

Research Paper

## **Investigating the Combined Effects of Climate Change and Human Interventions on Water Yield Using Ecosystem Services Modeling in the Hirmand Transboundary River Basin**

**Negin Kazemi<sup>1</sup>, Lobat Zebardast<sup>1\*</sup>, Roghaye Karami<sup>2</sup>**

1 Department of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

2 Department of Natural Ecosystems, Hamoun International Wetland Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran.

### **Keywords**

Ecosystem services, Transboundary rivers, InVEST model, Water yield, Hirmand River.

### **ABSTRACT**

The scarcity of water resources has always influenced environmental planning. This issue is particularly important in transboundary water resources, for which their planning and management are related to two or more neighboring countries, and every change or control over the water resource will affect the natural environment, human well-being, and livelihoods in the downstream country. In present research, modeling of water yield as one of the essential ecosystem services has been conducted in the Hirmand Transboundary River. In this regard, initially, data related to the Hirmand River were collected through a literature review, and then the boundary of the basin was determined. The information used in modeling consisted of changes in the climatological factors of three time series with 10-year intervals, including the years 2002, 2012, and 2022. These factors included minimum and maximum temperatures, rainfall, potential evapotranspiration, sunshine hours (radiation), and soil and land factors, such as root depth limit and the water readily available to plants in the soil and land use land cover maps. InVEST software version 3.3.2 was used to determine water yield in the watershed under study. The results related to the land cover changes obtained from the satellite imagery interpretation in three different time series indicate a decrease in water bodies. Also, analyses related to water production from water yield showed that the total volume of water produced in the basin in 2002 was 5.14 million m<sup>3</sup>. This amount was 4.23 million m<sup>3</sup> and 3.87 million m<sup>3</sup> in 2012 and 2022, respectively. This declining trend of almost 25 percent in water production in the Hirmand basin indicates negative impacts on the socio-economic situation and the livelihoods of the local people, and the environmental condition, particularly of the Hamoun Wetland. Among the proposed solutions of the present research is the necessity of efforts for securing the environmental water flow for the Hirmand River and Hamoun Wetland through cooperation between Iran and Afghanistan.

\*Corresponding Author.

Email Addresses: [Lzebardast@ut.ac.ir](mailto:Lzebardast@ut.ac.ir)

Kazemi, N., Zebardast, L. and Karami, R. (2025). Investigating the Combined Effects of Climate Change and Human Interventions on Water Yield Using Ecosystem Services Modeling in the Hirmand Transboundary River Basin. *Human Ecology*, 4(11), 1149-1165.



Doi: <https://doi.org/10.22034/he.2025.534185.1120>

## بررسی اثرات توأم تغییر اقلیم و عوامل انسانی بر تولید آب با بهره‌گیری از مدلسازی خدمات اکوسیستمی در حوضه آبریز فرامرزی رودخانه هیرمند

نگین کاظمی<sup>۱</sup>، لعبت زبردست<sup>۱\*</sup>، رقیه کرمی<sup>۲</sup>

۱ گروه برنامه ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.  
۲ گروه مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی، پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران.

چکیده	واژگان کلیدی
<p>محدودیت منابع آب همواره بر برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی تاثیرگذار بوده است. این مسئله به ویژه در مورد منابع آب فرامرزی، که برنامه‌ریزی و مدیریت آنها مربوط به دو یا چند کشور همسایه بوده و هر گونه تغییر و کنترل منابع آبی، بر شرایط محیط‌زیستی و رفاه و معیشت انسانی در کشور پائین دست تاثیر گذار است، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در پژوهش حاضر، مدل‌سازی تولید آب به عنوان یکی از خدمات حیاتی اکوسیستمی در حوضه آبریز فرامرزی هیرمند صورت گرفته است. بدین منظور ابتدا، اطلاعات مربوط به رودخانه هیرمند با استفاده از مرور منابع و پژوهش‌های صورت گرفته گردآوری و سپس مرز محدوده حوضه مطالعاتی مشخص گردید. اطلاعات مورد استفاده برای مدلسازی، تغییرات فاکتورهای اقلیمی سه دوره زمانی با فاصله ۱۰ ساله شامل سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲ شامل دمای کمینه و بیشینه، بارندگی، تبخیر و تعرق بالقوه، ساعت آفتابی (تابش) و فاکتورهای مرتبط با خاک و زمین شامل عمق محدود کننده ریشه و آب قابل دسترس گیاه در خاک و نقشه‌های کاربری‌اراضی و پوشش‌زمین می‌باشند. جهت برآورد میزان تولید آب در حوضه آبریز مورد بررسی، از مدل مربوط به تولید آب نرم‌افزار InVEST 3.3.2 بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از تفسیر تصاویر ماهواره‌ای مربوط به کاربری اراضی در سه بازه زمانی مختلف بیانگر وسعت کاهش پهنه‌های آبی است. علاوه بر آن تحلیل‌های مرتبط با تولید آب، نشان می‌دهند که حجم کل آب تولید شده در حوضه، در سال ۲۰۰۲، ۵/۱۴ میلیون مترمکعب بوده، این مقدار در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲ به ترتیب به ۴/۲۳ و ۳/۸۷ میلیون مترمکعب رسیده است. این روند کاهش تولید آب در حوضه آبریز هیرمند که به میزان تقریبی ۲۵ درصد بوده است، تاثیرات منفی بر شرایط اقتصادی-اجتماعی مردم منطقه و همچنین شرایط محیط زیستی، به ویژه تالاب هامون، به جای می‌گذارد. از جمله پیشنهادات این تحقیق، لزوم تلاش جهت تامین حبابه رودخانه هیرمند و تالاب هامون از طریق همکاری و رایزنی با کشور افغانستان می‌باشد.</p>	<p>خدمات بوم سازگان، رودخانه‌های فرامرزی، مدل InVEST، تولید آب، رودخانه هیرمند</p>

ارجاع به این مقاله: کاظمی، نگین، زبردست، لعبت و کرمی، رقیه. (۱۴۰۴). بررسی اثرات توأم تغییر اقلیم و عوامل انسانی بر تولید آب با بهره‌گیری از مدلسازی خدمات اکوسیستمی در حوضه آبریز فرامرزی رودخانه هیرمند. اکولوژی انسانی، ۴(۱۱)، ۱۱۴۹-۱۱۶۵.

## ۱. مقدمه

آب به عنوان منبعی حیاتی برای فعالیت‌های انسانی محسوب می‌شود که توزیع نامتوازن این منبع و دسترسی به آن در زمان‌ها و مناطق جغرافیایی مختلف، چالشی جدی برای بسیاری از کشورها به حساب می‌آید. انتظار می‌رود تا چند دهه آینده، حدوداً دو سوم جمعیت جهان با کمبود آب مواجه شوند (Mancosu et al., 2015). حوضه‌های آبریز بین‌المللی، اهمیت بالایی در تأمین منابع آبی در جهان دارند. آمار نشان می‌دهد که این حوضه‌ها در ۱۵۱ کشور گسترده شده و بیش از ۲/۸ میلیارد نفر، یعنی حدود ۴۲ درصد جمعیت کل جهان را در بر می‌گیرند. این حوضه‌ها مساحتی بالغ بر ۶۲ میلیون کیلومتر مربع، معادل ۴۲ درصد از کل خشکی‌های زمین، را پوشش می‌دهند و سالانه حدود ۲۲۰۰۰ کیلومتر مکعب آب رودخانه‌ای تولید می‌کنند که تقریباً معادل ۵۴ درصد از جریان کل رودخانه‌های جهان است (Resende, 2024). حوضه‌های رودخانه‌ای فرامرزی، به عنوان منابع طبیعی جهانی در سطوح مختلف محلی، ملی و بین‌المللی اهمیت دارند. این حوضه‌ها از لحاظ جغرافیایی بین دو یا چند کشور واقع شده و دارای شبکه‌ای در هم تنیده از روابط محیط‌زیستی، اقتصادی، سیاسی و امنیتی هستند (Kucukmehmetoglu & Geymen, 2014). در این مناطق، مداخلات و برنامه‌ریزی‌های مرتبط با استحصال و بهره‌برداری از منابع آبی در بخش بالادستی حوضه، اثرات منفی بر جوامع ساکن در نواحی پائین دست که گاه در کشورهای مجاور زندگی می‌کنند، خواهد داشت. از این رو، مدیریت و استحصال منابع آبی رودخانه‌های فرامرزی مشمول مقررات بین‌المللی است. تعداد حوضه‌های مرتبط با رودخانه‌های فرامرزی، ۲۷۶ مورد تخمین زده شده است (Degefu et al, 2016).

رودخانه هیرمند در یکی از این حوضه‌های آبریز بین‌المللی، مشترک بین سه کشور افغانستان، ایران و پاکستان است که از نظر هیدرولوژیکی دارای وضعیت بحرانی و از نظر سیاسی نیز شرایطی بسیار حساس دارد. هرچند این حوضه آبریز، نقش حیاتی در تأمین معیشت، حفظ اکوسیستم‌های طبیعی و کشاورزی در منطقه‌ای ایفا می‌کند، رودخانه هیرمند، که محور اصلی این حوضه به شمار می‌رود، به دلیل مدیریت منابع آب در بخش بالادست، تغییرات اقلیمی و تغییرات کاربری زمین، دچار تغییرات شدید در وضعیت مورفولوژیکی و کاهش جریان آب شده است (Arfa et al., 2025). این حوضه، شامل سه ناحیه جغرافیایی فرعی شامل دشت بالایی دلتای داخلی هیرمند که عمدتاً به نواحی پایین‌دست در افغانستان و ایران تخلیه شده و برای کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مناطق تالابی هامون که دشت دلتای تحتانی را پوشش می‌دهند، و دریاچه فوق شور گود زره در پایین‌ترین بخش حوضه که سرریز تالاب‌ها را در زمان جریان شدید رود هیرمند جمع‌آوری می‌کند، می‌باشد. بخش انتهایی این حوضه، یعنی منطقه سیستان، در یکی از خشک‌ترین مناطق جهان واقع شده است و حوضه هیرمند سفلی در این منطقه سالانه تنها حدود ۵۰ میلی‌متر بارش دریافت می‌کند (WAPCOS, 1975). در چنین شرایط دشوار خشکی و کم‌آبی، بقای حیات در ناحیه سیستان به دلتای داخلی رودخانه هیرمند و تالاب‌ها و دریاچه‌های مرتبط به آن وابسته است. نوسانات آب رودخانه هیرمند و افت میزان آب ورودی به سیستان (ایران) طی صد سال قبل به علل گوناگونی از جمله ساخت سدها و کانال‌های متعدد در بخش‌های بالادستی رودخانه هیرمند مربوط بوده است. این موضوع علاوه بر ایجاد مشکلات محیط‌زیستی، چالش‌هایی را در روابط سیاسی بین ایران و افغانستان در مقیاس‌های مختلف محلی و ملی به‌وجود آورده و اثرات مهمی بر زندگی مردم منطقه ایجاد کرده است (حافظ‌نیا و همکاران، ۱۳۸۶). حوضه‌های آبخیز، خدمات اکوسیستمی متعدد و بسیار ارزنده‌ای را برای محیط‌زیست و جوامع محلی فراهم می‌آورند که به‌خصوص در شرایط خشکی و کم‌آبی، این نقش بسیار پررنگ و حیاتی است. امروزه اهمیت خدمات اکوسیستمی در سطوح مختلف برنامه‌ریزی برای محیط‌زیست روشن شده است. خدمات اکوسیستمی، به طور فزاینده برای ارزیابی اثرات و پیامدهای احتمالی تغییرات محیط زیستی بر شرایط اجتماعی و اقتصادی و فراهم آوردن دلیل کافی برای حفاظت از بوم‌سازگان استفاده می‌شوند (Tallis et al, 2008; Braat & de Groot, 2012). برای پاسخگویی به این تقاضای فزاینده، روش‌ها و ابزارهایی برای نقشه‌برداری، کمی‌سازی و ارزش‌گذاری ارائه‌ی خدمات محیط‌زیستی گسترش یافته است (Fisher et al., 2009; Seppelt et al., 2011; Malinga et al., 2015). مدل‌سازی خدمات اکوسیستم مرتبط با بهره‌برداری آب در حوضه‌های آبریز، می‌تواند نقش مهمی در مدیریت، پایش و پیش‌بینی تأثیرات سیاست‌های توسعه اقتصادی و پیامدهای تغییرات کاربری اراضی ایفا کند و در برنامه‌ریزی بهینه و پایدار موثر باشد (Lang et al, 2017). در این پژوهش از ابزاری منبع باز و پرکاربرد از مجموعه مدل‌سازی ارزش‌گذاری یکپارچه خدمات اکوسیستم و مبادلات<sup>۱</sup> (InVEST) استفاده شده است. مدل (InVEST) ابزاری قدرتمند برای ارزیابی توزیع فضایی عرضه و تقاضای آب در سراسر اکوسیستم است (Sherafatmandrad et al, 2021). بدین ترتیب، بررسی اثرات تغییرات اقلیمی و دخالت‌های انسانی بر میزان خدمت اکوسیستمی تولید آب در حوضه آبریز فرامرزی هیرمند با استفاده از داده‌های دورسنجی و مدل‌های اقلیمی و مدل‌سازی در نرم افزار InVEST صورت گرفته است.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

بهبود رفاه انسان، در عین حصول اطمینان از استفاده پایدار از منابع طبیعی، چالشی برای تصمیم‌گیری‌ها و سیاست‌گذاری‌های محیط‌زیستی است (Guerry et al., 2015). مفهوم خدمات اکوسیستمی با اتصال مردم به طبیعت ارتباط دارد و نقش کلیدی عملکرد اکوسیستم و تنوع زیستی را برای حمایت از منافع متعدد برای زندگی و رفاه انسان‌ها پررنگ می‌سازد (Grizetti et al., 2016). تولید و تصفیه آب از جمله انواع مهمی از خدمات اکوسیستم‌های آبی هستند و توسعه متوازن این کارکردها، برای حفظ و توسعه این نوع اکوسیستم‌ها ضروری است (Li et al., 2023).

در مقایسه با سایر خدمات اکوسیستمی، خدمت تولید آب، آسیب‌پذیری بیشتری دارد (Tao et al., 2016). چرا که تولید آب تحت تاثیر عواملی نظیر تغییرات کاربری اراضی و تغییرات پوشش زمین (Ávila-García et al., 2020; Aires et al., 2020)، تنوع بارش (Srivastava et al., 2020) و شیوه‌ی مدیریت (deMoura et al., 2020; Belete et al., 2020; Zamani et al., 2020) می‌باشد. تغییرات اقلیمی نیز عامل دیگری است که با تغییر الگوی بارش شکاف بین تقاضا و تولید آب در دسترس را افزایش می‌دهد (de Moura et al., 2020; Pittock, 2011). دانستن تاثیرات این عوامل بر تولید آب می‌تواند نشان‌دهنده هشدارهای اولیه کمبود آب باشد که برای مدیران منابع آب بسیار مفید است (Yao et al., 2018). علاوه بر موارد ذکر شده انسان، هم به عنوان کاربر و هم مدیر یکی از عوامل اصلی افزایش کمبود آب با بر هم زدن تعادل بین عرضه و تقاضا در بوم‌سازگان است (Wang et al., 2020). برای وارد کردن مفهوم خدمات اکوسیستم در سیاست‌گذاری، به چارچوبی نیاز است که امکان به کارگیری این معانی علمی را در منطق سیاست‌گذاری فراهم کند (Helming et al., 2013). همچنین، به منظور وارد کردن مفهوم خدمات اکوسیستم در ارزیابی‌های محیط‌زیستی و تصمیم‌گیری‌ها، نقشه‌برداری و اندازه‌گیری دقیق این نوع خدمات الزامی است (Malinga et al., 2015). از جمله مطالعات انجام شده مرتبط با تحقیق حاضر در مورد رودخانه هیرمند، می‌توان به پژوهش حاجی حسینی و همکاران (۱۳۹۴) اشاره داشت که با استفاده از داده‌های سنجش از دور و مدل SWAT، تغییرات کاربری زمین در حوضه میانی هلمند در افغانستان در سه بازه زمانی بین ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۱ بررسی کردند. نتایج نشان داد که مساحت اراضی آبیاری شده از ۱۰۳ هزار هکتار در ۱۹۹۰ به ۱۶۷ هزار هکتار در ۲۰۱۱ افزایش یافته است که معادل ۶۲ درصد رشد است. این توسعه کشاورزی باعث کاهش جریان سالانه آب به میزان حدود ۳۴۶ میلیون مترمکعب شده است و در دوره‌های اخیر این کاهش به ۸۱۰ میلیون مترمکعب رسیده است. همچنین، تبخیر و تعرق واقعی به ازای هر هکتار از ۵۶۹۰ مترمکعب در ۱۹۸۵ به ۷۳۲۰ مترمکعب در ۲۰۱۲ افزایش یافته است (Hajihosseini et al., 2020). کربلایی صالح و همکاران (۱۴۰۳) به بررسی تغییرات مکانی-زمانی شوری خاک و تغییرات کاربری و پوشش زمین در بخشی از حوضه سیستان در مناطق خشک جنوب شرقی ایران پرداختند که در سال‌های اخیر با پدیده شوری خاک مواجه شده است. با استفاده از نمونه‌برداری‌های زمینی، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، نقشه‌های کاربری زمین و شوری خاک برای سال‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۱۹ تهیه شد. نتایج نشان داد که میانگین نرمال شده شوری خاک از ۰/۳۲۲ در سال ۱۹۸۹ به ۰/۵۲ در سال ۲۰۱۹ افزایش یافته است. همچنین، تغییرات کاربری زمین از اراضی کشاورزی آبی و بسترهای آبی به مناطق بایر، کشاورزی دیم و مناطق انسان‌ساخت باعث کاهش پوشش گیاهی و مناطق آبی شده که به واسطه فرسایش ناشی از بادهای ۱۲۰ روزه و رسوب ذرات نمک، شوری خاک افزایش یافته است. مطالعات چندی نیز در زمینه خدمات اکوسیستمی حوضه‌های آبخیز توسط پژوهشگران صورت گرفته است. از جمله یانگ و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل InVEST و روش تحلیل سناریو، الگوهای مکانی و زمانی خدمت تولید آب در حوضه رودخانه زرد کشور چین را از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۸ بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که تولید آب در این حوضه طی این دوره حدود ۲۰ میلیارد متر مکعب افزایش یافته و مناطق با تولید آب بالا عمدتاً در جنوب‌غرب و جنوب‌شرق و مناطق با تولید پایین در شمال‌غرب قرار دارند، در حالی که الگوی فضایی تولید آب تغییر چشمگیری نداشته است. سهم تغییرات اقلیمی در افزایش تولید آب بیش از ۹۶ درصد بوده و تأثیر تغییرات کاربری زمین بسیار کمتر بوده است (Yang et al., 2021).

اشرفی و همکاران (۲۰۲۲) چارچوبی نوین برای ارزیابی پایداری خدمات اکوسیستم حوضه‌های آبخیز شامل خدمات تأمین، تنظیم، پشتیبانی و فرهنگی با استفاده از مدل‌های SWAT و MODSIM و نظرات کارشناسان ارائه دادند. این چارچوب در حوضه رودخانه زرینه‌رود تحت سه سناریوی تغییر اقلیم RCP ۴/۵، ۶/۰ و ۸/۵ و دو بازه زمانی (۲۰۲۰-۲۰۹۸ و ۲۰۲۰-۲۰۴۹) به کار گرفته شده است. ۱۲۸ سناریوی مدیریت منابع آب با توجه به پروژه‌های کمیته ملی احیای دریاچه ارومیه بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که سناریوی مدیریت منابع آب شماره ۱۲۸ بهترین گزینه برای بهبود خدمات اکوسیستم است که شامل تخصیص آب جدید به دریاچه، بازسازی شبکه‌های آبیاری و زهکشی و بهبود الگوی کشت می‌باشد (Ashrafi et al., 2022). بررسی منابع مرور شده از جمله پژوهش‌های حاجی حسینی و همکاران (۱۳۹۴) و کربلایی صالح و همکاران (۱۴۰۳) در حوضه‌های هلمند و سیستان نشان داده‌اند که تغییر کاربری اراضی منجر به کاهش جریان آب و افزایش شوری خاک شده است. از سوی دیگر، مطالعات نظیر یانگ و همکاران (۲۰۲۱) با مدل InVEST و اشرفی و همکاران (۲۰۲۲) با تلفیق مدل‌های

هیدرولوژیکی و ارزیابی چندمعیاره، بر نقش غالب تغییرات اقلیمی و ارائه سناریوهای مدیریتی برای بهبود خدمات اکوسیستم تأکید دارند. پژوهش حاضر با تلفیق این دو جنبه، به بررسی اثرات ترکیبی تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر تولید آب در حوضه مرزی هیرمند با استفاده از مدل‌سازی خدمات اکوسیستم می‌پردازد تا به نحوی، مطالعه ای یکپارچه و چندوجهی برای این حوضه را ارائه دهد.

### ۳. مواد و روش‌ها

#### ۳-۱. روش پژوهش

در ابتدا داده‌های مورد نیاز پژوهش برای مدل مورد استفاده در این تحقیق تهیه شد که از جمله می‌توان به پارامترهای اقلیمی سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲ به جهت بررسی تغییرات این پارامترها در سه دوره زمانی به فاصله‌ی ده سال اشاره داشت که از موسسه هواشناسی و پایگاه جهانی CRU بدست آمد. همچنین، داده‌های مربوط به دمای کمینه و بیشینه، بارش و ساعت تابش آفتاب به همراه پارامترهای خاک و زمین مانند عمق ریشه و عمق محدودکننده ریشه از موسسه تحقیقات آب و خاک و جهاد کشاورزی تهیه گردید. تغییرات کاربری اراضی در سه دوره ده‌ساله نیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی لندست از سایت USGS استخراج گردید. اطلاعات به‌دست‌آمده در نرم‌افزار InVEST به مدل تولید آب<sup>۱</sup> وارد شده و مدل تولید آب حوضه آبریز هیرمند در این سه دوره زمانی استخراج شد. با تحلیل خروجی‌های مدل InVEST، میزان تولید آب در بازه‌های زمانی مد نظر تعیین گردید.

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده در پژوهش

منبع	دوره زمانی	داده	عنوان
USGS.gov	July 2002	Land use 2002	کاربری و پوشش اراضی
	July 2012	Land sat 5-TM Land use 2012	
	July 2022	Land sat 8-ETM+ Land use 2022	
Climatic Research Unit (CRU)	سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲	دمای حداقل و حداکثر	اقلیم
		ساعات آفتابی بارندگی	
موسسه تحقیقات خاک و آب کشور سازمان نقشه برداری کشور	سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲	عمق لایه محدودکننده ریشه	داده‌های زمینی
		محتوای آب قابل دسترس گیاه حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها	

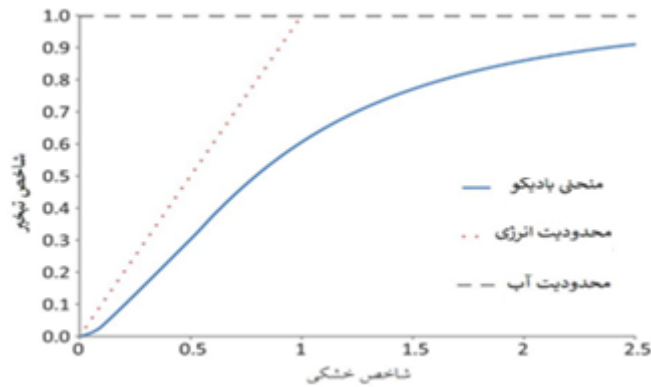
تهیه نقشه پوشش اراضی

به منظور بررسی روند تغییرات کاربری زمین و پدیده‌های مرتبط با آن در حوضه آبریز هیرمند، از نرم‌افزار ENVI 5.6 برای پردازش و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای استفاده گردید. تصاویر مورد نیاز از وبگاه سازمان زمین‌شناسی آمریکا استخراج شد. جهت بررسی روند تغییرات در منطقه مورد مطالعه، تصاویر زمین مرجع<sup>۲</sup> شده ماهواره لندست، مرتبط با سنجنده‌های TM، ETM+ و OLI مربوط به سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲ برای مسیر<sup>۳</sup> مورد نظر، استفاده شده است. لازم به ذکر است که حوضه آبریز مورد مطالعه در ۵ سین واقع شده و برای دستیابی به تصویری واحد، ۵ تصویر مرتبط با سه بازه زمانی استخراج و با استفاده از نرم‌افزار ENVI موزائیک شد.

مدل تولید آب

برای مشخص کردن میزان تولید آب در محدوده مورد مطالعه مدل تولید آب موجود در نرم‌افزار InVEST 3.3.2 به کار گرفته شده است. این مدل مقدار آب موجود در بخش‌های مختلف سرزمین را برآورد کرده و نحوه تاثیر گذاری تغییر در الگوی کاربری را بر تولید و عملکرد آب در قسمت‌های مختلف مشخص می‌کند. مدل تولید آب InVEST بر مبنای منحنی بادیکو است (Budyko, 1974) (شکل ۱). منظور از تولید آب در این مدل، مقدار آبی است که از نقطه خروجی حوضه آبریز بیرون رفته و حاصل تفاضل مقدار بارندگی از تبخیر و ترق و نفوذ سطحی است. این منحنی، در حقیقت تابعی تجربی نشان‌دهنده رابطه بین نسبت تبخیر و ترق واقعی به بارندگی نسبت به تبخیر و ترق پتانسیل به بارندگی می‌باشد.

1 Water Yield  
2 Georeferenced  
3 Path



شکل ۱. منحنی بادیکو (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۱)

برای هر پیکسل از منطقه مورد مطالعه، تولید آب سالانه  $Y(x)$  با بکارگیری رابطه ۱ بدست می‌آید. در این رابطه،  $AET(x)$  نشان دهنده مقدار واقعی تبخیر و تعرق سالانه و  $P(x)$  میزان بارندگی سالانه می‌باشد.

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

رابطه ۲ بیانگر نسبت تبخیر و تعرق است که از تعادل آبی منطقه محاسبه می‌شود. در این رابطه،  $AET(x)/P(x)$  یک تقریب از معادله بادیکو است که بوسیله ژانگ و همکاران (۲۰۰۱) توسعه یافته است.

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + 1/R_{xj}} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه،  $R_{xj}$  نشان‌دهنده شاخص خشکی بادیکو بوده و فاقد واحد می‌باشد که براساس نسبت تبخیر و تعرق به میزان بارش بیان می‌شود.  $\omega_x$  که از طریق رابطه ۳ محاسبه می‌گردد، پارامتری غیرفیزیکی و مرتبط با شرایط خاک بوده و بوسیله ژانگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۱) ارائه شده است.

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

در رابطه فوق،  $AWC_x$  بیانگر میزان آب قابل دسترس گیاه و  $Z$  ضریب ژانگ می‌باشد که براساس توزیع بارندگی ماهانه و عمق بارندگی مقادیر عددی ۱ تا ۱۰ را خواهد داشت (Zhang, 2001). همچنین، ضریب خشکی بادیکو از طریق رابطه ۴ قابل محاسبه است.

$$R_{xj} = \frac{K_{xj} \cdot ETO_x}{P(x)} \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه،  $ETOX$  بیانگر میزان تبخیر و تعرق پتانسیل برای پیکسل  $x$  بوده و  $K_{xj}$  نشان‌دهنده ضریب تعرق برای گیاه می‌باشد. همچنین،  $ETOX$  شاخصی مرتبط با شرایط آب و هوایی بوده و  $K_{xj}$  با به توجه به ویژگی‌های گیاه قابل محاسبه است. رابطه ۵ نیز برای برآورد میزان آب قابل دسترس گیاه به کار می‌رود. در این رابطه،  $PAW$  نشان دهنده ظرفیت آب قابل دسترسی توسط گیاهان می‌باشد.

$$AWC = \min(PAW) \quad \text{رابطه ۵}$$

جدول ۲. معرفی شاخص‌های مورد استفاده در پژوهش

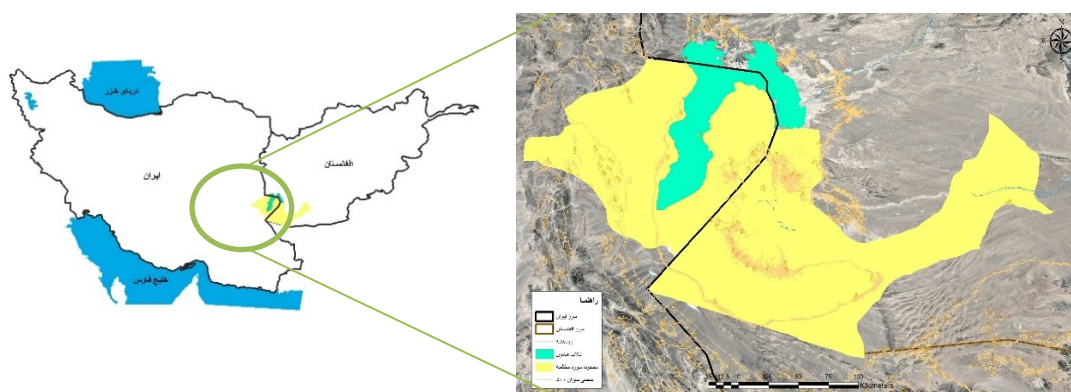
توضیحات	شاخص
تولید آب سالانه	$Y(x)$
مقدار واقعی تبخیر و تعرق سالانه	$AET(x)$
میزان بارندگی سالانه	$P(x)$
شاخص خشکی بادیکو	$R_{xj}$
پارامتری غیرفیزیکی، مرتبط با شرایط خاک	$\omega_x$
میزان آب قابل دسترس گیاه	$AWC_x$
ضریب ژانگ	$Z$
میزان تبخیر و تعرق پتانسیل برای پیکسل $x$	$ETOX$
ضریب تعرق گیاه	$K_{xj}$
ظرفیت آب قابل دسترسی توسط گیاهان	$PAW$

(منبع: ژانگ و همکاران، ۲۰۰۱)

<sup>۱</sup>. Zhang

## ۳-۲. محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی در برگیرنده دو زیر حوضه آبخیز از حوضه آبریز بزرگ هلمند است. این دو زیر حوضه با نام‌های سیستم ایران و هلمند پایین بین طول‌های جغرافیایی  $59^{\circ}33'$  تا  $63^{\circ}92'$  و عرض‌های جغرافیایی  $29^{\circ}6'$  تا  $31^{\circ}47'$  قرار دارد. حوضه آبریز هیرمند (هلمند) با مساحت  $401963$  کیلومتر مربع بین طول‌های جغرافیایی  $59^{\circ}33'$  تا  $69^{\circ}33'$  و عرض جغرافیایی  $29^{\circ}6'$  تا  $34^{\circ}15'$  واقع شده است. این حوضه یک حوضه فرامرزی مشترک میان کشورهای ایران (۱۲٪)، افغانستان (۸۴٪) و پاکستان (۴٪) است. حوضه آبریز هیرمند دارای ۱۵ زیرحوضه می‌باشد (Afghanistan Ministry of Energy and Water, 2013). ظرفیت مجموع سالانه آب‌های این حوضه  $8/4$  کیلومتر مکعب است که علی‌رغم وسعت، نسبت کمتری از کل جریان سالانه را با سهم ۱۱ درصدی تخلیه می‌کند (کرمی، ۱۳۹۹). حوضه مذکور نیمه جنوبی کشور افغانستان را در برمی‌گیرد و آب را از کوه‌های سیاه‌کوه در استان هرات به کوه‌های شرقی در استان گردیز و کوه‌های پروان در شمال غربی کابل هدایت کرده و در نهایت به فرورفتگی منحصربه‌فرد سیستم بین ایران و افغانستان می‌ریزد. رودخانه‌های هیرمند، فراه رود، خاش رود، ارغنداب، ترناک رود، سیستان و پریان مشترک از رودخانه‌های مهم این حوضه می‌باشند. هیرمند، رودخانه اصلی این حوضه آبریز است که سرچشمه آن از کوه‌های بابا یغما در  $40$  کیلومتری غرب کابل بوده و در محل بند کهک در جنوب شرقی زابل وارد ایران می‌شود. رودخانه‌های سیستان و پریان مشترک از شاخه‌های منشعب شده رودخانه هیرمند در ایران هستند. مخازن چاه نیمه که در مناطق تپه ماهور ساحل چپ رودخانه هیرمند قرار گرفته‌اند از طریق کانال فیدر به سیستان رود وصل شده و سیلاب‌های هیرمند را برای استفاده شرب و کشاورزی در دوره‌های کم آبی ذخیره می‌نماید. مسیر طبیعی رود سیستان در جهت شمال غربی است که آب رودخانه هیرمند را به مجموعه تالاب‌های هامون هدایت می‌کنند (حاجی حسینی و همکاران، ۱۳۹۳). در سال‌های پربابی، آب رودخانه از این تالاب‌ها به سمت جنوب و جنوب شرقی سرازیر شده و به شوره‌زار گودزره در خاک افغانستان می‌ریزد (Whitney, 2006). شکل ۲ منطقه مورد مطالعه را که دو زیرحوضه از حوضه آبریز رودخانه فرامرزی هیرمند و شامل بخش‌های میانی و پایینی آن است، نشان می‌دهد.



شکل ۲. نقشه منطقه مورد مطالعه

## سد کمالخان

سد کمال‌خان در ولایت نیمروز در جنوب غربی کشور افغانستان واقع شده است. مرکز استان نیمروز شهر زرنج می‌باشد. این شهر با منطقه کنگ در کشور ایران مرز مشترک دارد.

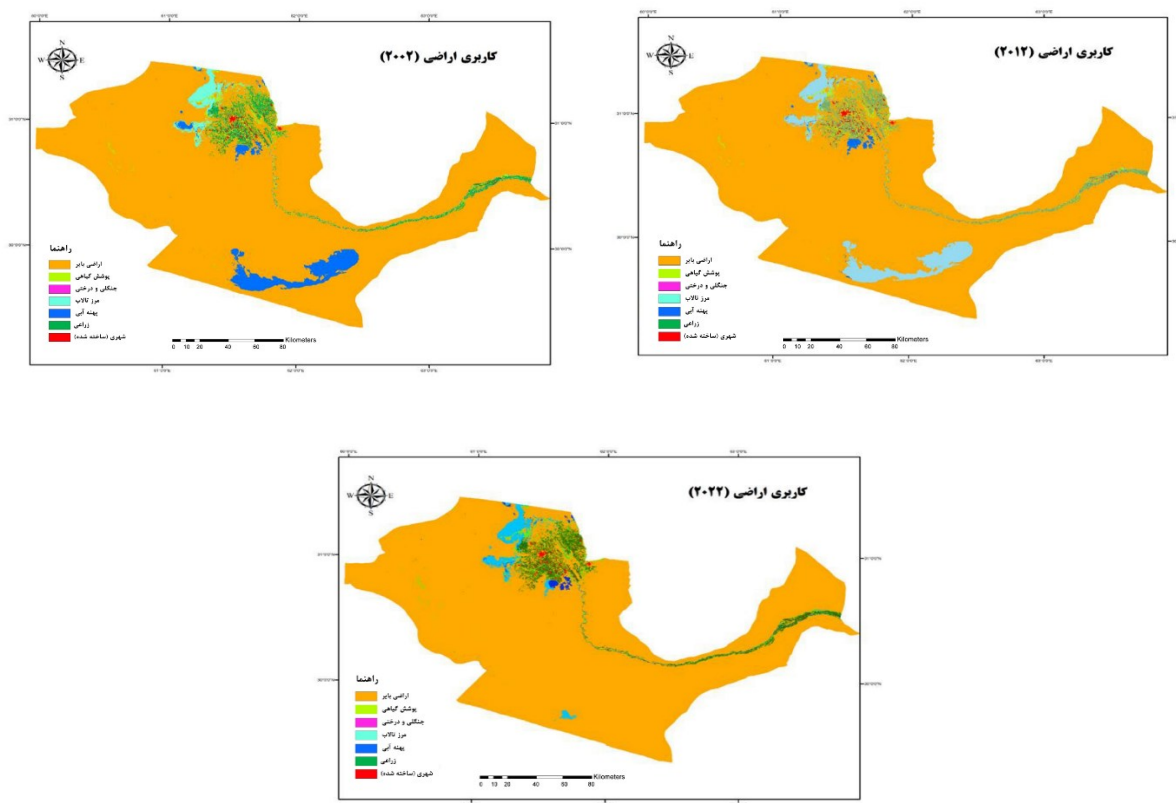
استان نیمروز در گذشته به دلیل تولید قابل توجه گندم، به عنوان انبار آسیا شناخته می‌شد، ولی در سال‌های اخیر، به دلیل کمبود منابع بر اثر کشت بی‌رویه، به یکی از تولیدکنندگان فصلی محصولات کشاورزی تبدیل شده است (Kashifi & Sarwari, 2016). سد کمال‌خان با ظرفیت ذخیره  $52$  میلیون متر مکعب آب و توان آبیاری  $174$  هزار هکتار زمین کشاورزی و تولید  $9$  مگاوات برق در سال  $1399$  مورد بهره‌برداری قرار گرفت. این سد با  $20$  متر ارتفاع و حدود  $2$  کیلومتر طول، دارای یک بند انحرافی است که علاوه بر انحراف آب رودخانه هیرمند به کانال‌های آبیاری کشاورزی مسیر اصلی رودخانه، بخش زیادی از آب رود هیرمند را به سوی شوره‌زار گودزره هدایت می‌کند. انحراف آب بوسیله سد کنترلی دیگری به طول  $540$  متر که در ساحل سمت چپ این بند، احداث شده و اختلاف ارتفاع آن نسبت به تاج سد کمال‌خان،  $10$  متر پایین‌تر است انجام می‌شود. شوره‌زار گودزره با مساحت حدود  $240$  هزار هکتار و عمق حدود  $10$  متر ظرفیت آبیاری بیش از  $24$  میلیارد متر مکعب آب را داراست (میردار هریجانی و همکاران،  $1403$ ). در شکل ۳ عناصر کلیدی مرتبط با منابع و مسیر رودخانه هیرمند شامل مخزن بند کمال‌خان، سد قلعه افضل، شوره‌زار گودزره و انحراف آب هیرمند از مسیر اصلی نمایش داده شده است.



بر مبنای مقادیر بدست آمده، می‌توان بر مطلوبیت خروجی حاصل از الگوریتم به کار گرفته شده صحه گذاشت که این امر با نتایج سایر تحقیقات صورت گرفته در این زمینه همخوانی دارد (Carr, 2005).

### شناسایی طبقات کاربری و پوشش اراضی و سنجش تغییرات آن‌ها

بعد از تایید دقت طبقه‌بندی انجام شده و کیفیت تفکیک پیکسل‌ها، نقشه انواع کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه، شامل توزیع فضایی طبقات مختلف کاربری و پوشش زمین، بر مبنای اطلاعات مطالعات پیشین و بررسی میدانی، تولید شد که نتیجه آن برای دوره‌های زمانی مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. نقشه پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۲، و ۲۰۲۲ (منبع: یافته‌های تحقیق)

جدول ۴. توزیع کلاس‌های کاربری اراضی در منطقه مطالعاتی

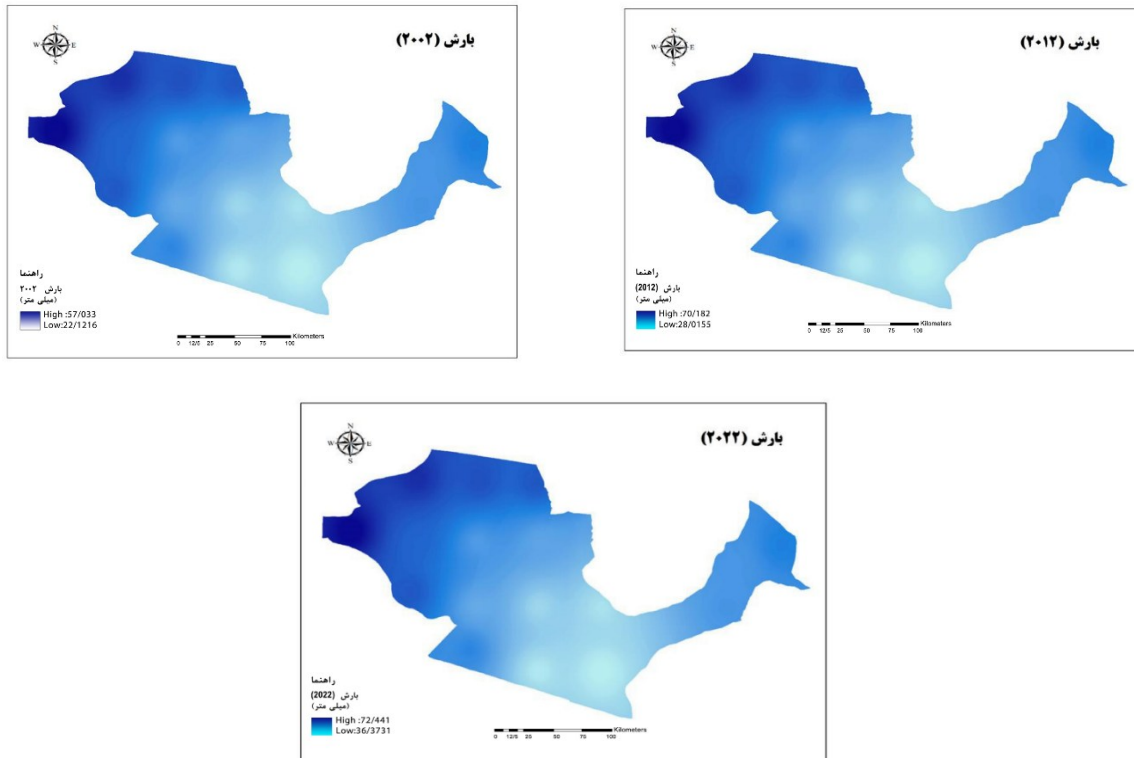
بخش ایران			بخش افغانستان			کلاس‌های کاربری اراضی					
کاربری اراضی ۲۰۲۲	کاربری اراضی ۲۰۱۲	کاربری اراضی ۲۰۰۲	کاربری اراضی ۲۰۲۲	کاربری اراضی ۲۰۱۲	کاربری اراضی ۲۰۰۲						
مساحت (هکتار)	درصد از مساحت	درصد از مساحت	مساحت (هکتار)	درصد از مساحت	درصد از مساحت						
۸۸/۴۸	۱,۷۰۲,۶۷۷	۶۶/۷۷	۱,۲۸۴,۸۲۴	۷۶/۴۰	۱,۴۷۰,۱۶۴	بایر					
۱/۴۱	۳۷,۱۵۱	۸/۳۸	۱۶۱,۳۷۱	۲/۵۰	۴۸,۱۴۰	مرتع					
۰/۰۱	۳۳۴	۰/۰۵	۱,۰۷۶	۰/۰۴	۹۳۴	جنگل					
۵/۳۷	۱,۰۳۳,۳۷۹	۹/۳۵	۱,۰۸۱,۰۴	۸/۵۶	۱۶۴,۸۰۰	پهنه آبی					
۳/۱۱	۵۹,۹۰۹	۷/۰۷	۱۳۶,۳۱۴	۶/۲۷	۱۲۰,۷۲۰	کشاورزی					
۰/۶۸	۱۳,۳۰۹	۷/۱۷	۱۳۸,۰۸۴	۵/۲۱	۱۰۰,۴۰۲	شهری					
۱۰۰	۱۷,۵۶۴	۱/۱۷	۲۲,۶۵۰	۰/۹۹	۱۹,۰۶۳	مجموع					
						۹۳/۰۵	۲,۳۲۱,۱۴۲	۸۶/۸۳	۲,۱۶۶,۲۰۰	۹۵/۴۸	۲,۳۲۱,۷۷۶
						۲/۲۱	۵۵,۲۳۷	۲/۴۳	۶۰,۶۶۶	۰/۶۳	۱۵,۸۹۵
						۰/۰۲	۶۲۶	۰/۰۲	۵۵۳	۰/۰۱	۳۲۶
						۱/۳۰	۳۲,۵۶۰	۷/۹۶	۱۹۸,۶۳۲	۲/۱۰	۵۲,۵۱۱
						۳/۲۳	۸۰,۶۷۶	۲/۵۹	۶۴,۶۹۳	۱/۶۵	۴۱,۲۳۶
						۰/۱۷	۴,۲۵۹	۰/۱۵	۳,۷۵۶	۰/۱۱	۳,۷۵۶
						۱۰۰	۲,۴۹۴,۵۰۰	۱۰۰	۲,۴۹۴,۵۰۰	۱۰۰	۲,۴۹۴,۵۰۰

جدول ۴ نمایانگر میزان تغییرات هفت نوع کاربری طبقه‌بندی شده در منطقه مورد مطالعه، در بازه زمانی ۲۰ ساله (۲۰۰۲ الی ۲۰۲۲) بر مبنای مساحت (هکتار) در دو کشور ایران و افغانستان است. بر مبنای این داده‌ها، به طور کلی بدنه‌های آبی به عنوان حائز اهمیت ترین اراضی موردنظر

پژوهش، در بازه‌ی زمانی مطالعه شده دچار کاهش شده‌اند. تغییرات اراضی پوشش گیاهی (کشاورزی) در سال ۲۰۱۲ نسبت به سال ۲۰۰۲ روند افزایشی داشته، اما در سال ۲۰۲۲ کاهش قابل توجهی نسبت به سال ۲۰۱۲ پیدا کرده است. میزان اراضی بایر در سال ۲۰۱۲ نسبت به ۲۰۰۲ کاهش یافته ولی از سال ۲۰۱۲ تا سال ۲۰۲۲ روند افزایشی داشته است. پوشش درختی و جنگلی در تمام بازه زمانی با کاهش مواجه شده و کاربری شهری (ساخته شده) روند نسبتاً ثابتی در هر سه دوره‌ی زمانی داشته است.

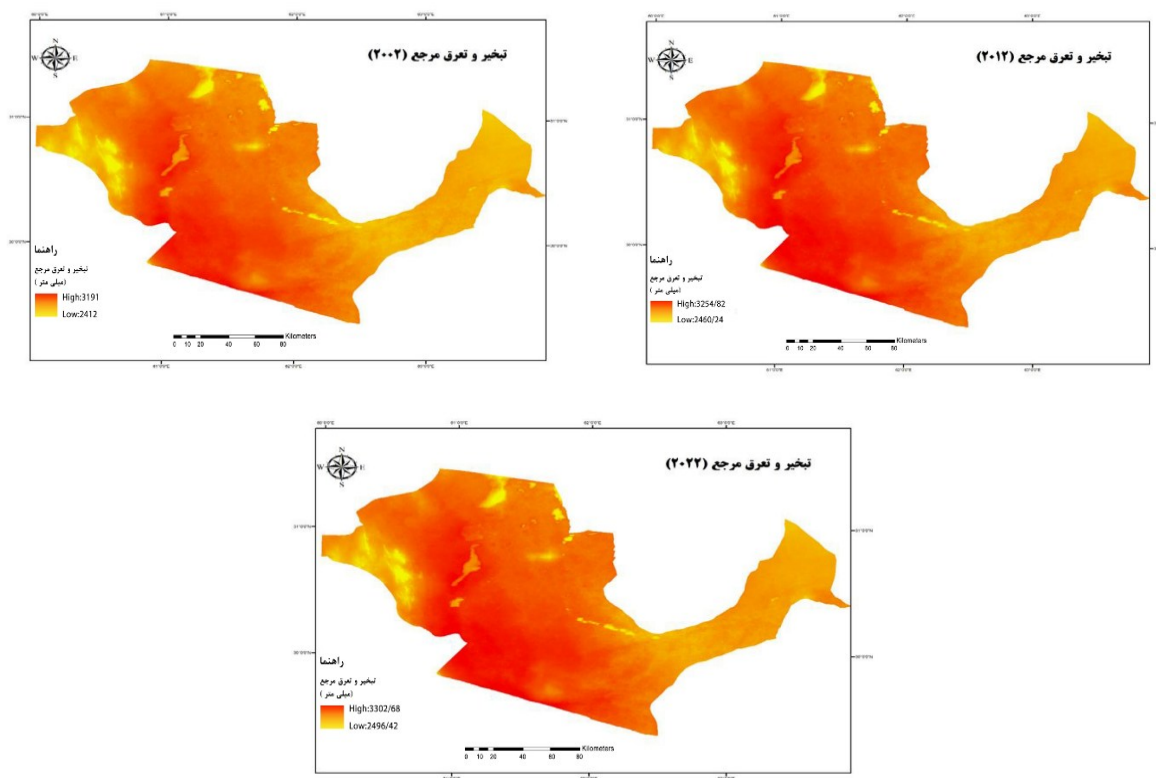
### داده‌های مورد نیاز برای مدل تولید آب

جهت اجرای صحیح مدل تولید آب، داده‌ها و اطلاعات متنوعی مورد نیاز است که از جمله می‌توان به نقشه‌ها و اطلاعات مرتبط با بارندگی، تبخیر و تعرق پتانسیل، عمق محدودکننده ریشه، آب قابل دسترس گیاهان، کاربری و پوشش اراضی، مرز حوضه و زیرحوضه‌ها، به همراه جدول اطلاعات زیست فیزیکی اشاره نمود. در این راستا، ابتدا با استفاده از مدل رقمی ارتفاع (DEM)، نقشه مربوط به آبراهه‌ها تهیه شد. سپس مرز حوضه و زیرحوضه‌ها تعیین گردید. به منظور تهیه نقشه‌های بارش، اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی و اقلیم‌شناسی در دوره ۲۰ ساله از سازمان‌های مرتبط (وزارت نیرو و سازمان هواشناسی) بدست آمد. در مورد مناطق فاقد ایستگاه، لازم بود که داده‌های نقطه‌ای به شکل پهنه‌ای تبدیل شود. به همین منظور رابطه خطی بین میزان بارش سالانه (P) و ارتفاع از سطح دریا (Z) محاسبه شد. بدین ترتیب، میانگین بارش سالانه به شکل نقشه بارش (فرمت رستر) به مدل اضافه شد که نتیجه آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

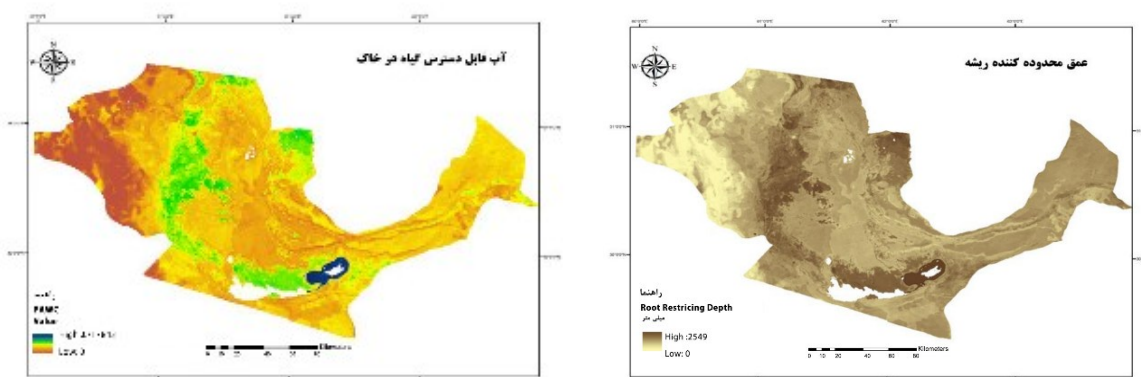


شکل ۵. نقشه بارش در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۲، و ۲۰۲۲ (منبع: یافته‌های تحقیق)

در ادامه، براساس داده‌های بدست آمده، روش بلانی کریدل به عنوان بهترین روش برای تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه تعیین و در مرحله بعد همانطور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، نقشه تبخیر و تعرق تهیه شد. آب در دسترس گیاه به میزان آبی گفته می‌شود که قابلیت ذخیره شدن در پروفیل خاک را داشته و برای مصرف گیاهان قابل استفاده است. برای محاسبه این پارامتر و تعیین عمق خاک، از اطلاعات پروفیل‌های خاک حفر شده در منطقه، داده‌های مربوط به بافت خاک شامل درصد شن، رس و سیلت، و همچنین اطلاعات موجود در مطالعات پیشین بهره گرفته شد. در نهایت، به منظور تهیه نقشه کاربری اراضی و پوشش زمین، نقشه‌های تولید شده در مراحل قبلی استفاده گردید.



شکل ۶. نقشه تبخیر و تعرق مرجع در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۲، و ۲۰۲۲ (منبع: یافته‌های تحقیق)



شکل ۷. نقشه عمق محدودکننده ریشه (منبع: یافته‌های تحقیق) شکل ۸. نقشه آب قابل دسترس گیاه در خاک (منبع: یافته‌های تحقیق)

به منظور اجرای مدل در مرحله بعد، جدول بیوفیزیکی و مقدار عددی پارامتر  $Z$  مورد نیاز می‌باشد. جدول مذکور نشان دهنده مشخصات هر کدام از طبقات کاربری اراضی و در بر گیرنده کد، نام، بیشینه عمق ریشه‌زنی به میلی‌متر، وجود یا عدم وجود پوشش گیاهی (با مقادیر ۰ و ۱) و ضریب تبخیر و تعرق گیاه برای انواع مختلف کاربری است. برای تعیین بیشینه عمق ریشه‌زنی، از نتایج مطالعه شنک و جکسون<sup>۱</sup> (۲۰۰۲) استفاده شده و ضریب تبخیر و تعرق گیاهان نیز بر اساس داده‌های آلن و همکاران (۱۹۹۸) و اطلاعات موجود در راهنمای InVEST محاسبه گردیده است.

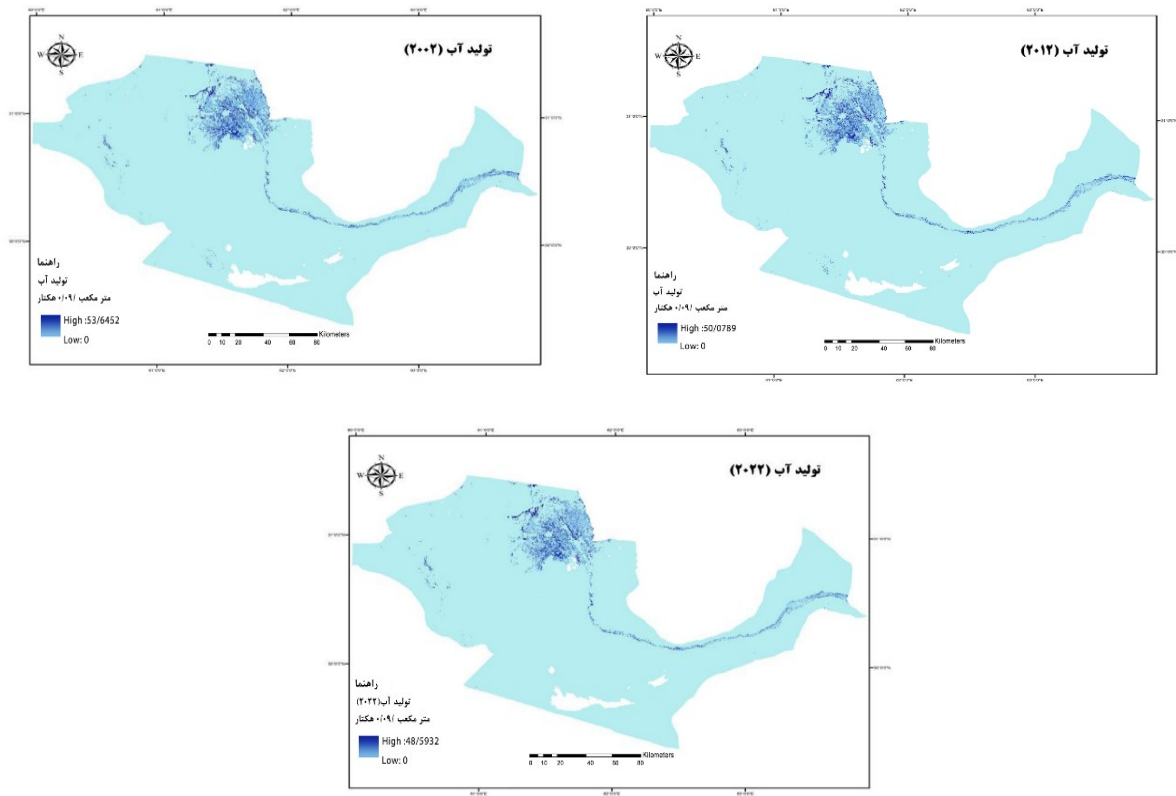
$$P = 0.1801Z - 18.077$$

$$R^2 = 0.8472$$

رابطه ۸)

نقشه تولید آب در دوره‌های زمانی ۲۰۰۲، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲ برای منطقه مورد مطالعه در شکل ۹ ارائه شده است.

<sup>۱</sup> . Schenk & Jackson



شکل ۹. نقشه تولید آب در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۲ در حوضه آبریز مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق)

در نهایت، همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است، با به کارگیری مدل InVEST 3.3.2 مقدار تولید آب برای حوضه آبریز هیرمند، و کاربری‌های مختلف محاسبه شد.

جدول ۵. محاسبه میانگین بارش، میانگین تبخیر پتانسیل، میانگین تبخیر واقعی، میانگین تولید آب و حجم کل تولید آب در هر پیکسل در حوضه آبریز هیرمند

شاخص سال	میانگین بارش (precip_mn (mm))	میانگین تبخیر واقعی (AET_mn (mm))	حجم کل تولید آب (wyield_vol (m <sup>3</sup> ))
۲۰۰۲	۱۰۳۷۷۵۶	۲۸۰۱	۵۱۴۷۴۵۰
۲۰۱۲	۹۸۵۸۶۸	۲۸۷۵	۴۲۳۸۹۹۵
۲۰۲۲	۹۶۵۱۱۳	۲۸۹۹	۳۸۷۱۶۹۱

براساس اطلاعات این جدول، میانگین بارش طی دوره ۲۰ ساله ۲۰۰۲-۲۰۲۲ در سطح حوضه آبریز هیرمند به میزان ۸ میلی متر در هر پیکسل کاهش یافته است. همچنین میزان تبخیر و تعرق افزایش یافته است که به دلیل افزایش دما در سطح حوضه طی ۲۰ سال گذشته است. مطالعات مختلفی موید نتایج پژوهش حاضر است. مطالعه صورت گرفته بر روی سه ایستگاه قندهار، لشکرگاه و زابل حوضه آبریز هلمند طی دوره ۱۹۷۷-۲۰۱۴ نشان دهنده کاهش ۲ میلی متری بارش و افزایش ۱/۹۸ سانتی گراد دمای میانگین در سطح حوضه است (Maleki et al., 2019). گرمی (۱۳۹۹) نیز افزایش ۰/۹۸ و ۱ درجه سانتی گراد در دمای کمینه و بیشینه ایستگاه‌های زهک و زابل و کاهش ۴۷ درصدی بارش را در سطح سیستان طی دوره ۲۰۲۰-۱۹۸۶ گزارش کرده است. هم چنین مطالعه دیگری که بر روی بارش، دما و آورد آبی حوضه‌های آبریز اصلی افغانستان انجام شد بیانگر افزایش ۱/۷۶ دمای میانگین و کاهش ۳/۶ میلیمتر بارش در سطح حوضه آبریز هلمند است (Akhundzadeh, 2024).

حجم میزان کل آب تولید شده در حوضه آبریز، در سال ۲۰۰۲، ۵/۱۴ میلیون مترمکعب بوده است. این میزان در سال ۲۰۱۲ به ۴/۲۳ میلیون مترمکعب رسیده است. در سال ۲۰۲۲، میزان آب تولید شده که یکی از خدمات اکوسیستمی مهم تالاب است، به عدد ۳/۸۷ میلیون مترمکعب رسیده است. در مطالعه (Akhundzadeh (2024) میزان آورد رودخانه حدود ۳۷۰ میلی متر مکعب در ثانیه کاهش یافته است. مطالعه حاجی حسینی و همکاران (۱۳۹۳) براساس داده‌های سنجش از دوری CRU، طی دوره ۱۰۰ ساله ۲۰۱۲-۱۹۰۱ نشان داد که میزان ورودی آب به سد کجکی در بالادست حوضه آبریز هیرمند از ۸/۱ به ۶/۰۷ میلیارد مترمکعب کاهش یافته است. در ادامه نتایج بررسی اثرات احداث سد کمال خان بر مساحت مجموعه‌های آبی دوسوی مرز شامل چاه نیمه‌های ایران و شوره‌زار گود زره افغانستان در جدول ۶ نمایش داده شده است.

جدول ۶. مساحت مجموعه‌های آبی ایران و افغانستان در منطقه حوضه هیرمند در سال‌های پیش و پس از احداث سد کمال‌خان

سال					مجموعه آبی
۲۰۲۲	۲۰۲۱	۲۰۱۸	۲۰۱۲	۲۰۰۲	
۵۰	۸۲	۹۶	۱۱۰	۱۰۸	چاه نیمه های ایران (Km <sup>2</sup> )
۲۱۰	۶۲	۰	۵۲	۱۲	گودزره افغانستان (Km <sup>2</sup> )

(منبع: یافته‌های تحقیق)

براساس داده‌های جدول فوق مساحت چاه نیمه طی دوره ۲۰۰۲-۲۰۲۲ حدود ۵۰ درصد کاهش یافته است. در حالیکه طی همین سال مساحت شوره‌زار گود زره افزایش چشمگیری داشته است. این وضعیت بیانگر تاثیر احداث و بهره برداری از سد کمال‌خان است و نتایج مطالعه دیگر در این زمینه، بیانگر این موضوع است که کاهش ورودی آب به ایران پس از احداث سد کمال‌خان، باعث کاهش ۵۴ درصدی مساحت چاه نیمه‌های ایران طی سال‌های ۲۰۲۳-۲۰۲۱ شده است و همزمان انحراف آب به سمت گودزره باعث افزایش ۵ برابری مساحت گود زره طی همین سال‌ها شده است به طوری که مساحت آبی گود زره از ۵۰ به بیش از ۲۵۰ کیلومتر مربع رسیده است (Maleki et al., 2024). تحلیل صورت گرفته بر روی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست طی دوره ۳۰ ساله ۲۰۲۲-۱۹۹۲ نیز نشان‌دهنده کاهش ۹۷ درصدی وسعت بدنه آبی کل حوضه آبریز هیرمند است که بیشترین کاهش در بخش ایران دیده می‌شود (ابراهیمیان و کرمی، ۱۴۰۳). نتایج مطالعه دیگری که در مورد کاربری اراضی حوضه آبریز هیرمند (هلمند) انجام شده است نشان داد مساحت مجموعه بدنه آبی در حوضه آبریز هلمند از ۲۰۷۵۶۹ هکتار در سال ۱۹۹۷ به ۱۳۴۹۶۹ هکتار رسیده است. در سال‌های ۱۹۹۷ و ۱۹۹۱ مساحت بدنه آبی در پایین دست حوضه (ایران) بیشتر بالادست (افغانستان) بوده است درحالی‌که در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۴ این روند برعکس شده است. این موضوع بیانگر کاهش ورود آب به ایران به دلیل تغییرات اقلیمی و همچنین افزایش وسعت زمین‌های کشاورزی در افغانستان بوده است (Maleki et al., 2019). همچنین مدل‌سازی کاربری اراضی بین سال‌های ۲۰۱۱-۱۹۹۰ با استفاده از مدل SWAT، در حوضه آبریز هلمند میانی نشان‌دهنده کاهش ورودی آب به ایران به میزان ۸۱۰ میلیون متر مکعب، در اثر گسترش زمین‌های کشاورزی در افغانستان به میزان ۴۵۰۰۰ هکتار است (Hajihosseini et al, 2020).

## ۵. نتیجه گیری و پیشنهادات

در این تحقیق میزان آب تولید شده در حوضه آبریز رودخانه فرامرزی هیرمند در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۲-۲۰۲۲، برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی (ساخت و بهره‌برداری از سد کمال‌خان افغانستان) بررسی و تحلیل شد. نقشه‌های کاربری اراضی، داده‌های اقلیمی بارش، تبخیر و تعرق، فاکتورهای خاک و زمین شامل عمق محدود کننده ریشه و آب قابل دسترس گیاه از داده‌های سنجش از دوری CRU استخراج شد و پایگاه داده برای تفسیر تغییرات کاربری تولید و نتایج به مدل InVEST 3.3.2 جهت مدل‌سازی میزان خدمت اکوسیستمی تولید آب وارد گشت. این پژوهش با تلفیق مدل‌سازی هیدرولوژیکی (InVEST) و تحلیل‌های میدانی و سنجش از دور، به وضوح نشان می‌دهد که حوضه آبریز هیرمند در یک بحران اکولوژیکی-هیدروپلیتیکی چندبعدی و تشدیدشونده قرار دارد. تحلیل‌های این تحقیق، همسو با مطالعات پیشین (Maleki et al., 2019; کرمی، ۱۳۹۹؛ Akhundzadeh, 2024)، کاهش سیستماتیک بارش و افزایش دما را در سطح حوضه تأیید می‌نماید. کاهش ۸ میلی‌متری میانگین بارش و افزایش همزمان میانگین تبخیر و تعرق واقعی در بازه ۲۰ ساله (۲۰۲۲-۲۰۰۲)، منجر به کاهش ۲۵ درصدی حجم کل آب تولیدی حوضه (از ۵/۱۴ به ۳/۸۷ میلیون مترمکعب) شده است. این امر به وضوح نشان می‌دهد که تغییر اقلیم به عنوان یک تهدید زمینه ساز، پایه‌های منابع آبی حوضه را تضعیف نموده و آن را در برابر مداخلات انسانی آسیب‌پذیرتر ساخته است. با وجود این که تغییر اقلیم فشار بر حوضه را افزایش داده، مدیریت انسانی نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع پیامدهای این فشار ایفا کرده است. احداث سد کمال‌خان و بهره‌برداری از آن، باعث تغییر رژیم هیدرولوژیکی شده است. به طوری که مساحت مجموعه آبی چاه‌نیمه‌های ایران حدود ۵۴ درصد کاهش یافته، در حالی که مساحت شوره‌زار گودزره در افغانستان ۱۷ برابر شده است. این تغییر شدید و سریع، مستقیماً به انحراف جریان آب به سمت گودزره و قطع حلقه‌های پایین دست مرتبط است.

در رابطه با تأثیر توسعه کشاورزی در بالادست، یافته‌ها همسو با مطالعاتی مانند Hajihosseini et al. (2020) نشان می‌دهند که گسترش زمین‌های کشاورزی در افغانستان (به میزان ۴۵۰۰۰ هکتار) سهم به‌سزایی در کاهش ۸۱۰ میلیون مترمکعبی ورودی آب به ایران داشته است. این موضوع، الگوی تغییر مکانی بدنه‌های آبی را که توسط Maleki et al. (2019) شناسایی شد (جابجایی کانون ترسیب از پایین‌دست به بالادست پس از سال ۲۰۰۱) توضیح می‌دهد.

ترکیب کاهش کمی آب ناشی از تغییر اقلیم و توزیع ناعادلانه آن ناشی از مدیریت انسانی، منجر به پیامدهای تجمعی شده و فروپاشی خدمات اکوسیستمی تالاب شده است. کاهش ۲۵ درصدی حجم آب تولیدی، به معنای کاهش مستقیم در خدمت حیاتی "تأمین آب" این اکوسیستم است که بقای تالاب بین‌المللی هامون و معیشت وابسته به آن را تهدید می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت که سد کمال‌خان به عنوان یک "تقویت‌کننده منفی" عمل کرده است. این سد نه تنها اثرات منفی تغییر اقلیم را تشدید نموده، بلکه با تغییر توزیع آب، توازن هیدروپلیتیک حوضه را به نفع بالادست و به زیان پایین‌دست به طور برگشت‌ناپذیری تغییر داده است. بنابراین، بحران کنونی سیستم تنها یک "خشکسالی اقلیمی" نیست، بلکه یک "خشکسالی انسان‌ساخت توأم با بی‌عدالتی هیدروپلیتیک" است.

مطالعه Akhundzadeh (۲۰۲۴) که به کاهش ۳۷۰ میلیون مترمکعبی آورد رودخانه اشاره کرده بود، با کاهش حجم آب تولیدی محاسبه‌شده توسط مدل InVEST در این پژوهش (کاهش ۱/۲۷ میلیون مترمکعبی بین ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۲) تأیید می‌شود. مدل InVEST با تفکیک تولید آب از آورد رودخانه، تحلیل دقیق‌تری از منابع و مصارف آب در خود حوضه ارائه می‌دهد. کاهش تاریخی ورودی آب به سد کجکی که توسط حاجی‌حسینی و همکاران (۱۳۹۳) از ۸/۱ به ۶/۰۷ میلیارد مترمکعب گزارش شد، روند کاهش بلندمدت منابع آبی را نمایان می‌ساخت. پژوهش حاضر ثابت می‌کند این روند نه تنها متوقف نشده، بلکه در دو دهه اخیر با شتاب بیشتری ادامه یافته است. در حالی که مطالعه Maleki et al (۲۰۲۴) به کاهش ۵۴ درصدی مساحت چاه‌نیمه‌ها و افزایش ۵ برابری گودزره بین ۲۰۲۳-۲۰۲۱ اشاره نمود، داده‌های این پژوهش این روند را در یک بازه زمانی طولانی‌تر (۲۰۲۲-۲۰۰۲) و با جزئیات بیشتر مستند می‌سازد. این امر قدرت تحلیل را افزایش داده و هرگونه شک به تصادفی بودن داده‌ها را مرتفع می‌سازد.

این پژوهش به طور مستقیم نشان می‌دهد که چگونه مدیریت آب (انحراف به سمت گودزره) بر خلاف روند طبیعی کاهش منابع آب عمل کرده و بحران را در پایین‌دست متمرکز ساخته است. مزیت اصلی این پژوهش، تلفیق سه بعد "تغییر اقلیم" (با داده‌های بارش و دما)، "مدیریت منابع آب" (با مدل InVEST و تحلیل سد) و "تغییرات کاربری اراضی" (با داده‌های سنجش از دور) است. این رویکرد یکپارچه، به خوبی نشان می‌دهد که چگونه این عوامل در تعامل با یکدیگر، یک "بحران مرکب"<sup>۲</sup> در حوضه هیرمند ایجاد کرده‌اند. برای مثال، کاهش بارش (عامل اقلیمی) باعث کاهش آب تولیدی می‌شود و توسعه کشاورزی در بالادست (عامل انسانی) سهم ایران از این آب کمتر شده را نیز قطع می‌کند. در این پژوهش استفاده از مدل InVEST برای کمی‌سازی تولید آب و تبخیر و تعرق، به یافته‌های مبتنی بر سنجش از دور و آمار ایستگاهی، اعتبار تحلیلی بیشتری بخشیده است. همچنین با مستندسازی یک تغییر هیدروپلیتیک عینی و با ارائه اعداد و ارقام از تغییر مساحت آب‌های مرزی، یک سند علمی قوی برای اثبات تغییر در الگوی توزیع آب بر اثر یک پروژه عمرانی فراهم می‌سازد و در نهایت به وضوح زنجیره علّی تأثیرات توأم "تغییر اقلیم، توسعه در بالادست و احداث سد" بر "کاهش تولید و انحراف آب" و در نتیجه "خشکی تالاب‌های پایین‌دست" و در نهایت "آثار منفی اجتماعی-اقتصادی و محیط‌زیستی" را به تصویر می‌کشد. این تحلیل جامع، ضرورت فوری حرکت به سوی "مدیریت مشارکتی و فرامرزی" حوضه را بیش از پیش آشکار می‌سازد. هرگونه راه‌حل پایدار، مستلزم عبور از رویکردهای درون‌مرزی و اتخاذ یک استراتژی یکپارچه نگر برای کل حوضه است.

در نهایت پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده در سه حوزه زیر متمرکز گردند: اول: توسعه مدل‌های یکپارچه برای پیش‌بینی سناریوهای آینده با در نظر گرفتن تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی در افغانستان و ایران. دوم: جمع‌آوری و همگرایی داده‌های سطح بالای رودخانه‌ای و هیدرومتری برای افزایش دقت در ارزیابی اثر سدها و تغییرات منابع آبی و سوم: ارائه راهکارهای سیاستی برای مدیریت مشترک منابع آب بین دو کشور با توجه به داده‌های تغییر کاربری اراضی و تأثیرات اقلیمی.

## ۶. منابع

۱. ابراهیمیان، محبوبه و کرمی، رقیه. (۱۴۰۳). تحلیل زمانی-مکانی و پیش‌بینی آینده تغییرات کاربری اراضی با استفاده از داده‌های چندزمانه سنجنش از دور و تکنیک‌های GIS (مطالعه موردی: حوضه آبریز هیرمند). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶ (۳)، ۷۸۵-۸۰۵.
۲. حاجی حسینی، حمیدرضا، حاجی حسینی، محمدرضا، نجفی، علیرضا، مرید، سعید و دلاور، مجید. (۱۳۹۳). ارزیابی تغییرات متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی در بالادست حوضه هیرمند طی سده گذشته با استفاده از داده‌های اقلیمی CRU و مدل SWAT. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۰ (۳)، ۳۸-۵۲.
۳. حاجی حسینی، محمدرضا، حاجی حسینی، حمیدرضا، مرید، سعید و دلاور، مجید. (۱۳۹۴). بررسی تغییرات کاربری اراضی بر رواناب حوضه فرامرزی هلمند طی دوره ۱۹۹۰ لغایت ۲۰۱۲ میلادی با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای و مدل شبیه ساز SWAT. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۱ (۱)، ۷۳-۸۶.
۴. حافظ‌نیا، محمدرضا، مجتهدزاده، پیروز و علی‌زاده، جعفر. (۱۳۸۵). هیدروپلیتیک هیرمند و تاثیر آن بر روابط سیاسی ایران و افغانستان. *آمایش فضا و ژئوماتیک*، ۱۰ (۲)، ۱۰۳-۸۳.
۵. کربلایی صالح، سجاد، عموشاهی، سولماز و سنایی، اکرم. (۱۴۰۳). ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی کاربری/پوشش زمین و شوری خاک و تاثیر آن بر مدیریت مناطق خشک (مطالعه موردی: بخشی از حوضه سیستان، جنوب شرقی ایران). *نشریه محیط زیست طبیعی*، ۷۷ (۱)، ۱-۱۰۷.
۶. کرمی، رقیه. (۱۳۹۹). ارزیابی چند معیاره راهکارهای مدیریت مشارکتی تالاب بین‌المللی هامون در سناریوهای مختلف اقلیمی. رساله دکتری. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۷. میردار هریجانی، جواد، کرمی، رقیه و راهداری، عبدالعلی. (۱۴۰۳). تاثیرات بند کمال‌خان بر حقایق ایران از رودخانه هیرمند. *کنفرانس بین‌المللی محیط زیست تالاب‌های بین‌المللی هامون، تهران*.
8. Afghanistan Ministry of Energy and Water. (2013). Helmand River Basin Master Plan, Phase 3, Technical Report 3, Water Resources Modelling for Helmand River Basin. *Mott MacDonald, United Kingdom*. 251p.
9. Aires, U. R. V., da Silva, D. D., Moreira, M. C., Ribeiro, C. A. A. S., & Ribeiro, C. B. D. M. (2020). The use of the normalized difference vegetation index to analyze the influence of vegetation cover changes on the streamflow in the Manhuaçu River Basin, Brazil. *Water Resources Management*, 34(6), 1933-1949.
10. Akhundzadah, N. A. (2024). Analyzing temperature, precipitation, and river discharge trends in Afghanistan's main river basins using innovative trend analysis, Mann-Kendall, and Sen's slope methods. *Climate*, 12(12), 196.
11. Allen-Wardell, G., Bernhardt, P., Bitner, R., Burquez, A., Buchmann, S., Cane, J., ... & Walker, S. (1998). The potential consequences of pollinator declines on the conservation of biodiversity and stability of food crop yields. *Conservation biology*, 8-17.
12. Arfa, A., Ayyoubzadeh, S. A., Shafizadeh-Moghadam, H., & Mianabadi, H. (2025). Transboundary hydropolitical conflicts and their impact on river morphology and environmental degradation in the Hirmand Basin, West Asia. *Scientific Reports*, 15(1), 2754.
13. Ashrafi, S., Kerachian, R., Pourmoghim, P., Behboudian, M., & Motlaghzadeh, K. (2022). Evaluating and improving the sustainability of ecosystem services in river basins under climate change. *Science of the Total Environment*, 806, 150702.
14. Ávila-García, D., Morató, J., Pérez-Maussán, A. I., Santillán-Carvantes, P., Alvarado, J., & Comín, F. A. (2020). Impacts of alternative land-use policies on water ecosystem services in the Río Grande de Comitán-Lagos de Montebello watershed, Mexico. *Ecosystem Services*, 45, 101179.
15. 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.
16. Braat, L. C., & De Groot, R. (2012). The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy. *Ecosystem services*, 1(1), 4-15.
17. Carr, G. M., Chambers, P. A., & Morin, A. (2005). Periphyton, water quality, and land use at multiple spatial scales in Alberta rivers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 62(6), 1309-1319.

18. Degefu, D. M., He, W., Yuan, L., & Zhao, J. H. (2016). Water allocation in transboundary river basins under water scarcity: a cooperative bargaining approach. *Water resources management*, 30(12), 4451-4466.
19. de Moura, C. N., Neto, S. L. R., Campos, C. G. C., & Sá, E. A. S. (2020). Hydrological impacts of climate change in a well-preserved upland watershed. *Water Resources Management*, 34(8), 2255-2267.
20. Fisher, B., Turner, R. K., & Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological economics*, 68(3), 643-653.
21. Grizzetti, B., Lanzanova, D., Liqueste, C., Reynaud, A., & Cardoso, A. C. (2016). Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environmental Science & Policy*, 61, 194-203.
22. Guerry, A. D., Polasky, S., Lubchenco, J., Chaplin-Kramer, R., Daily, G. C., Griffin, R., ... & Vira, B. (2015). Natural capital and ecosystem services informing decisions: From promise to practice. *Proceedings of the National academy of Sciences*, 112(24), 7348-7355.
23. Hajihosseini, M., Hajihosseini, H., Morid, S., Delavar, M., & Booij, M. J. (2020). Impacts of land use changes and climate variability on transboundary Hirmand River using SWAT. *Journal of Water and Climate Change*, 11(4), 1695-1711.
24. Helming, K., Diehl, K., Geneletti, D., & Wiggering, H. (2013). Mainstreaming ecosystem services in European policy impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 40, 82-87.
25. Kashifi, M., & Sarwari, R. (2016). Codifying Spate Water Rights in Contested Basins in Afghanistan IP: EPRSO. Technical Report. Nimruz Survey Information FY. 34p.
26. Kucukmehmetoglu, M., & Geymen, A. (2014). Transboundary water resources allocation under various parametric conditions: The case of the Euphrates & Tigris river basin. *Water resources management*, 28(11), 3515-3538.
27. Lang, Y., Song, W., & Deng, X. (2018). Projected land use changes impacts on water yields in the karst mountain areas of China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 104, 66-75.
28. Li, M., Li, S., Liu, H., & Zhang, J. (2023). Balancing water ecosystem services: assessing water yield and purification in Shanxi. *Water*, 15(18), 3261.
29. Maleki, S., Koupaei, S. S., Soffianian, A., Saatchi, S., Pourmanafi, S., & Rahdari, V. (2019). Human and climate effects on the Hamoun wetlands. *Weather, Climate, and Society*, 11(3), 609-622.
30. Maleki, S., Mohajeri, S. H., Samadi, A., Hasani, H., & Akbary, M. (2024). Remote sensing insights into water allocation and evaporation challenges in the Hirmand River Basin, after the operation of Kamal Khan Dam. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 56, 101996.
31. Malinga, R., Gordon, L. J., Jewitt, G., & Lindborg, R. (2015). Mapping ecosystem services across scales and continents—A review. *Ecosystem Services*, 13, 57-63.
32. Mancosu, N., Snyder, R. L., Kyriakakis, G., & Spano, D. (2015). Water scarcity and future challenges for food production. *Water*, 7(3), 975-992.
33. Mather, A. S. (1999). Land use and cover change. *Land use policy*, 16(3), 143-144.
34. Pittock, J. (2011). National climate change policies and sustainable water management: conflicts and synergies. *Ecology and Society*, 16(2).
35. Resende, T. C. (2024). *Transboundary River Basins around the World* [Data set]. IHP Water Information Network System (IHP-WINS). <https://ihp-wins.unesco.org/dataset/transboundary-river-basins-around-the-world>.
36. Schenk, H. J., & Jackson, R. B. (2002). Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology*, 90(3), 480-494.
37. Seppelt, R., Dormann, C. F., Eppink, F. V., Lautenbach, S., & Schmidt, S. (2011). A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, shortcomings and the road ahead. *Journal of applied Ecology*, 48(3), 630-636.
38. 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.
39. Smith, C., & Brown, N. (1999). *Erdas field guide. revised and expanded. ERDAS®*, Inc Atlanta.
40. Srivastava, A., Brooks, E. S., Dobre, M., Elliot, W. J., Wu, J. Q., Flanagan, D. C., ... & Link, T. E. (2020). Modeling forest management effects on water and sediment yield from nested, paired watersheds in the interior Pacific Northwest, USA using WEPP. *Science of the Total Environment*, 701, 134877.

41. Sun, M., Li, J., Yang, C., Schmidt, G. A., Bambacus, M., Cahalan, R., ... & Li, Z. (2012). A web-based geovisual analytical system for climate studies. *Future Internet*, 4(4), 1069-1085.
42. Tallis, H., Kareiva, P., Marvier, M., & Chang, A. (2008). An ecosystem services framework to support both practical conservation and economic development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(28), 9457-9464.
43. Tao, J. I. N., Xiaoyu, Q. I. N. G., & Liyan, H. (2016). Changes in grain production and the optimal spatial allocation of water resources in China. *Journal of resources and ecology*, 7(1), 28-35.
44. Wang, H., Bracciano, D., & Asefa, T. (2020). Evaluation of water saving potential for short-term water demand management. *Water Resources Management*, 34(10), 3317-3330.
45. WAPCOS. (1975). Lower Helmand valley development. *Water and Power Development Consultancy Services, India*.
46. Whitney, J. W. (2006). *Geology, water, and wind in the lower Helmand Basin, southern Afghanistan* (No. 2006-5182).
47. 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.
48. Yao, J., Zhao, Y., & Yu, X. (2018). Spatial-temporal variation and impacts of drought in Xinjiang (Northwest China) during 1961–2015. *PeerJ*, 6, e4926.
49. Zamani, R., Ali, A. M. A., & Roozbahani, A. (2020). Evaluation of adaptation scenarios for climate change impacts on agricultural water allocation using fuzzy MCDM methods. *Water Resources Management*, 34(3), 1093-1110.
50. 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.