

Evaluating water yield ecosystem services through land use and land cover impacts in the ecosystems of Sistan region

Mohammad Amin Izadipoor^{a*}, Reza Dahmardeh Behrooz^{b*}, Fatemeh Einollahipeer^c,
Fatemeh Rajaei^d

^aMSc in Environmental Sciences, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran.

^bAssociate Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran.

^cAssistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran.

^dAssistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Received: 4 May 2024

Revised: 12 June 2024

Accepted: 3 July 2024

Extended Abstract

Introduction

Water yield represents a crucial productive ecosystem service susceptible to alteration due to variations in land use and land cover characteristics. In recent decades, ecosystem services have become an important and major issue in ecological studies and land management. They include goods and benefits that humans obtain directly or indirectly from nature. Ecosystem services are categorized into four groups: production, regulation, support, and cultural. Currently, the reduction and destruction of these services are recognized as critical environmental issues globally. In this regard, the Millennium Ecosystem Assessment has reported that about 60% of the identified ecosystem services are being destroyed, and if this process continues without proper management and planning, the impact will increase significantly over the next 50 years.

Material and Methods

This research was conducted to evaluate water yield in the Sistan region, southeastern Iran, and assess its spatial correlation with land use and land cover characteristics, with a particular focus on landscape metrics including patch density (PD), number of patches (NP), largest patch index (LPI), landscape shape index (LSI), and edge density (ED). The

*. Corresponding authors:

Mohammadamin Izadipoor

Email: aminizadi7999@gmail.com

Tel:+989915998391

Reza Dahmardeh Behrooz

Email: dahmardehbehrooz@uoz.ac.ir

Tel:+989155434532

How to cite this Article: Izadi poor, M. A. , dahmardeh behrooz, R. , eynollahi, F. , & rajaei, F. (2024). Evaluating water yield ecosystem services through land use and land cover impacts in the ecosystems of Sistan region. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4) ,27-47.



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

InVEST model was employed to evaluate water yield, and geographically weighted regression (GWR) in ArcGIS 10.5 was utilized to investigate the spatial correlation between water yield and landscape metrics. In this study, various data layers were used, including land use, average annual rainfall, reference evaporation and transpiration, depth of soil limiting layer, plant-accessible water content, plant evaporation and transpiration coefficient, and sub-basin map of the region. The area was zoned using the Tessellation Grid command in ArcGIS 10.5 software, and water production in each zone was extracted using the Extract command. The obtained values were then used as inputs for hot spot analysis.

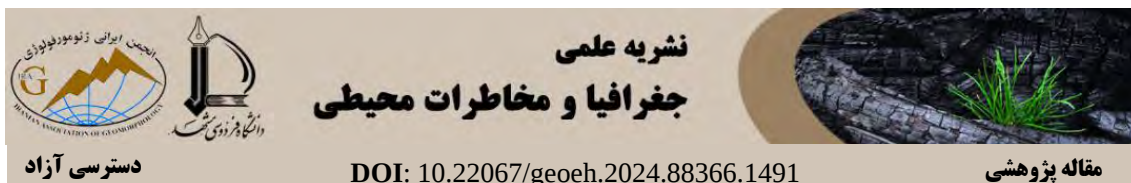
Results and Discussion.

The results showed that in 75% of the Sistan region's land, the amount of water production is less than 60 mm per hectare. The total annual water yield in Sistan was estimated to be approximately 71 mm³ (43 m³ ha⁻¹ on average). By comparing it to other regions of Iran, it was found that the amount of water production in this region is very low. The ecological and climatic conditions governing the region have caused the hot spots of water production to be located in the western areas and the cold spots in the eastern parts. The highest amount of water was yielded in the western areas, while the lowest was produced in the eastern parts. The highest and lowest water yield values were observed in barren and constructed lands, respectively, with values of 65 m³ ha⁻¹ and 4 m³ ha⁻¹. In addition, the results of the research found a significant spatial correlation between water production and different landscape features, including the number, density, size, and shape of spots, indicating that land use characteristics significantly affect water production in the study area. This study provides useful information regarding water production and its relationship with different land use characteristics, which can inform the development of strategies to preserve water resources.

Conclusion

The results of GWR analysis indicated a significant spatial correlation between water yield and the following landscape metrics: NP, PD, LPI, LSI, and ED ($0.95 < R^2 < 0.98$, $p\text{-value} < 0.01$), suggesting that land use characteristics influence the provision of water. This study provides valuable insights into the quantity of water yield and its correlation with various land use characteristics within the study area. These findings can inform the development of effective strategies to safeguard the region's water resources.

Keywords: Ecosystem Services, Water Yield, Landscape Metrics, InVEST Model, Geographically Weighted Regression (GWR).



ارزیابی خدمات اکوسیستمی تولید آب بر اساس کاربری و پوشش اراضی در اکوسیستم‌های منطقه سیستان

محمدامین ایزدی‌پور^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

رضا دهمرده بهروز^۲ - دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

فاطمه عین‌اللهی پیر - استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

فاطمه رجائی - استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۳/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۱۳

چکیده

تولید آب یکی از مهم‌ترین خدمات اکوسیستمی تولیدی است که تحت تأثیر ویژگی‌های کاربری اراضی تغییر می‌کند. این پژوهش با هدف ارزیابی تولید آب در منطقه سیستان و ارزیابی همبستگی مکانی آن با ویژگی‌های کاربری اراضی بر مبنای سنجه‌های تراکم و تعداد لکه، بزرگ‌ترین لکه، شکل سیمای سرزمین و تراکم لکه انجام شد. مدل اینوست برای ارزیابی تولید آب و رگرسیون وزنی مکانی (GWR) برای بررسی همبستگی مکانی بین تولید آب و سنجه‌های سیمای سرزمین استفاده شد. مجموع تولید سالانه آب در منطقه حدود ۷۱ میلیون مترمکعب (به‌طور میانگین ۴۳ مترمکعب در هکتار) برآورد گردید که بیشترین میزان آن در مناطق غربی و کمترین میزان آن در بخش‌های شرقی مشاهده شد. اراضی بایر و ساخته‌شده‌ها به ترتیب با ۶۵ و ۴ مترمکعب در هکتار دارای بیشترین و کمترین میزان تولید آب بودند. نتایج GWR مشخص کرد بین تولید آب با سنجه‌های موردنظر همبستگی مکانی معناداری وجود دارد ($R^2 < 0.98$, $p\text{-value} < 0.01$). بیانگر اثر ویژگی‌های کاربری اراضی بر فراهم‌سازی خدمات اکوسیستمی تولید آب است. این مطالعه اطلاعات مفیدی در رابطه با میزان تولید آب و ارتباط آن با ویژگی‌های مختلف کاربری‌های

Email: aminizadi7999@gmail.com

Email: dahmardehbehrooz@uoz.ac.ir

۱- نویسنده مسئول: ۰۹۰۳۹۳۱۶۴۷۴

۲- نویسنده مسئول: ۰۹۱۵۵۴۳۴۵۳۲

اراضی در منطقه مطالعاتی ارائه داده است که می‌تواند در راستای اتخاذ راهبردهای مناسب برای حفظ منابع آبی مورد استفاده قرار گیرند.

کلیدواژه‌ها: خدمات اکوسیستم، تولید آب، تولید آب، سنجش‌های سیمای سرزمین، مدل InVEST، رگرسیون وزنی جغرافیایی.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر خدمات اکوسیستمی به موضوعی مهم و محوری در مطالعات اکولوژیک و مدیریت سرزمین تبدیل شده است. خدمات اکوسیستمی شامل کالاها و منافع است که انسان به صورت مستقیم یا غیرمستقیم از طبیعت به دست می‌آورد. خدمات اکوسیستمی در چهار گروه تولیدی، تنظیمی، حمایتی و فرهنگی دسته‌بندی شده‌اند (De Groot, Wilson & Boumans, 2002; Costanza et al., 1997). در حال حاضر کاهش و تخریب خدمات اکوسیستمی به عنوان یک مسئله محیط زیستی حیاتی در سطح جهان شناخته شده است. در این راستا، ارزیابی اکوسیستم هزاره گزارش داده است که حدود ۶۰ درصد از خدمات اکوسیستمی شناسایی شده در حال تخریب هستند و در صورت ادامه این روند بدون مدیریت و برنامه‌ریزی مناسب تا ۵۰ سال آینده بیشتر هم خواهد شد (MEA, 2003).

تولید آب یکی از مهم‌ترین خدمات اکوسیستمی تولیدی است که میزان در دسترس بودن منابع آبی در یک حوضه آبخیز را بیان می‌کند و بر مبنای تفاوت بارش و تبخیر و تعرق محاسبه می‌شود (Belete et al., 2020; Yifru, Chung, Kim & Chang, 2021). خدمات اکوسیستمی تولید آب به طور قابل ملاحظه‌ای متأثر از عوامل مختلف به‌ویژه اقلیم و کاربری اراضی هستند، هرچند باید بین اثر این دو عامل تمایز قائل شد. بعلاوه، فعالیت‌های کشاورزی و انسانی، توسعه شهرها، رشد جمعیت و پدیده گرمایش زمین باعث تغییرات اساسی در بارش و تبخیر تعرق می‌شوند که در پی آن به طور بالقوه کاهش تولید آب را سبب می‌شوند (Guo, Yu, Xu, Yang & Wang, 2023). بر این اساس، برای حفظ و تخصیص منطقی منابع آبی در مناطق مختلف نیاز است تولید آب با توجه به الگوی حاکم بر اکوسیستم‌های آن‌ها ارزیابی و کمی‌سازی شود. (Tijjani, Giri & Woznicki, 2022; Sharp et al., 2014; MEA, 2003).

در مطالعات گذشته اثرات کاربری اراضی بر تغییر تولید آب مورد توجه قرار گرفته است. گائو و همکاران (Guo et al., 2023) اثرات کاربری اراضی بر عملکرد آب در ۱۷ زیرحوضه در سراسر چین را با استفاده از مدل اینوست ارزیابی و تأیید کردند که با توجه به ویژگی‌های اقلیمی، جغرافیایی و اقتصادی-اجتماعی، واکنش تولید آب به تغییرات کاربری اراضی می‌تواند متفاوت باشد. امیری و همکاران (Amiri, Khoshhravesh & Valashedi, 2023) با ارزیابی تأثیر کاربری اراضی بر رودخانه تجن در شمال ایران با استفاده از مدل سوات، تأیید کردند که تغییرات کاربری اراضی می‌تواند منجر به تنش آبی در منطقه مطالعاتی‌شان در دهه‌های آتی شود. میرقائد و سوری (Mirghaed & Souri, 2023) تولید آب در حوضه آبخیز رودخانه شور در جنوب غرب ایران را با استفاده از مدل اینوست شبیه‌سازی و رابطه آن را با تغییرات کاربری اراضی، خصوصیات خاک و شاخص‌های توپوگرافی مورد ارزیابی قرار دادند. پی و همکاران (Pei et al., 2022) تغییرات سالانه تولید آب و ارتباط آن با محرک‌های مختلف را در ۲۰ سال گذشته در منطقه‌ای در شمال چین مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و اثرات گذشته، حال و آینده پوشش گیاهی مجدد را بر تولید آب ارزیابی کردند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات آب‌وهوا و کاربری زمین به ترتیب مسبب ۸۸٪ و ۱۲٪ از تغییرات تولید آب از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ بودند. دانشی و همکاران (Daneshi et al., 2021) با استفاده از مدل اینوست عملکرد، تولید و مصرف آب در حوضه آبریز تجن در شمال ایران را شبیه‌سازی و اثرات تغییر اقلیم و کاربری زمین بر حفظ آب را بر اساس سناریوهای مختلفی بررسی نمودند.

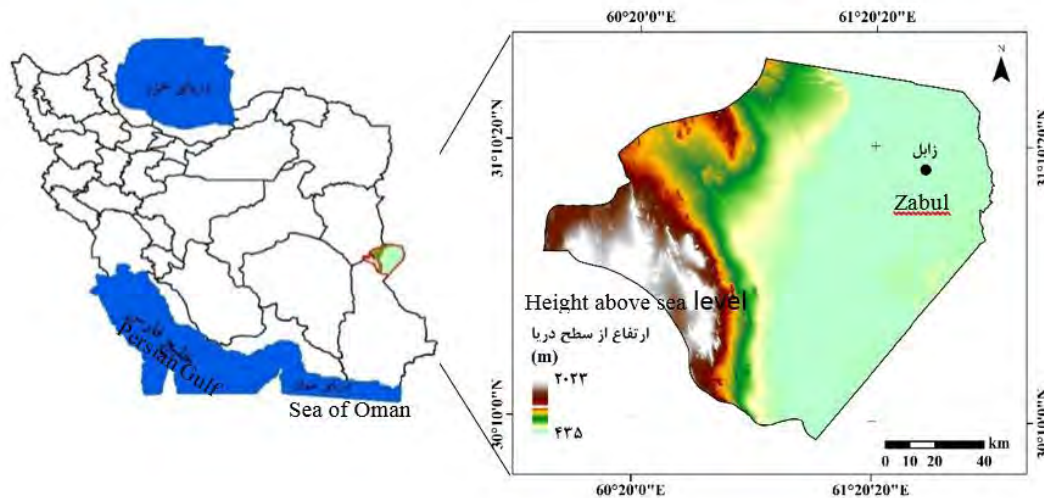
با وجود آنکه مطالعات مختلفی در رابطه با اثر کاربری اراضی بر خدمات اکوسیستمی تولید آب انجام شده است اما این مسئله در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه در ایران کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. بعلاوه، اثر کاربری اراضی بر تولید آب با توجه به تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین نیز بندرت مورد ارزیابی قرار گرفته است. در دهه‌های اخیر، وقوع مسائل مختلف محیط‌زیستی بخصوص مسائل مرتبط با آب در منطقه سیستان، ضرورت ارزیابی خدمات اکوسیستمی تولید آب به‌منظور کسب آگاهی و اطلاعات لازم برای اتخاذ راهبردهای مدیریتی مناسب و استفاده بهینه از منابع آبی و حفاظت اکوسیستم‌های آن را محرز ساخته است. از این‌رو، این پژوهش با توجه به اهداف زیر صورت پذیرفت: (الف) ارزیابی خدمات اکوسیستمی تولید آب در منطقه سیستان با استفاده از مدل تولید آب اینوست، (ب) تعیین نقاط داغ ارزیابی

خدمات اکوسیستمی تولید آب در منطقه (ج) ارزیابی ارتباط بین کاربری اراضی و خدمات اکوسیستمی تولید آب بر مبنای سنجش‌های سیمای سرزمین در منطقه مطالعاتی.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

سیستان با مساحتی حدود ۱۶۴۵۹ کیلومترمربع در شمال استان سیستان و بلوچستان و شرق ایران واقع شده است. مختصات جغرافیایی منطقه شامل $30^{\circ}6'17''$ تا $31^{\circ}29'8''$ عرض شمالی و $59^{\circ}56'16''$ تا $50^{\circ}19'50''$ طول شرقی است. سیستان پنج شهرستان زابل، هامون، زهک، نیمروز و هیرمند را شامل می‌شود (شکل ۱). میانگین بارش و درجه حرارت سالانه این منطقه به ترتیب ۶۶ میلی‌متر و ۲۲ درجه سانتی‌گراد است و اقلیم آن در طبقه گرم و خشک آمبرژه قرار می‌گیرد. میانگین ارتفاع منطقه سیستان از سطح دریا حدود ۶۷۹ متر و متوسط شیب آن ۶ درصد برآورد شده است که نشان‌دهنده تغییرات کم توپوگرافی این منطقه می‌باشد. بخش‌های شرقی منطقه شامل دشت‌ها و مناطق مسطح است؛ درحالی‌که بخش‌های غربی آن دارای ارتفاعات بلندتر می‌باشد. کشاورزی و مرتع دو کاربری عمده در منطقه به شمار می‌روند که به ترتیب مناطق شرقی و غرب آن را دربرگرفته‌اند. رودخانه هیرمند تنها منبع آبی منطقه است که از افغانستان سرچشمه می‌گیرد و در نهایت به تالاب هامون وارد می‌شود. تالاب و پناهگاه حیات‌وحش هامون به‌عنوان زیستگاه‌های گونه‌های مختلف جانوری و گیاهی اهمیت اکولوژیک این منطقه را محرز ساخته است. منطقه سیستان از نظر جنبه‌های محیطی، اقتصادی، اجتماعی و سیاسی بسیار حائز اهمیت است. در دهه اخیر، وقوع و تداوم خشکسالی‌های متعدد، تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی و تأمین نشدن حقابه تالاب‌های منطقه، باعث افت سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش منابع آب سطحی و خشک شدن قنات‌های آن شده است. به‌طوری‌که معیشت مردمان و حیات گیاهی و جانوری آن را با مشکلات جدی روبرو کرده است (Izadi poor, Dahmardeh Behrooz, Eynollahi Pir & Rajaei, 2024).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig.1. Geographical location of the study area

۲-۲ جمع‌آوری و تهیه داده‌ها

در این مطالعه داده‌ها و لایه‌های اطلاعاتی مختلف شامل کاربری اراضی، میانگین بارندگی سالانه، تبخیر و تعرق مرجع، عمق لایه محدودکننده خاک، محتوای آب قابل‌دسترس گیاهی، ضریب تبخیر و تعرق گیاهی و نقشه زیرحوضه‌های منطقه مورد استفاده قرار گرفتند. نقشه کاربری اراضی با پردازش تصاویر سنجنده تصویربرداری عملیاتی زمین (OLI^1) ماهواره لندست ۸ به شماره‌های ردیف ۳۸ و ۳۹ و گذر ۱۵۷ و ۱۵۸ در سال ۲۰۲۲ و طبقه‌بندی آن‌ها بر روش جنگل تصادفی در سامانه گوگل ارث انجین، تهیه گردید (Biswas, 2024). میانگین بارندگی سالانه و تبخیر و تعرق مرجع بر اساس داده‌های اقلیمی TerraClimate به دست آمده از سامانه گوگل ارث انجین و آمار ایستگاه‌های هواشناسی منطقه شامل ایستگاه‌های زابل، بنجار، زهک، ادیمی، جزینک، ژاله‌ای، کوه‌خواجه، چرک، محمدآباد بولایی، محمدشاه‌کرم، شهرسوخته، شهرک‌گلخانی و تیمورآباد تهیه و نقشه‌سازی گردید (Solaimani & Ahmadi, 2024).

¹. Operational Land Imager

اطلاعات خاک (شامل عمق لایه محدودکننده، رس، سیلت، شن و ماده آلی خاک) نیز از داده‌های جهانی خاک در سامانه گوگل ارث انجین استخراج گردید (Rahmani, Mirghaed & Aghajanzadeh, 2023). محتوای آب قابل دسترس گیاهی بر اساس اطلاعات درصد رس، سیلت، شن و ماده آلی خاک محاسبه و ضریب تبخیر و تعرق گیاهی نیز بر اساس شاخص سطح برگ (LAI^1) استخراج گردید (Sharp et al., 2014). نقشه زیرحوضه‌های منطقه نیز بر اساس مدل رقومی ارتفاع و با استفاده از ابزار ArcHydro در نرم‌افزار ArcMap تهیه گردید.

۲-۳- مدل‌سازی تولید آب

اینوست ($InVEST^2$) تولید آب (WY_x) را با استفاده از میانگین بارندگی سالانه (P_x)، تبخیر و تعرق واقعی (AET_x)، داده‌های تبخیر و تعرق مرجع (ET_0)، محتوای آب قابل دسترس گیاه ($PAWC^3$)، ویژگی‌های خاکی - اقلیمی، محدودیت عمق ریشه‌یابی خاک و کاربری اراضی و بر مبنای فرضیه تعادل آب مطابق با معادله ۱ مدل‌سازی می‌کند (Sharp et al., 2014).

$$WY_x = \left(1 - \left(\frac{AET_x}{P_x} \right) \right) * P_x \quad (1)$$

بطوریکه WY_x ، P_x و AET_x بر مبنای میلی‌متر بر سلول است. نسبت $\frac{AET_x}{P_x}$ برای هر کاربری بر اساس بیان منحنی Budyko معادله ۲ محاسبه می‌شود.

$$\frac{AET_x}{P_x} = 1 + \frac{PET_x}{P_x} - [1 + \left(\frac{PET_x}{P_x} \right)^\omega]^{1/\omega} \quad (2)$$

که در آن PET_x بیانگر تبخیر و تعرق بالقوه و ω یک پارامتر تجربی بیانگر خصوصیات طبیعی آب‌وهوایی - خاکی است.

¹ . Leaf Area Index

² . Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs

³ . Plant Available Water Content

$$PET_x = k_c(l_x) \times ET_0 \quad (۳)$$

در معادله ۳، ET_0 تبخیر و تعرق مرجع و $Kc(l_x)$ ضریب تبخیر و تعرق گیاهی بر روی پیکسل x است. $PWAC$ اختلاف بین نقطه پژمردگی گیاه و ظرفیت زراعی را نشان می‌دهد و مطابق با رابطه ۴ قابل محاسبه است.

$$PAWC = 54.509 - 0.132 \times SA\% - 0.003 \times (SA\%)^2 - 0.055 \times SI\% - 0.006 \times (SI\%)^2 - 0.738 \times CL\% + 0.007 \times (CL\%)^2 - 2.688 \times OM\% + 0.501 \times (OM\%)^2 \quad (۴)$$

که در آن $CL\%$ ، $SI\%$ ، $SA\%$ و $OM\%$ به ترتیب درصد محتوای رس، سیلت، ماسه و مواد آلی را نشان می‌دهند. مدل WY-InVEST بر اساس یک عامل فصلی (پارامتر Z) کالیبره می‌شود. پارامتر Z شاخصی تجربی و بیانگر ویژگی‌های هیدرولوژیک و بارندگی محلی است که بر اساس تعداد واقعی بارندگی در سال قابل محاسبه است (Sharp et al., 2014; Yang, Xie, Zhang & Tao, 2021).

۲-۴- تحلیل نقاط داغ تولید آب

نقاط داغ تولید آب در منطقه مطالعاتی با استفاده از آنالیز نقاط داغ در محیط ArcGIS 10.5 تحلیل گردید. برای این منظور منطقه با استفاده از دستور شبکه‌بندی Tessellation در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 زون‌بندی و میانگین تولید آب در هر زون با استفاده از دستور Extract استخراج گردید. سپس، ارزش‌های به دست آمده به عنوان ورودی آنالیز نقاط داغ در نظر گرفته شد (Mirghaed & Souri, 2022).

۲-۵- ارزیابی ارتباط بین تولید آب و سنجه‌های سیمای سرزمین

در این مطالعه ارتباط بین تولید آب و کاربری اراضی بر مبنای سنجه‌های سیمای سرزمین و با استفاده از روش رگرسیون وزنی مکانی (GWR^1) در محیط ArcGIS 10.5 مورد ارزیابی قرار گرفت. سنجه‌های

¹ Geographically Weighted Regression

سیمای سرزمین ابزاری مناسب برای اندازه‌گیری ویژگی‌های لکه‌های سیمای سرزمین اعم از مساحت، محیط، شکل، اندازه، تراکم، پیوستگی، غالبیت و پیچیدگی به شمار می‌روند. با استفاده از سنجها می‌توان ساختار، تغییرات و خردشدگی سیمای سرزمین را توصیف کرد. در این مطالعه، سنجهای تراکم لکه (PD^1)، تعداد لکه (NP^2)، شاخص بزرگ‌ترین لکه (LPI^3)، شاخص شکل سیمای سرزمین (LSI^4) و شاخص تراکم لبه (ED^5) مورد ارزیابی قرار گرفتند. PD و NP به ترتیب تعداد و تراکم لکه‌های موجود در یک محدوده را بیان می‌کنند. سنج LPI کل سیمای سرزمین را بر حسب بزرگ‌ترین لکه اندازه‌گیری می‌کند و ارزش آن بین ۱ تا ۱۰۰ متغیر است. سنج LSI بیانگر شکل سیمای سرزمین است و هر چه ارزش آن بیشتر از یک باشد پیچیدگی بیشتر مرز سیمای سرزمین را نشان می‌دهد. سنج ED نسبت محیط به مساحت لکه‌ها را بر حسب متر در هکتار آشکار می‌سازد (McGarigal, Cushman, Neel & Ene, 2002). سنجها بر اساس نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعاتی در نرم‌افزار Fragstats محاسبه شدند.

۳- نتایج و بحث

نقشه‌های کاربری اراضی، میانگین بارندگی سالیانه، تبخیر و تعرق مرجع و محتوای آب قابل دسترس گیاهی در شکل ۲ ارائه شده‌اند. با صحت‌سنجی نقشه طبقه‌بندی شده کاربری اراضی بر اساس روش ماتریس خطا، صحت کلی و ضریب کاپا به ترتیب ۹۴٪ و ۰/۹۱ محاسبه شدند که نشان‌دهنده اعتبار و صحت طبقه‌بندی بود (جدول ۱). نتایج نشان داد که مساحت کاربری‌های مراتع، شوره‌زار، اراضی بایر، کشاورزی، ساخته‌شده‌ها و تالاب به ترتیب ۶۷۴۳۲۱، ۶۷۴۳۲۱، ۳۶۰۹۸۴، ۳۴۶۳۸۷، ۲۵۴۰۴۶، ۷۱۱۰ و ۲۹۸۴ هکتار بوده است که به ترتیب ۴۱٪، ۲۲٪، ۲۱٪، ۱۵٪، ۴٪، ۰/۲٪ و ۰/۲٪ از سطح منطقه را اشغال کرده‌اند. تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که میانگین بارندگی سالیانه در سیستان بین ۴۶ تا ۹۶ میلی‌متر متغیر است بطوریکه بیشترین میزان بارندگی در مناطق غربی و کمترین میزان آن در بخش‌های شرقی اتفاق می‌افتد. تبخیر و تعرق مرجع نیز در این منطقه بین

¹ Patch Density

² Number of patch

³ Largest Patch Index

⁴ Landscape Shape Index

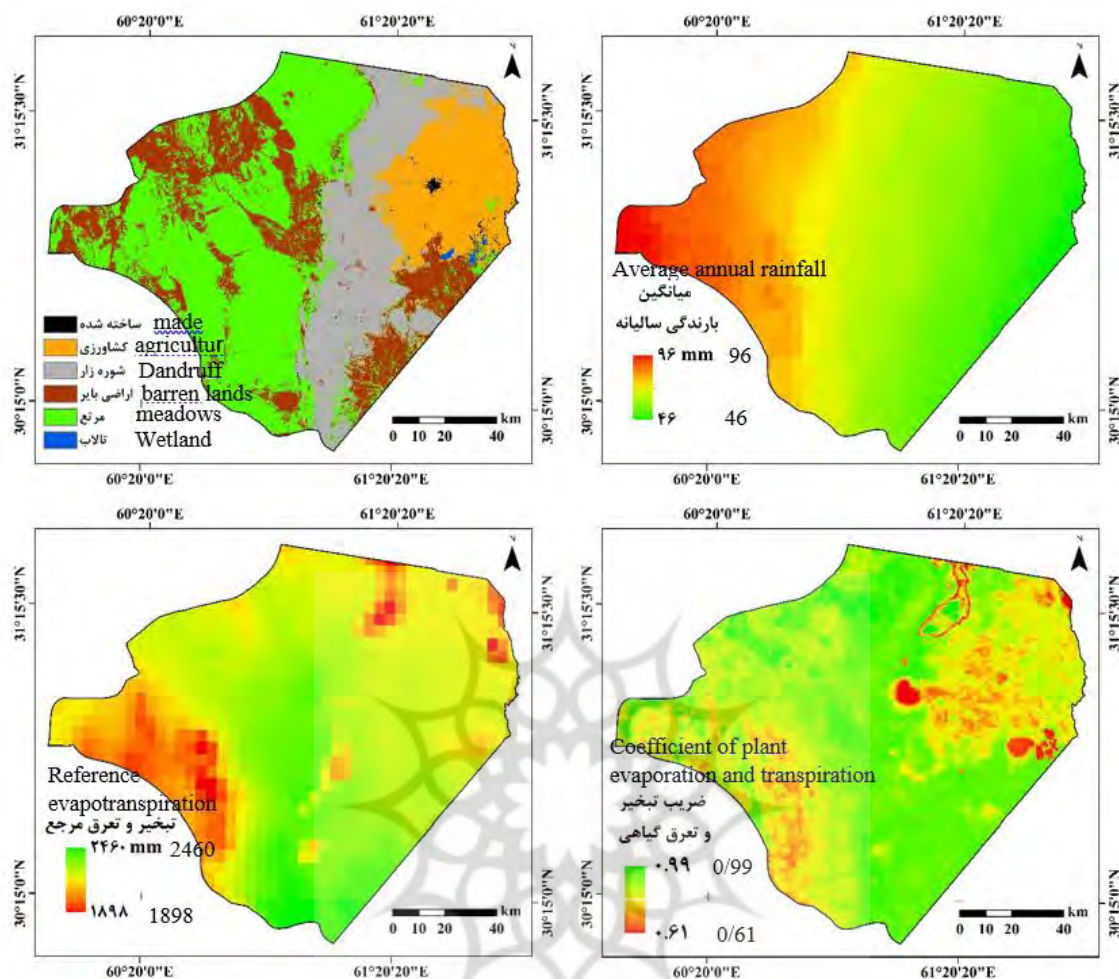
⁵ Edge Density

۱۸۹۷ تا ۲۳۶۰ میلی متر متغیر است بطوریکه بیشترین میزان آن در مناطق مرکزی و جنوب منطقه و کمترین میزان آن در بخش های غربی و شمالی مشاهده می شود.

جدول ۱- نتایج صحت سنجی طبقه بندی کاربری اراضی بر اساس ماتریس خطا

Table 1- Validation results of land use classification based on error matrix

کاربری Usability	اراضی بایر Barren lands	مراعت Meadows	شوره زار Salt marshes	کشاورزی Agriculture	ساخته شده Made	تالاب Wetlands	دقت تولید کننده (%) %Manufacturer accuracy
اراضی بایر Barren lands	98	3	1	3	1	0	92
مراعت Meadows	2	107	2	2	1	1	93
شوره زار Salt marshes	2	1	95	2	1	0	94
کشاورزی Agriculture	2	1	1	110	2	1	94
ساخته شده Made	1	0	1	1	49	0	94
تالاب Wetlands	0	0	0	0	0	12	100
دقت کاربر (%) %User accuracy	93	96	95	93	91	86	
ضریب کاپا = 0/92 Kappa coefficient				صحت کلی = 94% Overall accuracy			



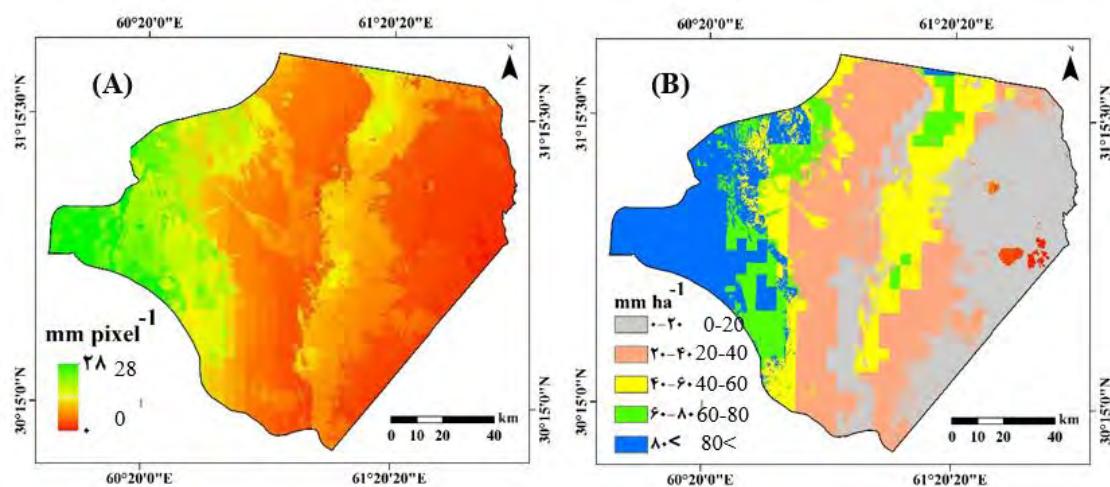
شکل ۲- نقشه‌های کاربری اراضی (a)، میانگین بارندگی سالیانه (b)، تبخیر و تعرق مرجع (c) و ضریب تبخیر و تعرق گیاهی (d) منطقه مطالعاتی

Fig.2. Land use map(a), average annual precipitation(b), reference evaporation and transpiration(c), and plant evaporation and transpiration coefficient(d) of the study area

با به‌کارگیری مدل اینوست، نقشه تولید آب منطقه مطالعاتی به دست آمد که نتایج آن در شکل ۳ مشخص شده است. میانگین، حداقل و حداکثر تولید آب در منطقه به ترتیب ۴/۳، ۰/۱ و ۲۸ میلی‌متر در پیکسل (۳۰×۳۰ متر) برآورد گردید. مجموع تولید سالیانه آب در منطقه حدود ۷۱ میلیون مترمکعب (به‌طور میانگین ۴۳ مترمکعب در هکتار) برآورد گردید. بیشترین میزان تولید آب در مناطق غربی و کمترین میزان آن در بخش‌های شرقی مشاهده گردید. نقشه طبقه‌بندی شده تولید آب نیز در شکل ۳ و مساحت اختصاص‌یافته به

هر کلاس تولید آب نیز در جدول ۲ مشخص شده است. نتایج حاکی از آن بود که طبقات تولید آب خیلی کم (۰-۲۰)، کم (۲۰-۴۰)، متوسط (۴۰-۶۰)، زیاد (۶۰-۸۰) و خیلی زیاد (> ۸۰ میلی متر در هکتار) به ترتیب در ۴۸۰۵۶۸، ۴۹۵۷۸۱، ۲۶۹۱۲۷، ۱۴۰۰۵۸ و ۲۴۶۹۲۴ هکتار از سطح منطقه توزیع شده است. بر این اساس، طبقات تولید آب کم (۲۰-۴۰) و زیاد (۶۰-۸۰ میلی متر در هکتار) بیشترین و کمترین مساحت منطقه (به ترتیب ۳۰ و ۹ درصد) را پوشش می دهند.

تولید آب بر اساس آنالیز نقاط داغ در سطوح اطمینان ۹۰٪، ۹۵٪ و ۹۹٪ تحلیل گردید که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است. مشخص گردید که نقاط داغ تولید آب در بخش های غربی و نقاط سرد در قسمت های شرقی منطقه واقع شده اند. مساحت اختصاص یافته به هر طبقه از نقاط داغ و سرد نیز در جدول ۳ آورده شده است. مشخص گردید که نقاط سرد تولید آب با سطح معناداری ۹۹٪، ۹۵٪ و ۹۰٪ به ترتیب ۸۹۳۵۶، ۲۶۰۱۸۰ و ۱۳۱۱۵۷ هکتار را شامل می شوند. نقاط داغ تولید آب با سطح معناداری ۹۹٪، ۹۵٪ و ۹۰٪ نیز به ترتیب ۲۴۶۵۲۴، ۶۹۷۷۵ و ۴۲۶۰۴ هکتار را دربر گرفته اند. به طور کلی، نقاط داغ و سرد تولید آب به ترتیب ۲۲ و ۲۹ درصد از سطح منطقه را پوشش می دهند. میزان آب تولید شده در هر کاربری نیز محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. نتایج نشان داد که مجموع آب تولیدی در کاربری های اراضی بایر، مراتع، شوره زار، کشاورزی و ساخته شده ها به ترتیب ۲۲/۵، ۳۰/۱، ۱۵/۳، ۳/۲ و ۰/۳ میلیون مترمکعب در سال است که به ترتیب معادل ۶۵، ۴۵، ۴۲، ۱۳ و ۴ مترمکعب در هکتار در سال می باشد.



شکل ۳- نقشه‌های (A) تولید آب بر حسب میلی‌متر در پیکسل (۳۰×۳۰ متر) و (B) طبقات تولید آب بر حسب میلی‌متر در هکتار

Fig.3. A) Water production in mm per pixel (30x30 meters) and B) Water production classes in mm per hectare

جدول ۲- مساحت اختصاص یافته به طبقات تولید آب

Table 2- Area dedicated to water production floors

تولید آب	مساحت	
Water Production	Area	
mm ha ⁻¹	ha	%
0-20	480568	29
20-40	495781	30
40-60	269127	16
60-80	140058	9
80<	246924	15

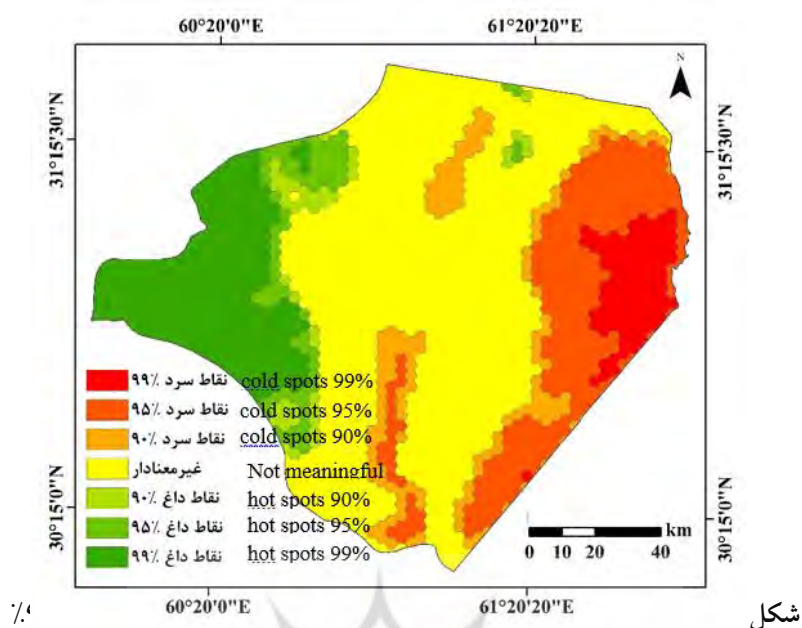


Fig.4. Map of hot and cold spots of water production at 90%, 95% and 99% confidence level

جدول ۳- مساحت اختصاص یافته به طبقات نقاط داغ و سرد تولید آب

Table 3-The area allocated to the classes of hot and cold points of water production

طبقه Floor	سطح اطمینان Confidence level	مساحت area	
		ha	%
نقاط سرد Cold spots	99%	89356	5
نقاط سرد Cold spots	95%	260180	16
نقاط سرد Cold spots	90%	131157	8
بدون معناداری No Significance		806253	49
نقاط داغ Hot spots	99%	42604	3
نقاط داغ Hot spots	95%	69775	4
نقاط داغ Hot spots	90%	246524	15

ارتباط بین تولید آب و سنجش‌های سیمای سرزمین با استفاده از روش GWR مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. مشخص گردید که بین تولید آب با سنجش‌های تعداد لکه (NP)، تراکم لکه (PD)، شکل لکه (LSI)، شاخص بزرگ‌ترین لکه (LPI) و تراکم لکه (ED) همبستگی مکانی معناداری وجود دارد. میزان ضریب تبیین (R^2) به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۹۸، ۰/۹۷، ۰/۹۶ و ۰/۹۸ محاسبه گردید.

جدول ۴- میزان آب تولیدی در کاربری‌های منطقه

Table 4- The amount of water produced in usage of the region

کاربری use	تولید آب Water production	
	1000 m ³	m ³ ha ⁻¹
اراضی بایر Barren lands	22511	65
مراعات pastures	30070	45
شوره‌زار Salt fields	15324	42
کشاورزی Agriculture	3257	13
ساخته شده Made	29	4

جدول ۵- نتایج رگرسیون وزنی مکانی (GWR)

Table 5- Spatial Weighted Regression (GWR) results

آماره Statistics	NP	PD	ED	LPI	LSI
R2	0.98	0.98	0.97	0.96	0.98
R2 adj.	0.96	0.96	0.96	0.95	0.96
P-value	0.01<	0.01<	0.01<	0.01<	0.01<

نتایج پژوهش نشان داد که میزان تولید آب (به‌طور متوسط ۴۳ مترمکعب در هکتار) در منطقه با توجه به ویژگی‌های اکولوژیک حاکم بر آن نسبت به سایر مناطق در ایران پایین است. احمدی میرقائد و سوری (Ahmadi-Mirghaed & Souri, 2023) میزان تولید آب در حوضه آبخیز تراز در استان خوزستان را حدود ۸۵۷ مترمکعب در هکتار برآورد کردند. بخش‌های غربی منطقه نسبت به مناطق شرقی از تولید آب بیشتری برخوردار بودند. میزان بارش بیشتر و تبخیر و تعرق کمتر در بخش‌های غربی ازجمله دلایل تولید آب بیشتر

در این پهنه‌ها به شمار می‌روند. علاوه بر این، وجود ساخت‌وسازها و فعالیتهای کشاورزی عواملی مهم در راستای کاهش تولید آب در بخش‌های شرقی محسوب می‌شوند. نتایج مطالعه حاکی از آن بود که بیشترین میزان تولید آب در اراضی بایر (به‌طور میانگین ۶۵ مترمکعب در هکتار) اتفاق می‌افتد و در وهله بعد مراتع، شوره‌زارها و اراضی کشاورزی قرار می‌گیرند. کمترین میزان تولید آب نیز در ساخته‌شده‌ها (به‌طور میانگین ۴ مترمکعب در هکتار) مشاهده گردید. پائین بودن میزان تولید آب در کاربری ساخته‌شده‌ها نسبت به دیگر کاربری‌ها در منطقه مطالعاتی به این خاطر است که بخش اعظم کاربری مذکور در بخش‌های شرقی منطقه واقع شده است که میزان تولید آب در آن‌ها بسیار کم است. دیگران نتایج متفاوتی در رابطه با تولید آب در کاربری‌های مختلف به دست آوردند. احمدی میرقائد و سوری (Ahmadi-Mirghaed & Souri, 2023) دریافتند که در کاربری‌های ساخته‌شده، مراتع، جنگل‌ها و اراضی کشاورزی در حوضه آبخیز تراز در استان خوزستان به ترتیب میزان آب کمتری تولید می‌شود. یانگ و همکاران (Yang et al., 2021) نیز اذعان داشتند که میزان تولید آب در ساخته‌شده‌ها بیشتر و در جنگل‌ها کمتر رخ می‌دهد. تفاوت نتایج این مطالعه با مطالعات قبلی نشان می‌دهد که اثر کاربری اراضی بر تولید آب در اقلیم‌های مختلف متفاوت است به خاطر اینکه شرایط اقلیمی عامل اصلی تغییرات تولید آب به شمار می‌رود.

بررسی رابطه مکانی بین تولید آب با سنجه‌های سیمای سرزمین نیز نشان داد که ویژگی‌های مختلف سیمای سرزمین از جمله تعداد، تراکم، اندازه و شکل لکه‌ها همبستگی بالایی با تولید آب دارند. این نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های کاربری اراضی و الگوی ساختاری سیمای سرزمین می‌تواند تولید آب را تحت تأثیر قرار دهد و شرایط حفظ و نگهداری آب قابل دسترس در منطقه را تغییر دهد. درواقع، تغییر ویژگی‌های سیمای سرزمین بر خردشدگی زیستگاه‌ها و ازهم‌گسیختگی کاربری‌ها اثرگذار است و در پی آن نیز فراهم‌سازی خدمات اکوسیستمی به‌ویژه تولید آب تحت تأثیر قرار می‌گیرد. مطالعات قبلی نیز بر رابطه بین ویژگی‌های سیمای سرزمین و کاربری اراضی با تولید آب تأکید کردند. احمدی میرقائد و سوری (Ahmadi-Mirghaed & Souri, 2023) نیز تأیید کردند که تعداد، تراکم، شکل و مساحت لکه‌های سیمای سرزمین تعیین‌کننده خردشدگی زیستگاه‌های طبیعی است و با افزایش آن‌ها فراهم‌سازی خدمات اکوسیستمی تولید

آب تغییر می‌کند. لی و همکاران (Li, Xu & Wang, 2023) اذعان داشتند که ویژگی‌های سیمای سرزمین از جمله پیوستگی، بزرگی و جداسدگی لکه‌های سیمای سرزمین بر تولید رواناب اثرگذار است.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی تولید آب در منطقه سیستان با استفاده از مدل اینوست و بررسی رابطه آن با کاربری اراضی بر مبنای سنجش‌های سیمای سرزمین انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که در ۷۵ درصد از سطح منطقه سیستان میزان تولید آب کمتر از ۶۰ میلی‌متر در هکتار است. تولید سالانه آب در این منطقه حدود ۷۱ میلیون مترمکعب (به‌طور میانگین معادل ۴۳ مترمکعب در هکتار) برآورد گردید و با مقایسه آن نسبت به سایر مناطق ایران مشخص گردید که در این منطقه میزان تولید آب بسیار پایین است. شرایط اکولوژیک حاکم بر منطقه به‌ویژه شرایط اقلیمی باعث شده است که نقاط داغ تولید آب در پهنه‌های غربی و نقاط سرد آن در بخش‌های شرقی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین میزان تولید آب به ترتیب در اراضی بایر و ساخته‌شده‌ها اتفاق می‌افتد و میانگین سالانه آن‌ها به ترتیب برابر ۶۵ و ۴ مترمکعب در هکتار تخمین زده شد. بعلاوه، نتایج پژوهش همبستگی مکانی معنادار بین تولید آب با ویژگی‌های مختلف سیمای سرزمین از جمله تعداد، تراکم، اندازه و شکل لکه‌ها را محرز ساخت که نشان می‌دهد ویژگی‌های کاربری اراضی می‌تواند تولید آب در منطقه مطالعاتی را تحت تأثیر قرار دهد. این مطالعه اطلاعات مفیدی در رابطه با میزان تولید آب و ارتباط آن با ویژگی‌های مختلف کاربری‌های اراضی در منطقه مطالعاتی ارائه داده است که می‌تواند در راستای اتخاذ راهبردهای مناسب برای حفظ منابع آبی آن مورد استفاده قرار گیرند.

References

- Ahmadi-Mirghaedi, F., & Souiri, B. (2023). The Impact of Land Use Change on Water Yield in the Teraz Watershed, Khuzestan Province, Southwestern Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(2), 29-46. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/GEOEH.2022.77944.1261>

- Amiri, S. N., Khoshravesh, M., & Valashedi, R. N. (2023). Assessing the effect of climate and land use changes on the hydrologic regimes in the upstream of Tajan river basin using SWAT model. *Applied Water Science*, 13(6), 130. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01932-3>
- Belete, M., Deng, J., Wang, K., Zhou, M., Zhu, E., Shifaw, E., & Bayissa, Y. (2020). Evaluation of satellite rainfall products for modeling water yield over the source region of Blue Nile Basin. *Science of the total environment*, 708, 134834. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134834>
- Biswas, J., Jobaer, M. A., Haque, S. F., Shozib, M. S. I., & Limon, Z. A. (2023). Mapping and monitoring land use land cover dynamics employing Google Earth Engine and machine learning algorithms on Chattogram, Bangladesh. *Heliyon*, 9(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21245>
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... & Van Den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125621>
- De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393-408. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- Guo, Q., Yu, C., Xu, Z., Yang, Y., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101294>
- Izadi poor, M. A., Dahmardeh Behrooz, R., Eynollahi Pir, F., & Rajaei, F. (2024). Spatial Analysis of Soil Erosion and Habitat Quality Based on Land Use Patterns in Sistan Region. *Journal of Geography and Environmental Hazards*. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.87025.1468>
- Lang, Y., Song, W., & Zhang, Y. (2017). Responses of the water-yield ecosystem service to climate and land use change in Sancha River Basin, China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 101, 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.06.003>

- Li, Z., Xu, X., & Wang, K. (2023). Effects of distribution patterns of karst landscapes on runoff and sediment yield in karst watersheds. *Catena*, 223, 106947. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106947>
- McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M. C., & Ene, E. (2002). FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for categorical maps. *Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available at the following web site: www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats*.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). (2003). *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*. Washington DC: Island Press. <https://www.wri.org/research/millennium-ecosystem-assessment-ecosystems-and-human-well-being>
- Mirghaed, F. A., & Souri, B. (2022). Monitoring ecosystem services through land use change in a semiarid region: a case study of the Taluk watershed, southwestern Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(12), 12523-12536. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04490-4>
- Mirghaed, F. A., & Souri, B. (2023). Contribution of land use, soil properties and topographic features for providing of ecosystem services. *Ecological Engineering*, 189, 106898. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106898>
- Pei, H., Liu, M., Shen, Y., Xu, K., Zhang, H., Li, Y., & Luo, J. (2022). Quantifying impacts of climate dynamics and land-use changes on water yield service in the agro-pastoral ecotone of northern China. *Science of the Total Environment*, 809, 151153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151153>
- Rahmani, M., Mirghaed, F. A., & Aghajanzadeh, S. M. (2023). The impact of seasonal vegetation changes on retention and yield of sediment across the Tajan watershed in Sari, northern Iran. *Sustainable Earth Trend*, 3(2), 26-35. <https://doi.org/10.48308/ser.2023.233502.1022>
- Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Chaplin-Kramer, R., & Vogl, A. L. (2014). *INVEST User's Guide*. The Natural Capital Project: Stanford, CA, USA. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>
- Solaimani, K., & Ahmadi, S. B. (2024). Evaluation of TerraClimate gridded data in investigating the changes of reference evapotranspiration in different climates of Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52, 101678. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101678>
- Tijjani, S. B., Giri, S., & Woznicki, S. A. (2022). Quantifying the potential impacts of climate change on irrigation demand, crop yields, and green water scarcity in the New Jersey Coastal Plain. *Science of The Total Environment*, 838, 156538. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156538>

- 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), 72. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09277-9>
- Yifru, B. A., Chung, I. M., Kim, M. G., & Chang, S. W. (2021). Assessing the effect of land/use land cover and climate change on water yield and groundwater recharge in East African Rift Valley using integrated model. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100926. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100926>

