

Application of the Ordinary Least Squares (OLS) Regression Model to Assess the Impact of Land Use Change on Water Yield Ecosystem Service (Case Study: Lavasanat District, Tehran Province)

Marzie Moteshareei¹, Bahram Malekmohammadi², Majid Ramezani Mehrian³

1. Department of Environmental Planning, Management, and HSE, Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: marziemoteshareei@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Disaster Engineering, Education and Environmental Systems, Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: malekb@ut.ac.ir
3. Research and Development Department of Humanities, Faculty of Samt Research Institute, Tehran, Iran. Email: mehrian@samt.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Objective: In this study, the ordinary least squares (OLS) regression model was applied to estimate the impacts of land use and land cover (LULC) changes from 1999 to 2023 derived from Landsat satellite imagery on water productivity as a key ecosystem service essential for environmental sustainability. Focusing on the Lavasanat district in Tehran province, which has undergone rapid urbanization and severe land use/cover changes, this study determined the extent to which water production performance (runoff) responded to land use/cover changes, thereby providing significant information on the environmental consequences of land use/cover changes under increasing human pressures.
Article history: Received: 16 January 2025 Received in revised form: 2 October 2025 Accepted: 11 October 2025 Available online: 16 December 2025	Method: This study used Landsat satellite imagery to assess the trends in land use/cover (LULC) changes over time at a spatial resolution of 30 m. Water yield modeling was performed using the annual water yield index of the InVEST software. The model inputs included land use and cover maps from three different time series along with data on precipitation, potential evapotranspiration, soil depth, water availability for plants, and local biophysical tables. The results from the InVEST model were analyzed using an ordinary least squares (OLS) regression model to estimate the impact of land use/cover changes on water yield. This method allows for a detailed examination of the relationship between land use/cover changes and their impacts on the water yield.
Keywords: <i>Ecosystem services, Land use/land cover change, Ordinary least squares regression, Water yield.</i>	Results: The results showed that between 1999 and 2023, the area of green spaces, including agricultural lands, gardens, and pastures, decreased by 161.21 km ² , or 31 percent. Consequently, the annual water production (runoff) increased from 105 to 130 million cubic meters. In addition, the area of the minimum error zone decreased from 445.3 to 23.5 km ² , indicating a decrease in the reliability of the model. Such findings indicated the high variability and complexity of hydrological interactions and indicated the severe effects of overdevelopment and increasing land use/cover pressures.
	Conclusions: The results of this study showed that the water production capacity (runoff) of the ecosystem was vulnerable to changes in land use and land cover. These changes increased runoff, reduced water permeability in the soil, and disrupted the hydrological balance of the region. Therefore, it is necessary to use integrated modeling approaches and simultaneously pay attention to climate change, socio-economic factors, and land use/cover planning. Regional planning should also emphasize preservation and restoration of green spaces and smart management of urban development, which is an inevitable necessity to maintain ecosystem resilience and water resource sustainability.

Cite this article: Moteshareei, M., Malekmohammadi, B., & Ramezani Mehrian, M. (2025). Application of the Ordinary Least Squares (OLS) Regression Model to Assess the Impact of Land Use Change on Water Yield Ecosystem Service (Case Study: Lavasanat District, Tehran Province), *Journal of Environmental Studies*, 51 (3), 273- 292. <http://doi.org/10.22059/jes.2025.387056.1008561>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/jes.2025.387056.1008561>

Introduction

Urban development and population growth have led to significant changes in land use/cover. These changes, especially in regions near metropolitan areas, are important challenges in natural resource management and ecosystem sustainability. The increasing rate of urbanization in many regions, such as Lavasanat, has created more complex and multi-layered patterns of land use change in recent decades. Such processes are not confined to the reduction of vegetation cover alone but extend to structural changes in the landscape, increased habitat fragmentation, and increased pressure on the water cycle. Hence, the scientific study of the role of these changes with regard to ecosystem services may play a leading role in predicting future risks and achieving sustainable planning. Land use changes can transform the structure and function of ecosystems and severely affect ecosystem services. In this regard, water production, as one of the vital ecosystem services, is of particular importance because the reduction of natural cover as a result of urban expansion causes negative effects on water resources, especially on the peripheries of metropolitan areas. Therefore, understanding the relationships between land use/cover changes and water production is essential for sustainable water resource management and land use planning. Furthermore, global evidence shows that mountainous and peri-urban areas are more sensitive to land-use changes than other areas, and even small changes can lead to major disruptions to the water balance. This is particularly important in semi-arid regions where water demand is high. Despite the importance of ecosystem services and the vital role of water production, rapid and widespread changes in land use/cover have put increasing pressure on water resources, which leads to a quantitative and qualitative degradation of water resources and serious challenges in sustainable management. In this context, a detailed and quantitative study of the impact of these changes is an essential step to provide effective solutions for conserving urban water resources. Recently, special attention has been paid to ecosystem services related to the urban water cycle in areas facing water scarcity or severe pollution. In addition, concerns about climate change and the increasing frequency of droughts have increased the need for studies that can explain long-term trends in water production. Integrating ecological models with statistical analyses in these circumstances can significantly increase the accuracy of the analyses. Water production is affected by various factors such as population trends, climate variability, economic activities, and especially land use changes. In this regard, water production modeling has been considered an efficient method for analyzing the spatio-temporal effects of land use. The InVEST modeling tool was used to analyze the ecosystem changes. The main innovation of this study was combining the InVEST model with ordinary least squares (OLS) regression analysis. The InVEST model simulates water production spatially, and ordinary least squares regression analysis quantifies the intensity and direction of the impact of land use changes. This combination provides a more detailed view of the relationship between spatial changes and ecosystem services, which has rarely been seen in previous studies. Using Landsat images, land use changes in Lavasanat over 24 years were modeled, and a multi-dimensional analysis of their impact on water production was provided. The results of this study can help decision-makers in natural resource management and urban sustainability, and by identifying the strengths and weaknesses of water management practices, it provides valuable information for biodiversity conservation and sustainable urban development.

Method

This study examined land use/cover changes in the Lavasanat district over a 24-year period (1999-2023) and their impact on water production (runoff). The research methodology involved processing Landsat satellite images with an accuracy of 30 meters with eCognition Developer 9.01 software, using the Annual Water Yield model of InVEST software. The model inputs included land use/cover maps in three time periods, precipitation, potential evapotranspiration, soil depth, plant available water, and a biophysical table. In this study, all parameters related to climatic conditions, such as precipitation and potential evapotranspiration, were considered constant to assess only the effect of land use/cover changes on water production. This approach allowed the role of human factors to be more accurately separated and interpreted, and modeling results could be presented with minimal uncertainty due to climatic fluctuations. Then, the results of InVEST modeling were entered as the dependent variable into the ordinary least squares regression model to quantitatively evaluate the impact of land use/cover changes as the independent variable on water production. Using the ordinary least squares regression model made it possible to numerically and quantitatively analyze the intensity and direction of the effect of land use changes and examine the relationship between spatial changes and water production in the form of linear patterns. In addition, statistical analysis of modeling results helped to identify areas with high sensitivity to land use changes and provide a basis for sustainable water resources planning. This approach allows for the statistical analysis of the relationship between spatial changes in land use/cover and water production (runoff) values and helps researchers to examine the magnitude and direction of these effects in the form of linear patterns. Also, combining satellite data with statistical analysis allowed validating the model results and reducing possible errors caused by input data, increasing the accuracy of predictions.

Results

The results of the study showed that during the years 1999 to 2023, a decrease of 161.21 square kilometers (31 percent)

of green spaces led to an increase in the volume of produced water (runoff) from 105 to 130 million cubic meters. According to the obtained results, with other factors held constant (except for land use/cover change), the volume of produced water in Lavasanat increased from 105 million cubic meters in 1999 to 130 million cubic meters in 2023. This significant increase in runoff volume indicated that the reduction of green cover and the development of urban areas could directly affect the hydrological cycle and reduce water infiltration into the soil, even when constant climatic conditions were considered. This growth, due to land use changes, was justified by a linear relationship and a high coefficient of determination ($R^2=0.9624$), indicating a strong correlation between these changes and the increase in runoff, so that about 24 million cubic meters had been added to the volume of runoff in 24 years. The high coefficient of determination indicated that land use change was the dominant factor in the increase in runoff, and almost all the observed changes could be attributed to human interventions. This fact highlighted the importance of land use management in maintaining hydrological balance and preventing increased risk of surface floods. The average water production changed from 204 to 251 mm, and the actual evapotranspiration changed from 179 to 132 mm. Also, the error of the ordinary least squares regression model in 1999 was highly accurate in agricultural, rangeland, and parkland land uses; only some residential areas were overestimated in red. In 2013, it expanded in urban and water areas in parks, indicating a decrease in the model's accuracy in these land uses. In 2023, the yellow area decreased, residential areas were heavily red (overestimated), and natural land uses such as rangeland and water resources were predominantly blue (underestimated). This pattern indicated that with increasing urbanization and land use change, the model performance accuracy declined in predicting runoff in urban and natural areas, and more advanced models were needed. This trend of decreasing model accuracy with increasing urbanization indicated that simple models may not be able to fully simulate the hydrological complexities resulting from structural and microscale land use changes, and the use of more advanced models was essential for future analyses. These results emphasized that the use of relative variables and the ordinary least squares regression model could provide a clear picture of the trend and intensity of changes in water production services. Ultimately, these findings can help decision-makers identify areas sensitive to increased runoff and set appropriate management priorities to maintain green cover and control urban development. Also, trend analysis can provide a basis for sustainable policymaking in urban water resources management.

Conclusions

Water supply is one of the key ecosystem services that is affected by natural and human factors and plays an important role in the development of societies. Declining water quality and quantity can impact agriculture, drinking water supply, and local economies and increase the costs of flood and drought crisis management. In the Lavasanat district, during the study period, the reduction of green spaces and the rapid expansion of urban (residential) areas reduced water permeability of the soil and increased surface runoff, disrupting the hydrological balance. Increased surface runoff not only disrupts the hydrological cycle but can also lead to soil erosion, surface water pollution, and reduced biodiversity. This fact emphasizes that urban development without careful planning and neglecting ecosystem services can have long-term and irreversible impacts on water resources and natural ecosystems. Identifying and protecting sensitive green areas, especially in marginal and mountainous areas, is of particular importance. The accuracy of the ordinary least squares regression model was favorable in the early years but decreased with the intensification of urbanization. This trend has put pressure on ecosystem services and increased runoff production; rapid urban development also reduced the accuracy of simple water resource prediction models and showed the complexity of hydrological interactions. The use of hybrid, dynamic, or machine learning-based models can enhance hydrological predictability in urban areas with rapid land use changes. The decrease in model accuracy with increasing urbanization indicates that simple models may not be able to predict hydrological behavior in areas with severe land use changes, and therefore the use of hybrid or more advanced models is necessary for water resources planning in developing regions. Therefore, smart and sustainable management of land use/cover by preserving and restoring green spaces and controlling urban development is essential to improve water quality and increase ecosystem resilience. Besides designing green belts and restoring natural cover, the development of urban policies based on ecosystem service assessment, runoff management, and protection of waterways can reduce the pressure on ecosystems. In addition, the integration of satellite data, spatial modeling, and statistical analyses can form a sound basis for management decisions. Preventive policy measures, creation of greenbelts, and restoration of natural cover can enhance the resilience of ecosystems and reduce surface runoff and flash flood risks. Success in the management measures and enhancement of resilience of ecosystems depends on the participation of the local community and public education regarding the importance of maintaining green cover and sustainable management of water resources. Consideration of ecosystem services in urban planning should be a key principle for policymakers and natural resource managers. It is expected that prospective, ecosystem-based urban planning supported by land use change scenarios will be able to reduce pressure on ecosystem services and water resources and sustain urban development in a way that is congruent with sustainability.

Author Contributions

Marzie Motesharei: Responsible for sample preparation, conducting experiments, collecting data, performing calculations, conducting statistical analyses, interpreting results, and drafting the manuscript.

Bahram Malekmohammadi: First thesis supervisor, overseeing research design, managing the research process, reviewing results, and finalizing the manuscript.

Majid Ramazani Maherian: Second thesis supervisor, assisting with research design, supervising research activities, and reviewing and editing the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the National Meteorological Organization for providing data and to the reviewers for their constructive feedback.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grants from funding agencies.

Conflict of interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

کاربرد مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS) در بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی بر خدمت اکوسیستمی تولید آب (مطالعه موردی: بخش لواسانات استان تهران)

مرضیه متشرعی^۱، بهرام ملک محمدی^۲✉، مجید رمضانی مهریان^۳

۱. گروه برنامه ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: marziemotesharei@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم های محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: malekb@ut.ac.ir

۳. گروه تحقیق و توسعه علوم انسانی، پژوهشکده سمت، تهران، ایران. رایانامه: mehrian@samt.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: تحقیق حاضر در راستای پایش تغییرات کاربری/ پوشش اراضی در یک دوره ۲۴ ساله (۱۹۹۹ تا ۲۰۲۳) با استفاده از تصاویر ماهواره ای لندست و تحلیل اثرات آن بر تولید آب با بهره گیری از مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS) است. این پژوهش به بررسی آسیب پذیری تولید آب به عنوان یکی از خدمات اکوسیستمی در برابر تغییرات ناشی از کاربری/ پوشش اراضی در بخش لواسانات استان تهران می پردازد، جایی که تغییرات سریع در کاربری/ پوشش زمین به وضوح قابل مشاهده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۷	روش پژوهش: برای انجام این تحقیق، از تصاویر ماهواره ای لندست برای پایش تغییرات کاربری/ پوشش اراضی استفاده شده است. به منظور مدل سازی تولید آب، از مدل بازده سالانه آب (Annual Water Yield) نرم افزار InVEST بهره گرفته شده است. ورودی های مدل شامل نقشه های کاربری/ پوشش اراضی در سه دوره زمانی مختلف، بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل، عمق خاک، آب قابل دسترس گیاه و جدول بیوفیزیکی می باشد. سپس نتایج حاصل از مدل سازی InVEST به عنوان متغیر وابسته به مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی وارد شد تا تأثیر تغییرات کاربری/ پوشش اراضی به عنوان متغیر مستقل، بر تولید آب به صورت کمی ارزیابی شود. این رویکرد امکان تحلیل آماری رابطه بین تغییرات فضایی کاربری اراضی و مقادیر تولید آب را فراهم کرده و به پژوهشگران کمک می کند تا میزان و جهت این تأثیرات را در قالب الگوهای خطی بررسی نمایند.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۰	یافته ها: نتایج تحقیق نشان داد که در طول سال های ۱۹۹۹ تا ۲۰۲۳، کاهش ۱۶۱/۲۱ کیلومتر مربع (۳۱ درصد) از فضاهای سبز شامل زمین های کشاورزی، باغات و مراتع، منجر به افزایش حجم آب تولیدی (رواناب) از ۱۰۵ به ۱۳۰ میلیون مترمکعب گردید. همچنین دقت پیش بینی تولید رواناب با کمترین میزان خطا، بر اساس مساحت کل منطقه مورد مطالعه (۵۱۷/۶۷ کیلومتر مربع)، به طور قابل توجهی کاهش یافت و از ۴۴۵/۳ به ۲۳/۵ کیلومتر مربع رسید. این تغییرات نشان دهنده افزایش پیچیدگی ارتباطات هیدرولوژیکی در اثر شهرنشینی است.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹	نتیجه گیری: نتایج بدست آمده بر آسیب پذیری ظرفیت تولید آب اکوسیستم در برابر تغییرات کاربری/ پوشش اراضی تأکید دارد. این تغییرات منجر به افزایش رواناب و کاهش نفوذپذیری خاک شده و تعادل هیدرولوژیکی منطقه را برهم زده اند. از این رو، بهره گیری از رویکردهای مدل سازی ترکیبی و برنامه ریزی کاربری زمین با تأکید بر حفظ فضاهای سبز و مدیریت هوشمند توسعه شهری برای پایداری منابع آبی ضروری است.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵	
کلیدواژه ها: تغییرات کاربری/ پوشش اراضی، تولید آب، خدمات اکوسیستم، رگرسیون حداقل مربعات معمولی.	
استناد: متشرعی، مرضیه؛ ملک محمدی، بهرام و رمضانی مهریان، مجید. (۱۴۰۴). کاربرد مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS) در بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی بر خدمت اکوسیستمی تولید آب (مطالعه موردی: بخش لواسانات استان تهران). نشریه محیط شناسی، ۵۱(۳)، ۲۷۳-۲۹۲. http://doi.org/10.22059/jes.2025.387056.1008561	
ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.	

© نویسندگان



DOI: <http://doi.org/10.22059/jes.2025.387056.1008561>

مقدمه

توسعه شهری و رشد جمعیت منجر به تغییرات قابل توجه در کاربری و پوشش اراضی شده است. این تغییرات، به‌ویژه در مناطق پیرامون کلان‌شهرها، از چالش‌های مهم در مدیریت منابع طبیعی و پایداری اکوسیستم‌ها به شمار می‌روند (دانشی و همکاران، ۲۰۲۱). تغییرات کاربری اراضی می‌توانند ساختار و عملکرد اکوسیستم‌ها را دگرگون کرده و خدمات اکوسیستمی را به شدت تحت تأثیر قرار دهند. در این میان، تولید آب به‌عنوان یکی از خدمات حیاتی اکوسیستم، اهمیت ویژه‌ای دارد؛ چرا که کاهش پوشش‌های طبیعی در نتیجه گسترش شهری، اثرات منفی بر منابع آبی به‌ویژه در حاشیه کلان‌شهرها به دنبال داشته است. بنابراین درک روابط بین تغییرات کاربری/پوشش اراضی و تولید آب برای مدیریت پایدار منابع آب و برنامه‌ریزی کاربری اراضی ضروری است. با وجود اهمیت خدمات اکوسیستم و نقش حیاتی تولید آب، تغییرات سریع و گسترده در کاربری/پوشش اراضی فشار فزاینده‌ای بر منابع آب وارد کرده است که این امر کاهش کمی و کیفی منابع آب و چالش‌های جدی در مدیریت پایدار را به همراه دارد. در این شرایط، بررسی دقیق و کمی تأثیر این تغییرات، گامی ضروری برای ارائه راهکارهای مؤثر در حفظ منابع آب شهری به شمار می‌رود. خدمات اکوسیستمی به مزایای مستقیم یا غیرمستقیمی اطلاق می‌شود که انسان‌ها از اکوسیستم‌ها دریافت می‌کنند و به چهار دسته خدمات تولیدی^۱، تنظیمی^۲، فرهنگی^۳ و حمایتی^۴ تقسیم می‌شوند (میرسنجری و همکاران، ۲۰۲۰). تولید آب به‌عنوان یکی از خدمات تولیدی، نقش مهمی در سلامت جوامع شهری و مدیریت منابع آبی ایفا می‌کند (محمدیاری و همکاران، ۱۴۰۲). اخیراً توجه ویژه‌ای به خدمات اکوسیستمی مرتبط با چرخه آب شهری در مناطقی که با کمبود آب یا آلودگی شدید مواجه هستند، معطوف شده است. تولید آب تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند روندهای جمعیتی، تنوع اقلیمی، فعالیت‌های اقتصادی و به‌ویژه تغییرات کاربری اراضی قرار دارد (دانشی و همکاران، ۲۰۲۱). تغییرات سریع در کاربری و پوشش اراضی، به همراه تغییرات اقلیمی، می‌تواند اثرات چشمگیری بر خدمات مرتبط با چرخه آب داشته باشد (Lyu et al., 2019). از این رو، مدیریت منابع آب در مناطق شهری، به‌ویژه در مواجهه با تغییرات اقلیمی، از اهمیت بالایی برخوردار است. برای مثال، افزایش نفوذپذیری آب در سطح اراضی می‌تواند موجب تغذیه آب‌های زیرزمینی، افزایش تبخیر و تعرق از سطوح گیاهی و در نهایت بهبود شرایط آب‌وهوایی شهری شود که به حفظ تنوع زیستی و ارتقای کیفیت زندگی منجر می‌شود.

در این راستا، مدل‌سازی تولید آب به‌عنوان روشی کارآمد برای تحلیل اثرات فضایی-زمانی کاربری اراضی مورد توجه قرار گرفته است. ابزار مدل‌سازی InVEST^۵ توسط دانشگاه استنفورد، سازمان حفاظت از طبیعت و صندوق سرمایه جهانی طبیعت توسعه یافته برای تحلیل تغییرات اکوسیستم‌ها و تأثیرات آن‌ها بر منافع انسان‌ها طراحی شده است (زرندیان و همکاران، ۲۰۲۳). این مدل شامل مجموعه‌ای از مدل‌های فضایی است که با استفاده از نقشه‌های کاربری/پوشش اراضی و داده‌های بیوفیزیکی، به تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی خدمات اکوسیستم می‌پردازد (Gao et al., 2017). نوآوری اصلی این مطالعه، در استفاده ترکیبی از مدل InVEST و تحلیل رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS)^۶ نهفته است. مدل InVEST تولید آب را به‌صورت مکانی شبیه‌سازی می‌کند و تحلیل رگرسیون حداقل مربعات معمولی شدت و جهت تأثیر تغییرات کاربری اراضی را کمی می‌سازد. این ترکیب، دید دقیق‌تری از رابطه تغییرات فضایی با خدمات اکوسیستمی ارائه می‌دهد که در مطالعات پیشین کمتر دیده شده است. با استفاده از تصاویر لندست، تغییرات کاربری در لواسانات طی ۲۴ سال مدل‌سازی شده و تحلیل چندجانبه‌ای از تأثیر آن بر تولید آب فراهم شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان در مدیریت منابع طبیعی و پایداری شهری کمک کند و با شناسایی نقاط قوت و ضعف مدیریت آب، اطلاعات ارزشمندی برای حفاظت تنوع زیستی و توسعه پایدار شهری ارائه دهد.

1. Provisioning
2. Regulating
3. Cultural
4. Supporting
5. Integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs
6. Ordinary Least Squares

پیشینه پژوهش

۱-۲. پیشینه نظری

پوشش زمین و تغییرات کاربری آن از منظر نظری، به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر ساختار و عملکرد اکوسیستم‌ها شناخته می‌شود. بر اساس نظریه خدمات اکوسیستم، پوشش اراضی بر ظرفیت اکوسیستم برای ارائه خدماتی همچون تولید آب، تنظیم اقلیم و حفظ تنوع زیستی تأثیرگذار است (Xie et al., 2021). نظریه‌های اکولوژیکی بر این باورند که تغییرات کاربری زمین به‌خصوص شهرنشینی و کشاورزی، موجب اختلال در عملکرد اکوسیستم‌ها و کاهش کیفیت خدمات آن‌ها می‌شود (محمدیاری و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین دیدگاه‌های مدیریت منابع طبیعی بر اهمیت نقشه‌های کاربری زمین برای شناسایی مناطق حساس و بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع طبیعی تأکید دارند. مدل InVEST که بر پایه اصول نظری خدمات اکوسیستم بنا شده، به‌عنوان ابزاری معتبر برای ارزیابی تأثیر تغییرات کاربری زمین بر تولید آب و سایر خدمات شناخته می‌شود.

۲-۲. پیشینه تجربی

۱-۲-۲. مطالعات داخلی

مغرب و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از مدل InVEST و تحلیل داده‌های سنجش‌ازدور و نقشه‌های تغییر کاربری زمین، نشان دادند که توسعه اراضی ساخته‌شده در حوضه لواسانات منجر به افزایش رواناب و کاهش امنیت بوم‌شناختی شده است. عرفانی و همکاران (۱۴۰۲) در مطالعه‌ای در زیرحوضه‌های شمالی استان کرمان، با استفاده از مدل‌سازی گردادیان مکانی خدمت اکوسیستمی تولید آب و مدل InVEST، به تحلیل فضایی تغییرات تولید آب پرداختند و دریافتند پوشش گیاهی متراکم بیشترین تولید آب را دارد. ایزدی‌پور و همکاران (۱۴۰۳) با ترکیب مدل InVEST و تحلیل رگرسیون وزنی مکانی (GWR)^۱ در منطقه سیستان، رابطه معناداری بین نوع کاربری اراضی و تولید آب یافتند؛ به‌طوری‌که اراضی بایر بیشترین و مناطق ساخت‌وساز کمترین تولید آب را دارا بودند. خدامرادی و عابدین‌زاده (۱۴۰۳) نیز با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و مدل InVEST در حوزه آبخیز کسپیلان، به بررسی خدمت اکوسیستمی تولید آب پرداختند و اهمیت نقش تغییرات کاربری زمین در مدیریت منابع آب را تأیید کردند.

۲-۲-۲. مطالعات خارجی

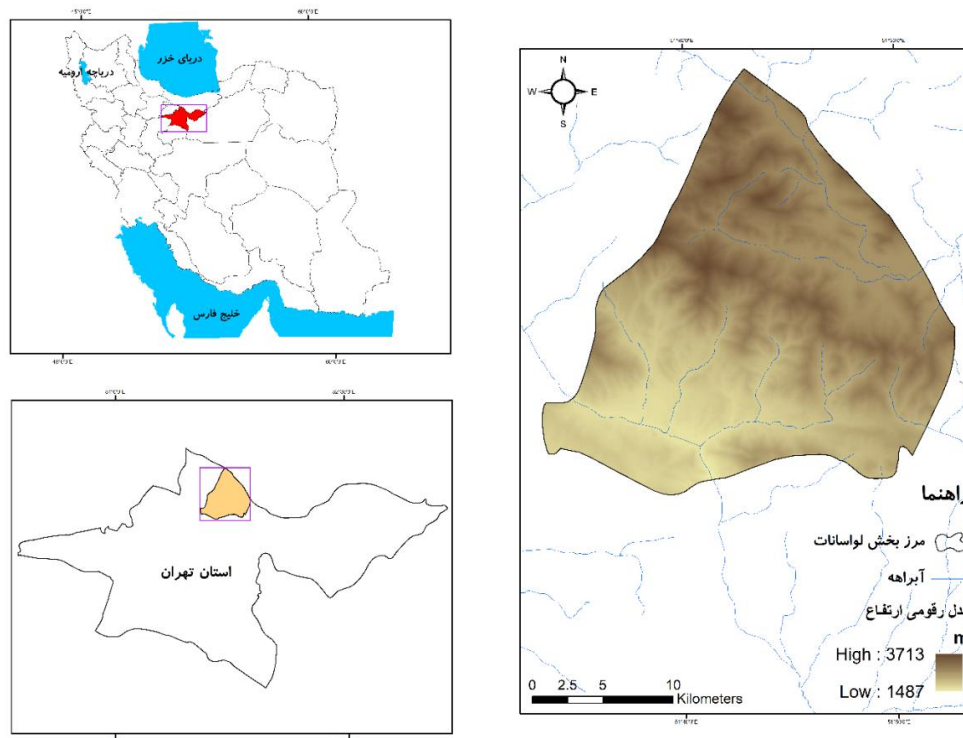
وانگ و همکاران (۲۰۲۲) در دلتا رود مروارید چین با مدل InVEST و تحلیل همبستگی نشان دادند که افزایش شهرنشینی باعث کاهش خدمات تنظیمی و حمایتی و افزایش تولید آب شده است (Wang et al., 2022). کوسی و همکاران (۲۰۲۳) در حوضه آبخیز سوس مراکش، با ترکیب مدل‌های ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT)^۲، InVEST و RIOS^۳ دریافتند تغییرات اقلیمی تأثیر قوی‌تری نسبت به تغییرات کاربری بر تولید آب و صادرات رسوب دارند (Kusi et al., 2023). یانگ و همکاران (۲۰۲۴) در حوضه اییینور با مدل InVEST و رویکرد سناریو محور، بیش از ۸۶ درصد کاهش تولید آب را ناشی از تغییرات اقلیم و تنها ۱۴ درصد را مربوط به تغییرات کاربری زمین دانستند (Yang et al., 2024). چن و همکاران (۲۰۲۵) در منطقه تجمع شهری یون‌نان مرکزی چین، با شبیه‌سازی شش سناریوی تغییر کاربری زمین و اقلیم و با استفاده از مدل‌های InVEST و PLUS^۴، تأثیر تغییرات بر تولید آب و خدمات اکوسیستم دیگر را بررسی کردند. نتایج نشان داد الگوی فضایی تولید آب ناهمگون بوده و تغییرات کاربری زمین اثر مستقیمی بر آن داشته است (Chen et al., 2025). این مطالعات اهمیت تغییرات کاربری زمین در تغییر هیدرولوژی و خدمات اکوسیستم را تأیید می‌کنند.

1. Geographically Weighted Regression
2. Soil and Water Assessment Tool
3. Resource Investment Optimization System
4. Patch- generating Land Use Simulation

روش‌شناسی پژوهش

۳-۱. منطقه مورد مطالعه

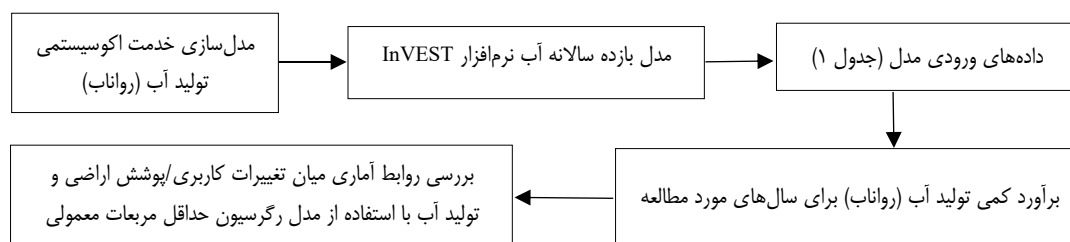
لواسانات، بخشی از شهرستان شمیرانات در شمال شرق استان تهران، شامل یک شهر (لواسان) و دو دهستان است. این منطقه با مساحت ۵۱۷/۶۷ کیلومترمربع، در مختصات جغرافیایی $51^{\circ} 33'$ تا $51^{\circ} 53'$ طول شرقی و $35^{\circ} 46'$ تا $36^{\circ} 20'$ عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). شبکه آبراهه‌های آن به رودخانه جاجرود و سد لتیان منتهی می‌شود که منبع مهم آب شرب تهران است. پارک ملی لار و مناطق حفاظت‌شده جاجرود و ورجین نیز ارزش بوم‌شناختی این بخش را افزایش داده‌اند.



شکل ۱. موقعیت بخش لواسانات از نظر تقسیمات کشوری (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۲)

۳-۲. روند کلی تحقیق

این مطالعه تغییرات کاربری/ پوشش اراضی در بخش لواسانات طی ۲۴ سال (۱۹۹۹-۲۰۲۳) و تأثیر آن بر تولید آب (رواناب) را بررسی می‌کند. روش پژوهش شامل پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست، مدل‌سازی تولید آب با نرم‌افزار InVEST و تحلیل آماری روابط بین تغییرات کاربری و منابع آبی با مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی است.



شکل ۲. نمودار روند تحقیق

۳-۳. تولید نقشه‌های کاربری / پوشش زمین

گام اول: شامل دانلود تصاویر ماهواره‌ای لندست برای سال‌های مورد مطالعه از آرشیو^۱ ۲- سطح^۲ ۳ به صورت داده‌های آماده تحلیل (ARD)^۳ بود که نیازی به تصحیح اتمسفری و رادیو متریکی ندارند (USGS, 2022). این سال‌ها به دلیل تطابق بارش با میانگین بلندمدت منطقه و کاهش اثر نوسانات اقلیمی انتخاب شدند؛ تصاویر فصل رشد (آگوست) نیز برای تفکیک بهتر کلاس‌های کاربری تهیه و با نرم‌افزار شی‌گرا^۴ پردازش شدند (جدول ۱).

جدول ۱. داده‌های ورودی، نمونه‌های طبقه‌بندی و پارامترهای ورودی مدل InVEST

دسته داده	نوع / پارامتر	مقدار / توضیح
تصاویر ماهواره‌ای	Landsat 7 ETM+	USGS، Aug 1, 1999، وضوح: ۳۰ متر، منبع: USGS
	Landsat 8 OLI and TIRS	USGS، Aug 31, 2013; Aug 11, 2023، وضوح: ۳۰ متر، منبع: USGS
	منابع کمکی	ArcBruTile; Google Earth Pro
نمونه‌های تعلیمی	باغات و کشاورزی	۲۰ نمونه (باغات اطراف شهر لواسان)
	مسکونی	۲۰ نمونه (شهر لواسان)
	منابع آب	۱۰ نمونه (سد لتیان)
	پارک (درختزار)	۱۵ نمونه (بوستان یاس (جنوب غربی منطقه))
	مرتع	۲۰ نمونه (بخش‌هایی از مناطق حفاظت شده ورجین و جاجرود)
پارامترهای سگمنت‌سازی	مقیاس ^۵	۵۰
	زبری ^۶	۰/۳
	نرمی ^۷	۰/۶
	وزن لایه‌ها (باند‌ها) ^۸	۱.۱.۱.۱.۱.۱
ورودی‌های مدل InVEST	نقشه کاربری / پوشش زمین	به صورت رستر طبقه‌بندی شده از طریق تصاویر لندست
	میانگین بارندگی سالانه، میانگین سالانه تبخیر و تعرق مرجع، عمق لایه محدودکننده ریشه	به صورت رستری، برحسب میلی‌متر
	گنجایش آب در دسترس گیاه	به صورت رستری، بدون واحد
	جدول بیوفیزیکی	به فرمت CVS
	مرز منطقه مورد مطالعه	به صورت پلیگونی (Shapefile)، برای محدود کردن محاسبات

طبقه‌بندی نظارت‌شده کاربری / پوشش اراضی شامل پنج کلاس اصلی (باغات و کشاورزی، مسکونی، منابع آب، پارک / درختزار و مرتع) و کلاس «سایر» (ابر) به صورت خودکار بود. نمونه‌های تعلیمی با تصاویر گوگل ارث انتخاب شدند. در این مرحله، دقت انتخاب نمونه‌ها اهمیت زیادی دارد؛ زیرا کیفیت نمونه‌های تعلیمی به طور مستقیم بر عملکرد الگوریتم و کاهش خطای طبقه‌بندی اثرگذار است. علاوه بر این، تلاش شد نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شوند که ناهمگنی فضایی منطقه را به خوبی پوشش دهند. برای تفکیک باغات و پارک‌ها، از ترکیب رنگ کاذب لندست (باندهای ۵، ۴، ۳ در لندست ۸ و ۴، ۳، ۲ در لندست ۷) استفاده شد؛ پوشش گیاهی به رنگ قرمز است و رنگ قرمز تیره مانند بوستان یاس مربوط به پارک‌های سوزنی‌برگ و رنگ روشن‌تر مربوط به باغات اطراف لواسان است که تفکیک دقیق دو کلاس را ممکن ساخت. گام دوم: شامل پردازش شی‌گرای تصاویر ماهواره‌ای با نرم‌افزار eCognition Developer

1. Collection
2. Level
3. Analysis Ready Data
4. eCognition Developer 9.01
5. Scale
6. Shape
7. Compactness
8. Image Layer weights

(Definiens, 2015) 9.01 بود که به عنوان روشی کارآمد در استخراج نقشه‌های کاربری/ پوشش اراضی شناخته می‌شود. برخلاف طبقه‌بندی پیکسل پایه، در روش شیء‌گرا تصویر بر اساس پارامترهای طیفی، بافت و محتوا سگمنت‌سازی شده و به واحدهای تصویری تبدیل می‌شود. سگمنت‌سازی با الگوریتم چند سطحی انجام شد (اسدالهی و همکاران، ۱۳۹۹). پس از تعریف کلاس‌ها و انتخاب نمونه‌ها، طبقه‌بندی نهایی با روش نزدیک‌ترین همسایه انجام گرفت. استفاده از طبقه‌بندی‌کننده نزدیک‌ترین همسایه، به دلیل عدم نیاز به توزیع آماری خاص و توانایی کار با ویژگی‌های طیفی و بافتی متنوع، رویکردی مناسب برای داده‌های شیء‌گرا محسوب و امکان دستیابی به نتایجی پایدار و قابل اتکا را فراهم نمود.

۳-۴. مدل‌سازی تولید آب (رواناب)

برای تعیین تولید آب در محدوده مطالعه، از مدل تولید آب نرم‌افزار (Natural Capital Project, 2023) InVEST 3.14.1 استفاده شد که تأثیر تغییرات کاربری زمین بر جریان سالانه رودخانه‌ها و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی را بر اساس چارچوب بادیکو (Budyko, 1974) شبیه‌سازی می‌کند.

ابتدا متوسط راندمان سالانه آب $Y(x)$ برای هر پیکسل با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Sharp et al., 2019). که در آن AET تبخیر و تعرق واقعی و P بارندگی سالانه است.

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

برای پوشش‌های گیاهی نسبت AET/P با معادله بودیکو به صورت:

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^\omega\right]^{1/\omega} \quad \text{رابطه (۲)}$$

محاسبه می‌شود؛ که در آن $PET = K_c \times ET_0$ و K_c وابسته به نوع پوشش است.

$$PET(x) = K_c(l_c) \cdot ET_0(x) \quad \text{رابطه (۳)}$$

پارامتر $\omega(x)$ با ویژگی خاک و اقلیم و طبق رابطه ۴ تعیین می‌شود.

$$\omega(x) = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1/25 \quad \text{رابطه (۴)}$$

AWC نیز از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$AWC(x) = \text{Min}(\text{Rest. layer. depth, root. depth}). PAWC \quad \text{رابطه (۵)}$$

برای مناطق بدون پوشش گیاهی، مقدار تبخیر و تعرق واقعی $AET(x)$ به طور مستقیم از تبخیر و تعرق مرجع $ET_0(x)$ با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$AET(x) = \text{Min}(K_c(l_c) \cdot ET_0(x), P(x)) \quad \text{رابطه (۶)}$$

در این رابطه، $ET_0(x)$ نمایانگر تبخیر و تعرق مرجع است و $K_c(l_c)$ ضریب تبخیر وابسته به نوع کاربری اراضی می‌باشد.

پارامتر Z ، یک ویژگی هیدروژئولوژیکی نمایانگر الگوی بارش و توپوگرافی محلی، معمولاً بین ۱ تا ۳۰ متغیر است (Donohue et al., 2012). برای اجرای مدل، داده‌های مکانی و اقلیمی وارد نرم‌افزار InVEST شدند (جدول ۳) و جدول بیوفیزیکی تهیه گردید (جدول ۲).

نقشه بارش از داده‌های ایستگاه‌های آبعلی و شمیران با روش درون‌یابی با وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)^۱ و نقشه تبخیر و تعرق پتانسیل با نرم‌افزار CROPWAT 8.0 (FAO, 2018) تولید شدند. عمق لایه محدودکننده ریشه و آب قابل دسترس گیاه از سایت فائو

استخراج و برش داده شد (FAO & IIASA, 2023). پارامتر Z در این مطالعه برابر ۱۳ در نظر گرفته شد.

جدول ۲. جدول بیوفیزیکی تولید آب بخش لواسانات (Natural Capital Project, 2020)

کاربری‌ها	کد	وجود یا عدم وجود پوشش گیاهی	حداکثر عمق ریشه‌دوانی (mm)	ضریب تبخیر و تعرق گیاه
کشاورزی و باغات	۱	۱	۱۰۰۰	۰/۹
مناطق مسکونی	۲	۰	۰	۰/۱
منابع آب	۳	۰	۰	۱
پارک	۴	۱	۳۵۰۰	۰/۹۵
مرتع	۵	۱	۲۰۰۰	۰/۸۵
طبقه‌بندی نشده (سایر)	۶	۰	۰	۰/۵

۳-۵. تحلیل اثرات تغییر کاربری / پوشش اراضی بر تولید آب با استفاده از مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی

برای تحلیل ارتباطات فضایی میان متغیرهای جغرافیایی، می‌توان از رگرسیون حداقل مربعات معمولی استفاده کرد که یکی از روش‌های رایج رگرسیون جهانی است. این روش ساده‌ترین مدل رگرسیونی است که ضرایب آن طوری تعیین می‌شوند که بهترین تطابق با داده‌ها و کمترین خطا را داشته باشند. در مدل‌سازی مکانی با این مدل فرض بر ثابت بودن ضرایب مدل در تمام نقاط منطقه است یعنی مقدار متغیر وابسته در کل منطقه یکسان تخمین زده می‌شود که این محدودیت، ضعف اصلی این روش در تحلیل مکانی است. مدل رگرسیون خطی ساده به صورت زیر بیان می‌شود:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (\text{رابطه ۷})$$

در مدل رگرسیون خطی ساده، y متغیر وابسته، X متغیرهای مستقل، ε خطا یا انحراف مدل، β_0 ضریب متغیر وابسته و β_1 ضریب متغیر مستقل است که برای تمام منطقه مورد مطالعه ثابت فرض می‌شود (Chang et al., 2024). تحلیل رگرسیون حداقل مربعات معمولی در محیط نرم‌افزار ArcMap 10.8.2 (ESRI, 2021) انجام شد.

در این پژوهش، مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی برای بررسی رابطه بین تولید آب سالانه و درصد مساحت کاربری‌های زمین استفاده شد تا سهم هر نوع کاربری در تغییرات رواناب کمی شود. این مدل امکان ارزیابی مستقیم و شفاف اثر هر کلاس کاربری بر تولید آب را فراهم می‌آورد و می‌تواند به شناسایی مناطق حساس که بیشترین تاثیر را در افزایش رواناب دارند کمک کند. هر چند مدل‌های پیشرفته‌تر مانند رگرسیون وزنی جغرافیایی و مدل‌های چند سطحی تفاوت‌های مکانی را بهتر در نظر می‌گیرند، این مدل به دلیل سادگی و قابلیت تفسیر، گزینه مناسبی برای تحلیل اولیه است. همچنین، استفاده از این مدل به محققان اجازه می‌دهد روندهای کلی تغییرات رواناب را در بازه‌های زمانی طولانی مشاهده کنند و نقاط بحرانی را برای برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب شناسایی نمایند. نتایج این مدل به‌خوبی اثرات کاربری‌ها بر تولید آب را شناسایی می‌کند و مدل‌سازی می‌تواند مبنای تحلیل‌های پیچیده‌تر باشد.

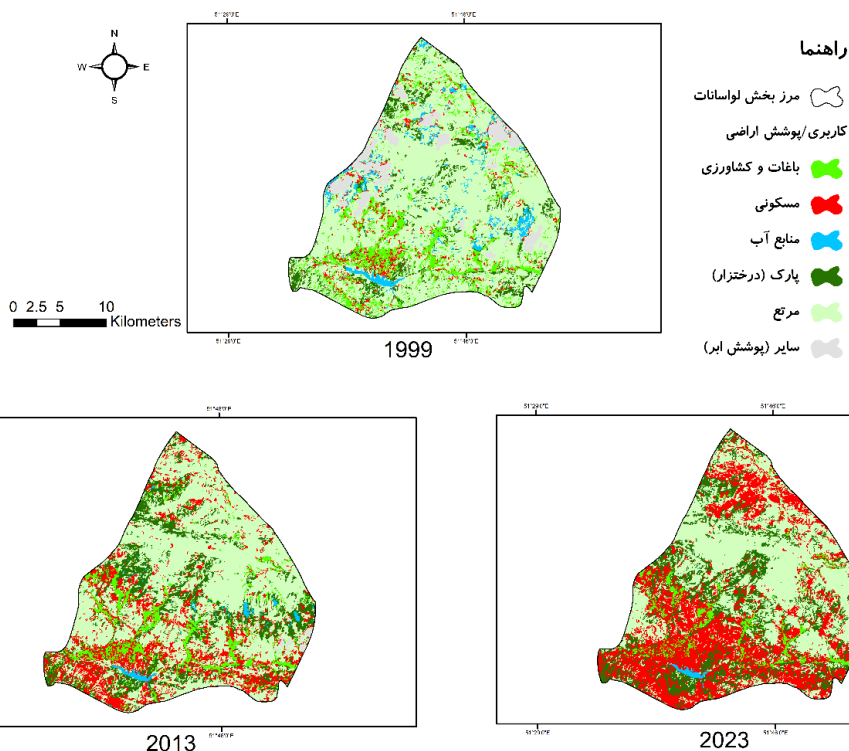
یافته‌های پژوهش

۴-۱. تغییرات کاربری / پوشش اراضی

روند تغییرات کاربری / پوشش اراضی در طول سال‌های مورد مطالعه حاکی از افزایش فشار بر روی منابع طبیعی و فضای سبز به دلیل رشد جمعیت و توسعه شهری است. این روند به کاهش تدریجی اراضی کشاورزی و مراتع و در عوض، توسعه بیشتر مناطق مسکونی منجر شده است. شکل‌های ۳ و ۴، همچنین جدول ۳ تغییرات کاربری / پوشش اراضی را به‌طور دقیق‌تری نشان می‌دهند.

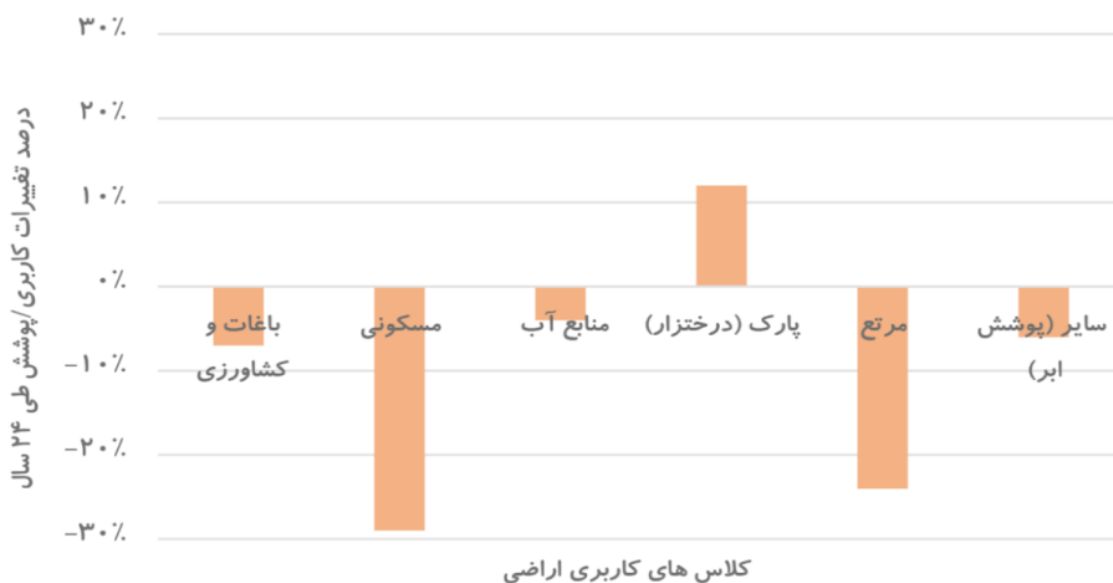
جدول ۳. مساحت و درصد کلاس‌های کاربری / پوشش اراضی بخش لواسانات

کاربری‌ها	باغات و کشاورزی	مسکونی	منابع آب	پارک	مرتع	سایر
۱۹۹۹	Km ²	۲۱/۲۳	۲۰/۴۰	۳۹/۹۰	۳۴۶/۱۵	۳۰/۶۸
درصد	۱۱	۴	۴	۸	۶۷	۶
۲۰۱۳	Km ²	۱۶/۷۳	۴/۹۸	۱۶/۵۶	۲۹۵/۲۳	۳/۳۲
درصد	۸	۱۷	۱	۱۷	۵۷	۰
تغییر ۱۹۹۹-۲۰۱۳	درصد	-۳	۱۳	-۳	-۱۰	-۶
نرخ تغییر سالانه ۱۹۹۹-۲۰۱۳	درصد	-۰/۲۱۴	۰/۹۲۸	-۰/۲۱۴	-۰/۷۱۴	-۰/۴۲۸
۲۰۲۳	Km ²	۱۶۸/۶۲	۲/۰۹	۱۰۲/۶۸	۲۲۲/۸۵	۰/۰۳۷
درصد	۴	۳۳	۰	۲۰	۴۳	۰
تغییر ۲۰۱۳-۲۰۲۳	درصد	-۴	۱۶	-۱	-۱۴	۰
نرخ تغییر سالانه ۲۰۱۳-۲۰۲۳	درصد	-۰/۴	۱/۶	-۰/۱	-۱/۴	۰
تغییر ۱۹۹۹-۲۰۲۳	درصد	-۷	۲۹	-۴	-۲۴	-۶



شکل ۳. نقشه‌های کاربری / پوشش اراضی

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد طی ۲۴ سال، ساختار کاربری اراضی لواسانات تغییر چشمگیری داشته است، به نحوی که زمین‌های کشاورزی و باغات از ۱۱ به ۴ درصد، مراتع از ۶۷ به ۴۳ درصد کاهش یافته‌اند، در حالی که مناطق مسکونی از ۴ به ۳۳ درصد افزایش یافته است. نرخ رشد سالانه مسکونی در دوره ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ (۱/۶ درصد) بیش از دوره قبل بوده و مراتع بیشترین کاهش را داشته‌اند. منابع آب از ۴ درصد به صفر رسیده‌اند. این تغییرات ساختار فضایی و هیدرولوژی منطقه را متحول کرده و باعث افزایش رواناب و کاهش تبخیر و تعرق شده‌اند. نمودار شکل ۴، رشد ۲۹ درصدی مسکونی و کاهش چشمگیر کشاورزی، مراتع و منابع آب را نشان می‌دهد. افزایش ۱۲ درصدی پارک‌ها نتوانسته کاهش فضای طبیعی را جبران کند و این کاهش تهدیدی برای پایداری اکوسیستم‌هاست.



شکل ۴. نمودار تغییرات درصدی کاربری/پوشش اراضی در بخش لواسانات در طول ۲۴ سال

۴-۲. نتایج تولید سالانه آب مدل InVEST

بر اساس جدول ۴، با ثابت بودن سایر عوامل، حجم آب تولیدی در لواسانات از ۱۰۵ میلیون مترمکعب در ۱۹۹۹ به ۱۳۰ میلیون مترمکعب در ۲۰۲۳ افزایش یافته است. این رشد، ناشی از تغییرات کاربری اراضی، با رابطه خطی و ضریب تعیین بالا ($R^2=0.9624$) توجیه می‌شود و بیانگر همبستگی قوی میان این تغییرات و افزایش رواناب است؛ به طوری که طی ۲۴ سال حدود ۲۴ میلیون مترمکعب به حجم رواناب افزوده شده است (شکل ۶). میانگین تولید آب از ۲۰۴ به ۲۵۱ میلی‌متر و تبخیر و تعرق واقعی از ۱۷۹ به ۱۳۲ میلی‌متر تغییر کرده است. افزایش پیکسل‌های آبی پررنگ در نواحی پرشیب و مسکونی (شکل ۵) نیز نشان‌دهنده اثر مستقیم کاهش پوشش گیاهی بر افزایش رواناب است.

جدول ۴. نتایج تولید سالانه آب^۱ بخش لواسانات

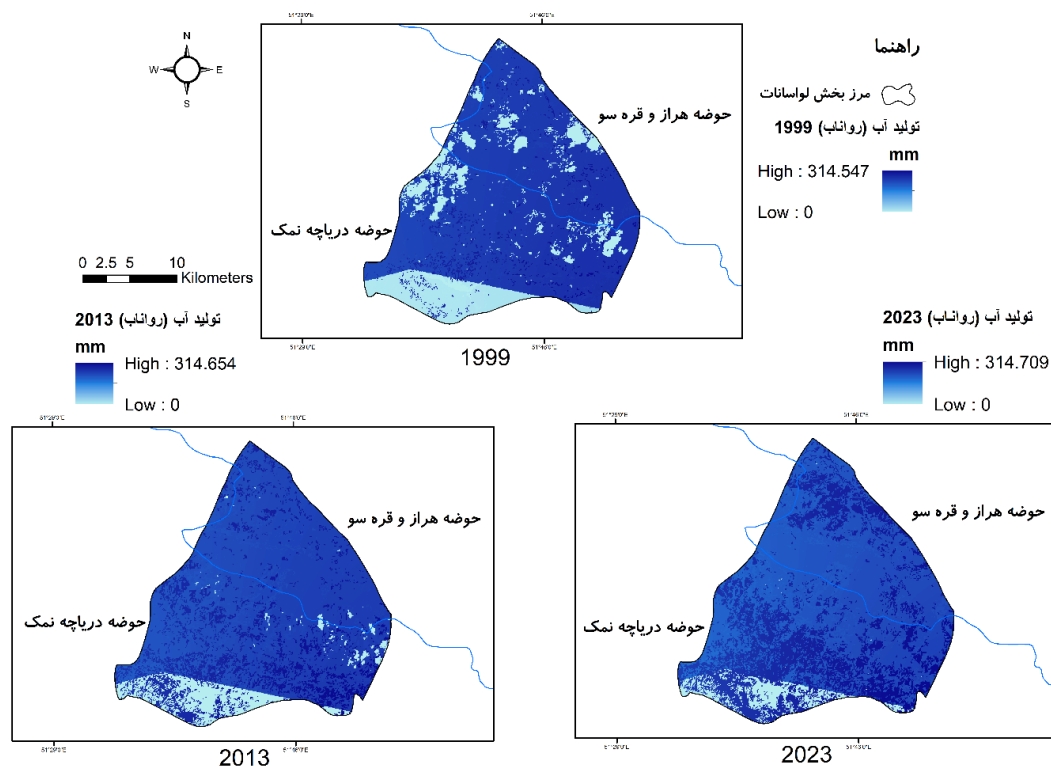
سال میلادی	میانگین تبخیر و تعرق واقعی در هر پیکسل از محدوده مورد مطالعه ^۲ (mm)	میانگین تولید آب در هر پیکسل از محدوده مورد مطالعه ^۳ (mm)	حجم کل آب تولید شده در محدوده مورد مطالعه ^۴ (m ³)
۱۹۹۹	۱۷۹/۳۸	۲۰۴/۷۶	۱۰۵۹۹۸۹۷۷/۶۰
۲۰۱۳	۱۴۷/۷۷	۲۳۶/۳۷	۱۲۲۳۶۲۶۱۷/۰۳
۲۰۲۳	۱۳۲/۲۹	۲۵۱/۸۵	۱۳۰۳۷۷۶۵۶/۴۴

1. Annual Water Yield

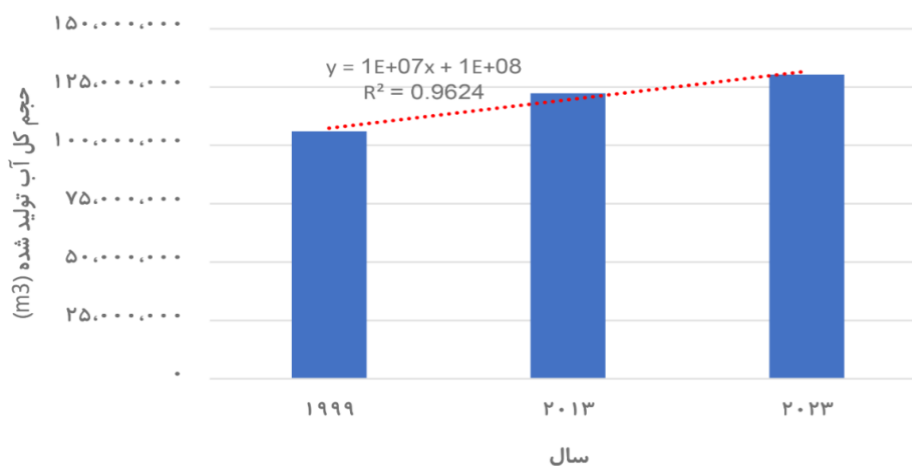
2. AET_mn

3. wyield_mn

4. wyield_vol



شکل ۵. نقشه‌های تولید آب سالانه



شکل ۶. نمودار تغییرات حجم کل آب تولید شده در بخش لواسانات طی سال‌های مطالعه

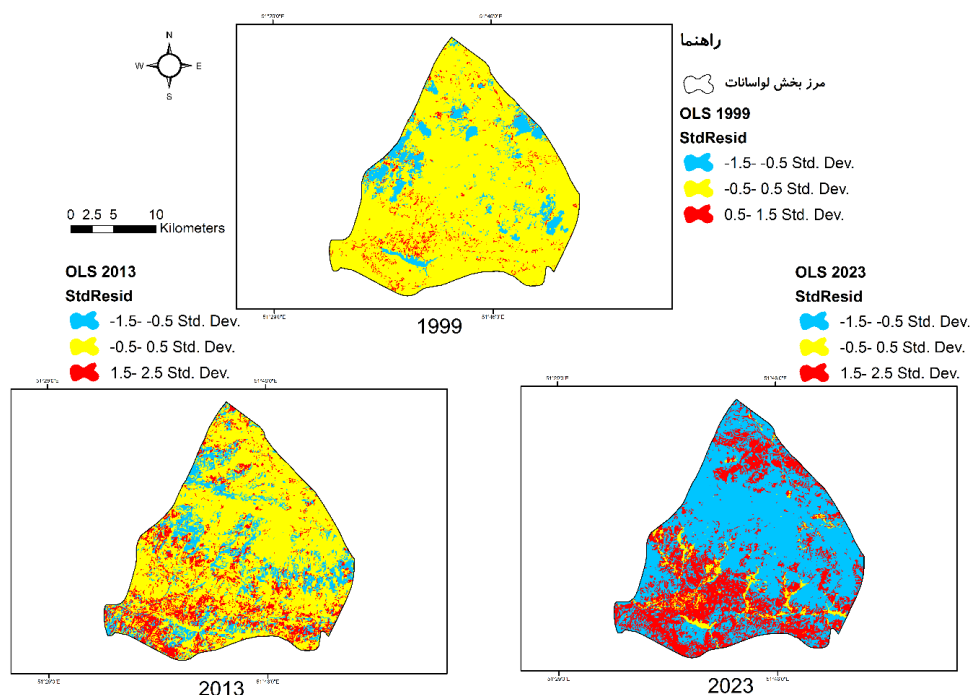
۳-۴. نتایج تحلیل اثرات تغییر کاربری / پوشش اراضی بر تولید آب با استفاده از مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که استفاده از متغیر درصدی مساحت کاربری / پوشش اراضی، دقت مدل رگرسیون را در تبیین تأثیر آن بر تولید رواناب افزایش داده است. ضریب متغیر مستقل در همه سال‌ها مثبت و معنادار ($p < 0.01$) بوده و در سال ۲۰۲۳ با ۵۴۴۷۸۸/۷۹ افزایش به بالاترین حد رسیده است که نشان‌دهنده شدت بالای تأثیر تغییرات کاربری در این سال است. در مدل قبلی، استفاده از مقادیر خام مساحت بخشی از این تغییرات را نشان نمی‌داد. مقادیر بالای R^2 ، ۰/۹۹، ۲۰۱۳، و ۰/۹۷ در سال ۲۰۲۳ بیانگر دقت بالای مدل در پیش‌بینی رواناب هستند. این نتایج تأکید می‌کنند که استفاده از متغیرهای نسبی و مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی می‌تواند تصویری روشن از روند و شدت تغییرات در خدمت تولید آب ارائه دهد.

جدول ۵. خلاصه نتایج حاصل از مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی برای سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳

متغیر ^۱	۱۹۹۹	۲۰۱۳	۲۰۲۳
ضریب ^۲ ثابت ^۳ (متغیر وابسته)	-۱۱۲۱۶۲۹/۰۶	-۱۷۶۰۳/۰۸	-۲۴۶۸۳۷/۶۱
ضریب درصد مساحت ^۴ (متغیر مستقل)	۴۹۸۳۹۴/۱۹	۴۹۸۴۰۰/۲۷	۵۴۴۷۸۸/۷۹
احتمال ^۵ ثابت	۰/۱۷	۰/۹۷	۰/۸۱
احتمال درصد مساحت	۰/۰۰*	۰/۰۰*	۰/۰۰*
ضریب اطمینان ^۶ ثابت	۰/۱۴	۰/۹۶	۰/۴۳
ضریب اطمینان مساحت	۰/۰۰*	۰/۰۰*	۰/۰۰*
R ^۲ چندگانه ^۷	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۷
معیار اطلاعات آکائیک ^۸	۲۰۱/۸۸	۱۹۹/۸۳	۲۰۴/۵۹

شکل ۷ توزیع خطای مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی را در سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ نشان می‌دهد. در ۱۹۹۹، اغلب منطقه زرد بوده و مدل در کاربری‌های کشاورزی، مرتع و پارک‌ها دقت بالایی داشته و تنها برخی نواحی مسکونی با رنگ قرمز دچار بیش برآورد شده‌اند. در ۲۰۱۳، رنگ قرمز در مناطق شهری و آبی در پارک‌ها گسترش یافته و کاهش دقت مدل را در این کاربری‌ها نشان می‌دهد. در ۲۰۲۳، گستره رنگ زرد کاهش یافته، مناطق مسکونی به شدت قرمز (بیش برآورد) و کاربری‌های طبیعی چون مرتع و منابع آب عمدتاً آبی (کم برآورد) شده‌اند. این الگوی رنگی بیانگر آن است که با افزایش شهرنشینی و دگرگونی کاربری‌ها، مدل در پیش‌بینی دقیق رواناب در مناطق شهری و طبیعی عملکرد ضعیف‌تری یافته و نیاز به مدل‌های پیشرفته‌تر احساس می‌شود.



شکل ۷. توزیع فضایی خطای مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی در پیش‌بینی تولید رواناب طی سه دوره زمانی

1. Variable
2. Coefficient
3. Intercept
4. Percentage of Area
5. Probability [b]
6. Robust_pr [b]
7. Multiple R_Squared
8. AICc

بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها

عرضه آب، یکی از خدمات کلیدی اکوسیستم، تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی است و نقش مهمی در توسعه جوامع دارد. در بخش لواسانات، طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۲۳، کاهش ۳۱ درصدی فضاهای سبز و گسترش سریع مناطق شهری، نفوذپذیری خاک را کاهش و رواناب سطحی را افزایش داده و تعادل هیدرولوژیکی را مختل کرده است. در این میان، الگوی فضایی توسعه نیز اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا تمرکز ساخت‌وساز در شیب‌های تند و حاشیه آبراهه‌ها می‌تواند شدت اختلالات هیدرولوژیک را به‌مراتب افزایش داده و ظرفیت طبیعی ذخیره و نفوذ آب را کاهش دهد. دقت مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی در سال‌های اولیه مطلوب بود اما با تشدید شهرنشینی کاهش یافت. این روند خدمات اکوسیستم را تحت فشار قرار داده و تولید آب را ناپایدار کرده است؛ از این‌رو، مدیریت پایدار اراضی و حفظ فضاهای سبز برای پایداری منابع طبیعی و ارتقای کیفیت زندگی ضروری است. با این حال، تجربه مناطق مشابه نشان داده است که تنها افزایش سطح فضای سبز کافی نیست، بلکه پیوستگی و ارتباط فضایی لکه‌های سبز نیز بر پایداری چرخه آب اثر مستقیم دارد. ایجاد کریدورهای اکولوژیک و کمربندهای سبز می‌تواند بخشی از این ناپایداری را کاهش دهد.

بررسی مطالعات پیشین دیدگاهی جامع از تأثیر تغییرات کاربری/ پوشش اراضی بر خدمات اکوسیستمی، به‌ویژه تولید آب، ارائه می‌دهد. مطالعات داخلی مانند پژوهش احمدی میرقائد و سوری (۱۴۰۲) در حوضه آبخیز تراز و ایزدی‌پور و همکاران (۱۴۰۳) در منطقه سیستان، با بهره‌گیری از مدل InVEST نشان داده‌اند که تغییر کاربری از پوشش‌های طبیعی به مناطق کشاورزی و ساخته شده، منجر به کاهش قابل توجه تولید آب شده است. نتایج این مطالعات با یافته‌های محمدیاری و عبدالمی (۱۴۰۳) نیز همخوانی دارد که بیان می‌کند تبدیل جنگل‌ها به مراتع و اراضی کشاورزی باعث افزایش رواناب و کاهش تغذیه آب زیرزمینی شده است. همچنین مطالعات بین‌المللی مانند تحقیق شی و همکاران (۲۰۲۴) در حوضه رودخانه هانجیانگ و ژو و ژو (۲۰۲۵) در منطقه دریاچه دونگتینگ چین نشان‌دهنده اثربخشی مدل‌های شبیه‌سازی ترکیبی و توزیعی در ارزیابی دقیق اثرات اکولوژیکی و اقتصادی تغییرات کاربری اراضی هستند (Xi et al., 2024; Zhu & Zhou, 2025). افزون بر یافته‌های پژوهش‌های یادشده، باید توجه داشت که تغییرات اقلیمی به‌ویژه افزایش دوره‌های خشکسالی می‌تواند اثرات ناشی از تغییرات کاربری را تشدید کرده و موجب نوسانات بیشتر در تولید آب شود. ترکیب این عوامل، ناهمگونی بیشتری در توزیع آب ایجاد کرده و مدیریت منابع را پیچیده‌تر می‌کند. یافته‌های مطالعه حاضر در بخش لواسانات نشان می‌دهد کاهش فضاهای سبز طی دو دهه باعث افزایش رواناب، کاهش نفوذپذیری و تضعیف تعادل هیدرولوژیکی شده است. توسعه سریع شهری نیز دقت مدل‌های ساده پیش‌بینی منابع آب را کاهش داده و پیچیدگی تعاملات هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد. در این شرایط، نبود یکپارچگی در مدیریت منابع آب و خاک می‌تواند حتی اقدامات حفاظتی موجود را بی‌اثر کند، زیرا کارایی راهکارها تا حد زیادی وابسته به هماهنگی نهادها و مشارکت فعال ذی‌نفعان است. بنابراین مدیریت هوشمند و پایدار کاربری اراضی با حفظ و احیای فضاهای سبز و کنترل توسعه شهری برای بهبود کیفیت آب و افزایش تاب‌آوری اکوسیستم ضروری است. همچنین ارتقای آگاهی عمومی و جلب مشارکت جامعه محلی نقشی کلیدی در موفقیت این رویکرد دارد، زیرا اجرای برنامه‌های حفاظتی بدون پذیرش اجتماعی، اثربخشی محدودی خواهد داشت.

در این مطالعه، مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی با سادگی و قابلیت تفسیر بالا، رابطه کمی بین تغییرات کاربری اراضی و تولید آب را به‌خوبی نشان داد و برای تحلیل‌های اولیه مؤثر بود. مدل InVEST نیز با شبیه‌سازی مکانی، تأثیر فضایی تغییرات کاربری بر تولید آب را دقیق‌تر نمایان کرد. یافته‌ها در لواسانات نشان دادند که گسترش مناطق شهری، با افزایش رواناب و کاهش نفوذپذیری، تعادل هیدرولوژیکی را برهم زده است. اگرچه مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی توان تحلیل خوبی داشت، دقت آن در نواحی با توسعه سریع کاهش یافت؛ در مقابل، InVEST با وجود دقت مکانی بالا، در بازنمایی فرآیندهای پیچیده‌ای چون جریان زیرسطحی یا ذوب برف و تبخیر از سطح محدود است. با توجه به این محدودیت‌ها، بهره‌گیری از مدل‌های دینامیک پیشرفته و داده‌های ریزمقیاس می‌تواند دقت پیش‌بینی و فهم ما از فرآیندهای هیدرولوژیک را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. استفاده از مدل‌های ترکیبی همچنین امکان تحلیل سناریوهای مختلف توسعه شهری و اثرات آن بر رواناب و کیفیت منابع آب را فراهم می‌کند. تجزیه و تحلیل حساسیت داده‌ها و شبیه‌سازی خطرات مکانی می‌تواند به شناسایی مناطق بحرانی و اولویت‌بندی حفاظت کمک کند. هم‌زمان، پیاده‌سازی سیاست‌های

مدیریت کاربری زمین مبتنی بر داده‌های دقیق و پایش مستمر، می‌تواند پاسخگویی اکوسیستم‌ها را به تغییرات کاربری بهبود بخشد. همکاری با جوامع محلی و اطلاع‌رسانی عمومی به اهمیت حفظ پوشش سبز و مدیریت منابع آب، اثرگذاری اقدامات مدیریتی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، این رویکرد می‌تواند در کاهش خطرات سیلاب و رواناب سطحی و ارتقای تاب‌آوری اکوسیستم‌ها مؤثر باشد. افزایش سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های سبز شهری، مانند پارک‌ها و سیستم‌های آبخوان پایدار، می‌تواند نقش حفاظتی اکوسیستم‌ها را تقویت کند. همچنین، تحلیل دوره‌ای تغییرات کاربری و ارزیابی اثرات محیطی قبل از صدور مجوزهای توسعه، به پیشگیری از آسیب‌های غیرقابل بازگشت کمک می‌کند. در نهایت، ادغام داده‌های مکانی، مدل‌های پیشرفته و تحلیل‌های رگرسیونی می‌تواند به عنوان پایه‌ای محکم برای برنامه‌ریزی پایدار منابع آب و توسعه شهری عمل کند و به سیاست‌گذاران و مدیران منابع طبیعی چشم‌اندازی جامع از اثرات تغییر کاربری/پوشش زمین ارائه دهد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

مشارکت نویسندگان

مرضیه متشرعی: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله

بهرام ملک محمدی: استاد راهنمای اول پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

مجید رضائی مهریان: استاد راهنمای دوم پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی مشخصی از نهادهای دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تشکر و قدردانی

این مقاله با دریافت بخشی از داده‌های مورد نیاز از سازمان هواشناسی کشور انجام گرفته است و نویسندگان بر خود لازم دانستند که از این سازمان تشکر و قدردانی نمایند. همچنین از داوران محترم مقاله بابت ارائه نظرات سازنده و ارزشمند که نقش به‌سزایی در بهبود کیفیت علمی مقاله ایفا نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

احمدی میرقائد، فضل‌الله؛ و سوری، بابک (۱۴۰۲). اثر تغییرات کاربری اراضی بر تولید آب در حوضه آبخیز تراز، استان خوزستان، جنوب غرب ایران. *فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۲ (۲)، ۴۶-۳۹.

اسدالهی، زهرا؛ کشتکار، مصطفی؛ و باده‌یان، ضیاءالدین (۱۳۹۹). بکارگیری تصاویر ماهواره‌ای و پردازش شیء‌گرا در استخراج نقشه کاربری و پوشش زمین‌ها با هدف مدل‌سازی خدمات اکوسیستم (مطالعه موردی: استان لرستان). *فصلنامه علوم محیطی*، ۱۸ (۳)، ۴۹-۷۳.

- ایزدی‌پور، محمدامین؛ دهمرده‌بهرروز، رضا؛ عین‌الهی‌پیر، فاطمه؛ و رجائی، فاطمه (۱۴۰۳). ارزیابی خدمات اکوسیستمی تولید آب بر اساس کاربری و پوشش اراضی در اکوسیستم‌های منطقه سیستان. *فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۳ (۴)، ۲۷-۴۷.
- خدامرادی، حمید؛ و عابدین‌زاده خیای، نازنین (۱۴۰۳). بررسی خدمت اکوسیستمی تولید آب با استفاده از مدل InVEST (مطالعه موردی حوزه آبخیز کسلیان). *اولین کنگره بین‌المللی احیاء بوم‌شناختی بر پایه طبیعت (با تاکید بر صیانت از شتر دوکوهانه)*، اردبیل.
- عرفانی، ملیحه؛ جورابیان شوشتری، شریف؛ اردکانی، طاهره؛ و جهانی شکیب، فاطمه (۱۴۰۲). مدلسازی گرادیان مکانی خدمت اکوسیستمی تولید آب با InVEST در زیرحوزه‌های شمالی استان کرمان. *مجله مدیریت آب و آبیاری*، ۱۳ (۱)، ۶۳-۸۱.
- محمدیاری، فاطمه؛ میرسنجری، میرمهرداد؛ زرنندیان، اردوان (۱۳۹۹). ارزیابی و مدل‌سازی اثرات گسترش شهری بر الگوهای سیمای سرزمین در کلان‌شهر کرج. *آمایش سرزمین*، ۱۳ (۱)، ۱۴۱-۱۶۶.
- محمدیاری، فاطمه؛ توکلی، محسن؛ و زرنندیان، اردوان (۱۴۰۲). مدل‌سازی توزیع مکانی عرضه و تقاضای خدمت اکوسیستمی تولید آب در حوضه آبخیز ایلام. *آمایش سرزمین*، ۱۵ (۱)، ۱۳۱-۱۴۵.
- محمدیاری، فاطمه؛ و عبدالهی، خدایار (۱۴۰۳). بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی و اقلیمی بر اساس مدل‌سازی توزیعی بیلان آب: مطالعه موردی حوزه آبخیز لردگان. *پژوهش‌های کاربردی مهندسی آب*، ۲ (۱)، ۵۷-۶۸.
- مرکز آمار ایران (۱۴۰۲). *آمار مناطق کوچک و منطقه‌ای* بازبازی از <https://amar.org.ir/statistics-of-small-and-regional-areas#app2>
- مغرب، یاسر؛ امیری، محمد جواد؛ صالحی، اسماعیل؛ و هویدی، حسن (۱۴۰۰). تحلیل امنیت بوم‌شناختی تغییرات کاربری اراضی حوضه لواسانات با استفاده از خدمات تولیدی اکوسیستم-مطالعه موردی: تولید آب. *اطلاعات جغرافیایی*، ۳۰ (۱۱۸)، ۵۹-۷۵.

References

- Ahmadi Mirghaed, F., & Souri, 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. <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.77944.1261> [In Persian]
- Asadolahi, Z., Keshtkar, M., & Badehian, Z. (2020). Application of satellite images and Object-oriented processing in land use/land cover map extraction to model ecosystem services (case study: Lorestan province). *Environmental Sciences*, 18(3), 49–73. <https://doi.org/10.29252/envs.18.3.49> [In Persian]
- Budyko, M. I. (1974). Climate and life. *Earth and planetary sciences*. San Diego, California: Academic. 1st Edition, volume 18. eBook ISBN: 9780080954530
- Chang, X., Chen, H., Li, J., Fei, X., Xu, H., & Xiao, R. (2024). Travel characteristics of urban residents based on taxi trajectories in China: Beijing, Shanghai, Shenzhen, and Wuhan. *Sustainability*, 16(7), 2694. <https://doi.org/10.3390/su16072694>
- Chen, G., Zhang, D., Zhao, J., & Zhang, L. (2025). Land use and climate change-based multi-scenario simulation of ecosystem service trade-offs/synergies: A case study of the central Yunnan urban agglomeration, China. *PLoS ONE*, 20(6), e0324015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324015>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125621>
- Definiens. (2015). *eCognition Developer 9.0.1* [Software]. Trimble. <https://www.trimble.com>
- Donohue, R.J., Roderick, M.L. & McVicar, T.R. (2012). Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *Hydrology*, 436, 35–50. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.033>
- Erfani, M., Joorabian Shoostari, S., 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. <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.349742.1024> [In Persian]
- ESRI. (2021). *ArcMap* (Version 10.8.2) [Computer software]. Environmental Systems Research Institute. <https://www.esri.com>
- Izadipoor, M. A., Dahmardeh Behrooz, R., Einollahi Pir, F., & Rajaei, F. (2024). Evaluating water yield ecosystem services through land use and land cover impacts in the ecosystems of Sistan region. *Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 27–47. <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.88366.1491> [In Persian]
- FAO. (2018). *CROPWAT 8.0: A computer program for irrigation planning and management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en>
- FAO & IIASA. (2023). *Harmonized World Soil Database version 2.0*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/en>
- Gao, J., Li, F., Gao, H., Zhou, C., & Zhang, X. (2017). “The impact of land-use change on water-related ecosystem services: a study of the Guishui River Basin, Beijing, China”, *Journal of Cleaner Production*, 163, S148–S155. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.049>
- Khodamoradi, H., & Abedin Zadeh Khiavi, N. (2024). Evaluation of water ecosystem service using the InVEST model (Case study: Kasilian watershed). *1st International Congress of Nature-Based Ecological Restoration (Emphasizing the Conservation of Bactrian Camels)*, Ardabil. <https://civilica.com/doc/2189740> [In Persian]
- Kusi, K., Khattabi, A., Mhammdi, N. (2023). Evaluating the impacts of land use and climate changes on water ecosystem services in the Souss watershed, Morocco. *Geosciences*, 16 (2), 126. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11206-6>
- Lyu, L., Wang, X., Sun, C., Ren, T., & Zheng, D. (2019). “Quantifying the effect of land use change and climate variability on Green water resources in the Xihe River Basin, Northeast China”, *Sustainability*, 11(2), 338. <https://doi.org/10.3390/su11020338>
- Mirsanjari, M. M., Zarandian, A., Mohammadyari, F., & Visockiene, J. S. (2020). “Investigation of the impacts of urban vegetation loss on the ecosystem service of air pollution mitigation in Karaj metropolis, Iran”, *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, pp. 1–23. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-020-08399-8>
- Mohammadyari, F., & Abdollahi, Kh. (2024). *Assessment of the impact of land use and climate changes based on a distributed water balance modeling: A case study of the Lordegan Watershed*. *Applied Researches in Water Engineering*, 2(1), 57–68. <https://doi.org/10.22034/arwe.2024.2035815.1020> [In Persian]
- Mohammadyari, F., Mirsanjari, M. M., & Zarandian, A. (2021). The Evaluation and Modeling of the Impacts of the Urban Development on Landscape Patterns in Karaj Metropolis. *Town and Country Planning*, 13(1), 141–166. <https://doi.org/10.22059/jtcp.2020.296920.670067> [In Persian]

- Mohammadyari, F., Tavakoli, M., & Zarandian, A. (2023). Modeling the Spatial Distribution of the supply and Demand of Water Provision Ecosystem Service in Ilam Watershed. *Town and Country Planning*, 15(1), 131-145. <https://doi.org/10.22059/jtcp.2023.355169.670377> [In Persian]
- Moarrab, Y., Salehi, E., Amiri, M. J., & Hoveidi, H. (2021). Analyzing ecological security of land use in Lavasanat Basin using ecosystem services (water production). *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 30 (118), 59-75. <https://sid.ir/paper/950142/en> [In Persian]
- Natural Capital Project. (2020). InVEST Data (Version 3.9) [Data set]. <http://releases.naturalcapitalproject.org/?prefix=invest/3.9.0/data>
- Natural Capital Project. (2023). *InVEST* (Version 3.14.1) [Computer software]. Natural Capital Project. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/invest>
- Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., & Chaplin Kramer, R. (2019). InVEST 3.7.0 Users Guide. *The Natural Capital Project*, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy. And World Wildlife Fund. https://www.researchgate.net/publication/323832082_InVEST_User's_Guide
- Statistical Center of Iran. (2023). Statistics of small and regional areas. Retrieved from <https://amar.org.ir/statistics-of-small-and-regional-areas#app2> [In Persian]
- USGS. (2022). Landsat Collection-2 Level-2 science products. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>
- Wang, S., Hu, M., Wang, Y., & Xia, B. (2022). Dynamics of ecosystem services in response to urbanization across temporal and spatial scales in a mega metropolitan area. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103561. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103561>
- Xie, Z., Li, X., Chi, Y., Jiang, D., Zhang, Y., Ma, Y., & Chen, S. (2021). "Ecosystem service value decreases more rapidly under the dual pressures of land use change and ecological vulnerability: A case study in Zhujiadian Island", *Ocean & Coastal Management*, 201, 105493. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105493>
- Xi, H., Yuan, Y., Dong, H., & Zhang, X. (2024). Quantifying the Effect of Land Use and Land Cover Changes on Spatial-Temporal Dynamics of Water in Hanjiang River Basin. *Remote Sensing*, 16(22), 4136. <https://doi.org/10.3390/rs16224136>
- Yang, X., Gu, X., Zhang, P., Liu, J., Zhang, W., & Long, A. (2024). Assessment of the Impact of Climate and Land Use Changes on Water Yield in the Ebinur Lake Basin. *Land*, 13(8), 1324. <https://doi.org/10.3390/land13081324>
- Zarandian, A., Mohammadyari, F., Mirsanjari, M. M., & Visockiene, J. S. (2023). "Scenario modeling to predict changes in land use/cover using Land Change Modeler and InVEST model: a case study of Karaj Metropolis, Iran". *Environmental monitoring and assessment*, 195(2), 273. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10740-2>
- Zhu, Y., & Zhou, M. (2025). Optimization of land use structure integrating ecosystem service function and economic development—A case study in Dongting Lake Ecological and Economic Zone, China. *Environmental and Sustainability Indicators*, 26, 100604. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100604>