیریت مصرف آب در مناطق دشتی در استان کرمان ارائه می‌دهد. چراکه مصادیق هر دو سوی طیف پرآبی و کم‌آبی یعنی سیل و خشک‌سالی، استان کرمان را تهدید می‌کند. کمبود پوشش گیاهی به‌ویژه در مناطق با پتانسیل بالای تولید آب مانند زیرحوضه ابرقو-سیرجان منجر به سیلاب در این محدوده‌های استان شده و هم‌زمان کمبود آب‌های سطحی و زیرزمینی، فشار زیادی به بخش‌های مختلف اقتصادی-اجتماعی این استان تحمیل می‌کند. نتایج این مطالعه می‌تواند در برنامه‌ریزی مکانی جهت کاهش اثرات مخرب سیل، خشک‌سالی، جلوگیری از تخریب اراضی و توسعه پوشش گیاهی موردتوجه برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران قرار گیرد. همچنین با توجه به این‌که بیش از ۹۰ درصد آب موردنیاز استان کرمان از منابع آب‌های زیرزمینی تأمین شده و بیش‌تر جهت کشاورزی مصرف می‌شود، انجام فعالیت‌های آبخوان‌داری جهت تغذیه آبخوان‌ها و اصلاح الگوی مصرف به‌ویژه در کشاورزی پیشنهاد می‌شود.

نتایج این مطالعه را می‌توان در کنار سایر خدمات اکوسیستم جهت تعیین مناطق با اولویت حفاظت با روش‌های ارزیابی چندمتغیره که در آن هر خدمت اکوسیستمی به‌عنوان یک متغیر محسوب می‌شود، مانند مطالعه Ma et al. (2021) به‌کار برد که برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود. همچنین استفاده از ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستم چندگانه در برآورد خسارت‌های محیط‌زیستی در حسابداری سبز و جبران آن می‌تواند موردتوجه تصمیم‌گیران قرار گیرد.

به‌طور کلی، اگر ارزیابی و ارزش‌گذاری در خصوص خدمات اکوسیستم به طرح‌های آمایش و سیاست‌گذاری‌های منابع هر حوضه آبخیز وارد شود می‌توان گفت بخش اعظم راه نیل به توسعه پایدار در منابع طبیعی محقق شده و یا دست‌کم از بسیاری از خسارت‌های وارده بر آن جلوگیری می‌شود.

## ۵. پی‌نوشت‌ها

1. Ecosystem services
2. Land Use/ Land Cover
3. The Soil and Water Assessment Tool
4. Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs
5. Artificial Intelligence for Ecosystem Services
6. Payment for ecosystem services
7. Eliciting consumer preferences
8. Revealed preference methods
9. Stated preference methods
10. Normalized Difference Vegetation Index

## ۶. تشکر و قدردانی

مقاله حاضر، مستخرج از طرح پژوهشی با شماره قرارداد ۱۱۰-۱۳۱۶/۴۶ مورخ ۱۴۰۰/۰۳/۱۷ و با نظارت علمی و فنی دفتر اقتصاد و فناوری محیط‌زیست سازمان حفاظت محیط زیست کشور بوده که بدین وسیله از کلیه دست‌اندرکاران سازمان حفاظت محیط زیست، اداره کل محیط زیست استان کرمان و دانشگاه زابل، تشکر و قدردانی می‌گردد.

## ۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

## ۷. منابع

- Adelisardou, F., Jafari, H.R., & Malekmohammadi, B. (2021). Impacts of land use and land cover change on the interactions among multiple soil-dependent ecosystem services (case study: Jiroft plain, Iran). *Environ Geochem Health*, 43, 3977-3996. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00875-5>.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome.
- Bagstad, K.J., Villa, F., Batker, D., Harrisoncox, J., Voigt, B., & Johnson, G.W. (2015). From theoretical to actual ecosystem services: mapping beneficiaries and spatial flows in ecosystem service assessments. *Ecol Soc*, 19(2), 64-69. <https://doi.org/10.5751/ES-06523-190264>.
- Balali, H., & Kasbian Lal, F. (2022). Economic Valuation of Groundwater in Agriculture Sector (Case Study: Hamedan-Bahar Plain). *Journal Of Agricultural Economics and Development*, 36(1), 37-48. (In Persian).
- Balist, J., Malekmohammadi, B., & Jafari, H.R. (2022). Detecting land use and climate impacts on water yield ecosystem service in arid and semi-arid areas. A study in Sirvan River Basin-Iran. *Applied Water Science*, 12, 4. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01545-8>.
- Benra, F., De Frutos, A., Gaglio, M., Alvarez-Garretón, C., Felipe-Lucia, M., & Bonn, A. (2021). Mapping water ecosystem services: Evaluating InVEST model predictions in data scarce regions. *Environmental Modelling & Software*, 138, 104982.



- Birkhofer, K., Diehl, E., Andersson, J., Ekroos, J., Früh-Müller, A., Machnikowski, F., & Smith, H. G. (2015). Ecosystem services-current challenges and opportunities for ecological research. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2, 87.
- Bozorg-Haddad, O., Dehghan, P., Zareie, S., and Loáiciga, H. A. (2020) System dynamics applied to water management in lakes. *Irrig. and Drain.*, 69, 956- 966. <https://doi.org/10.1002/ird.2470>.
- Canadell, J., Jackson, R. B., Ehleringer, J. B., Mooney, H. A., Sala, O. E., & Schulze, E. D. (1996). Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, 108, 583-595.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farberk, S., Grasso, M., Limburg, K., et al. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253-260.
- Cui, F., Wang, B., Zhang, Q., Tang, H., De Maeyer, P., Hamdi, R., & Dai, L. (2021). Climate change versus land-use change-What affects the ecosystem services more in the forest-steppe ecotone?. *Science of the Total Environment*, 759, 143525.
- Daneshi, A., Brouwer, R., Najafinejad, A., Panahi, M., Zarandian, A., & Maghsood, F. F. (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.
- Eslami, A., Anvari, S., Karimi, N., & Mohamadi, S. (2022). Application of pixel-based and object-based approaches for LULC mapping in Jiroft region, SE Iran. *ECOPERSIA*, 10(1), 71-83.
- Farzane Gholami, F. (2013). *Valuation of water resources in parts of the province Kerman, using table input-occupancy-output*. M.Sc. Thesis, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. (In Persian).
- Fischer, G., van Velthuisen, H., & Shah, M. (2008). Nachtergaele, F., Prieler, S., Velthuisen, H.T., Verelst, L., and D. Wiberg: *Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008)*, edited by: IIASA, Laxenburg, Austria, FAO, Rome, Italy.
- Fischer, G., Nachtergaele, F., Prieler, S., Van Velthuisen, H.T., Verelst, L., & Wiberg, D. (2008). *Global Agro-Ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008)*. IIASA: Laxenburg, Austria; FAO: Rome, Italy.
- Ghermandi, A., Nunes, P.A., Portela, R., Nalini, R., & Teelucksingh, S. S. (2010). Recreational, cultural and aesthetic services from estuarine and coastal ecosystems. FEEM Working Paper No. 121.2009, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1532803>.
- Ghobadi, S., & Moridi, A. (2022). Economic valuation of water. *Water and Irrigation Management*, Articles in Press, doi: 10.22059/jwim.2022.342815.992. (In Persian).
- Haghdadi, M., Heshmati, Gh.A., & Azimi, M.S. (2018). Assessment of water yield service on the basis of InVEST tool (Case study: Delichai watershed). *J of Water and Soil Conservation*, 25(4), 275-290. (In Persian).
- Jafarzadeh, A. A., Mahdavi, A., FallahShamsi, R., & Yousefpour, R. (2019). Annual Water Yield Estimation for Different Land Uses by GIS-Based InVEST Model (Case Study: Mishkhas Catchment, Ilam Province, Iran). *Journal of Rangeland Science*, 9(1), 1-12.
- Karra, K., Kontgis, C., Statman-Weil, Z., Mazzariello, J.C., Mathis, M., Brumby, S.P. (2021). Global land use/land cover with sentinel 2 and deep learning; IEEE: Manhattan, NY, USA: pp. 4704-4707.
- Liang, J., Li, S., Li, X., Li, X., Liu, Q., Meng, Q., & Li, J. (2021). Trade-off analyses and optimization of water-related ecosystem services (WRESSs) based on land use change in a typical agricultural watershed, southern China. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123851.
- López-Cubillos, S., Runting, R. K., Suárez-Castro, A. F., Williams, B. A., Armenteras, D., Ochoa-Quintero, J. M., & McDonald-Madden, E. (2022). Spatial prioritization to achieve the triple bottom line in Payment for ecosystem services design. *Ecosystem Services*, 55, 101424.
- Ma, S., Qiao, Y. P., Wang, L. J., & Zhang, J. C. (2021). Terrain gradient variations in ecosystem services of different vegetation types in mountainous regions: Vegetation resource conservation and sustainable development. *Forest Ecology and Management*, 482, 118856.

- Management and Planning Organization of Kerman province. (2018). *A selection of economic, social and cultural indices and indicators of Kerman province*, Fall 2018. P. 43. (In Persian)
- Mansouri Daneshvar, M.R., Ebrahimi, M., & Nejadsoleymani, H. (2019). An overview of climate change in Iran: facts and statistics. *Environ Syst Res*, 8 (7), 1-10.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being. General Synthesis: a Report of the Millennium Ecosystem Assessment*. Washington, DC: Island Press.
- Munoth, P., & Goyal, R. (2020). Impacts of land use land cover change on runoff and sediment yield of Upper Tapi River Sub-Basin India. *Int J River Basin Manage*, 18(2), 177-189. <https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1613413>
- Pirikiya, M., Fallah, A., Amirnejad, H., & Mohamadi, J. (2021). Economic valuation of water production service in forest ecosystems (case study: Darabkola watershed). *Ecology of Iranian Forest*, 29 (18), 22-33. (In Persian).
- Plummer, M.L. (2009). Assessing benefit transfer for the valuation of ecosystem services. *Front Ecol Environ.*, 7(1), 38-45, doi: 10.1890/080091.
- Resende, F. M., Cimon-Morin, J., Poulin, M., Meyer, L., Joner, D. C., & Loyola, R. (2021). The importance of protected areas and Indigenous lands in securing ecosystem services and biodiversity in the Cerrado. *Ecosystem Services*, 49, 101282.
- Sahidasht, A., & Abasnejad, A. (2011). Providing management solutions for underground water resources in the plains of Kerman province. *Geotechnical Geology*, 7(2), 131-146. (In Persian).
- Sharafatmandrad, M., & Khosravi Mashizi, A. (2021). Temporal and spatial assessment of supply and demand of the water-yield ecosystem service for water scarcity management in arid to semi-arid ecosystems. *Water Resources Management*, 35(1), 63-82.
- Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Chaplin-Kramer, R., ..., & Douglass, J. (2018). InVEST 3.2. 0 user's guide. *The Natural Capital Project*.
- Shirmohammadi, B., Malekian, A., Salajegheh, A., Taheri, B., Azarnivand, H., Malek, Z., & Verburg, P. (2020). Impacts of future climate and land use change on water yield in a semiarid basin in Iran. *Land Degradation Development*, 31, 1252-1264.
- Song, W., & Deng, X. (2017). Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China. *Sci Total Environ.*, 576, 705-719.
- Sun, S., Sun, G., Caldwell, P., McNulty, S., Cohen, E., Xiao, J., & Zhang, Y. (2015). Drought impacts on ecosystem functions of the U.S. National Forests and Grasslands: Part II assessment results and management implications. *For Ecol Manage*, 353, 269-279.
- Tahiru, A.A., Doke, D.A., & Baatuuwie, B.N. (2020). Effect of land use and land cover changes on water quality in the Nawuni Catchment of the White Volta Basin, Northern Region. Ghana. *Appl Water Sci.*, 10, 198. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01272-6>.
- Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Sharp, R., Nelson, E., ..., & Bernhardt, J. (2011). InVEST 2.2.2 user's guide: integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs. *The Natural Capital Project*.
- TEEB. (2010). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A Synthesis of the Approach, Conclusions and Recommendations of TEEB*. Malta: Progress Press.
- Wu, C., Qiu, D., Gao, P., Mu, X., & Zhao, G. (2022). Application of the InVEST model for assessing water yield and its response to precipitation and land use in the Weihe River Basin, China. *Journal of Arid Land*, 14(4), 426-440.
- Yang, J., Xie, B., Zhang, D., & Tao, W. (2021). Climate and land use change impacts on water yield ecosystem service in the Yellow River Basin, China. *Environmental Earth Sciences*, 80(3), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09277-9>
- Yang, X., Chen, R., Meadows, M. E., Ji, G., & Xu, J. (2020). Modelling water yield with the InVEST model in a data scarce region of northwest China. *Water Supply*, 20(3), 1035-1045.

- Zhang, L. Dawes, W. R., & Walker, G. R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37(3), 701-708.
- Zhao, Y.R., Zhou, J.J., Lei, L., Xiang, J., Huang, M.H., Feng, W., Zhu, G.F., Wei, W., & Wang, J.A. (2019). Identification of water yield driving factors in the upper reaches of Shiyang River based on InVEST model. *Chin J Ecol.*, 38(12), 3789-3799. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201912.017>.