

Assessing the Spatial Supply-Demand Balance of Hydrological Ecosystem Services in Iran's Semi-Arid Watersheds (Case Study: Karkheh Watershed)

Z. Asadolahi^{1*} and M. Keshkar²

Abstract

The research aimed at the water yield supply-demand mapping and its spatial matching in the Karkheh watershed in Lorestan province. At first, the water supply was estimated using InVEST 3.9. To this end, evapotranspiration, annual precipitation, land use/land cover, plant available water content, and the root depth restricting layer were entered into the model. The periods of 2003-2012 and 2013-2017 were chosen respectively for calibration and validation. Then, the water demand was calculated based on the agriculture water demands and urban and industrial consumptions. Water efficiency was determined from the difference between water supply and demand. Finally, the spatial balance of water supply-demand was evaluated with the RWBI index in each sub-basin. According to the results, for the annual water consumption of 746 Mm³, 1655.7 Mm³ of water was produced. Sub-basins S2, S19, S5, and S23 had the highest water yield and efficiency respectively with 220.2, 155.4, 149.2, and 136.2 Mm³. Water yield in pixel scale was calculated from 0 to 526 mm and S9, S2, and S1 sub-basins had the highest per-pixel water yield. Based on the results, water supply-demand imbalance was observed in S14, S15, and S4 (RWBI < 0) while S19, S23, S2, and S5 sub-basins had the highest spatial balance of supply-demand (RWBI > 0). According to the results, the spatial differences in water supply-demand are influenced by parameters such as land use, precipitation, and evapotranspiration and reflect the management decisions taken in the study area.

Keywords: InVEST-AWY, Lorestan Province, Modeling, Water Scarcity.

Received: June 2, 2024

Accepted: August 14, 2024

ارزیابی تعادل مکانی عرضه و تقاضای خدمات هیدرولوژیکی اکوسیستم در حوضه‌های آبخیز نیمه خشک ایران (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کرخه)

زهرا اسدالهی^{۱*} و مصطفی کشتکار^۲

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی تعادل مکانی عرضه و تقاضای تولید آب در حوضه آبخیز کرخه در استان لرستان انجام شد. در ابتدا میزان آب تولیدی با نرم‌افزار InVEST3.9 تخمین زده شد. به این منظور پارامترهای تبخیر و تعرق سالانه، بارش سالانه، کاربری و پوشش اراضی، حجم آب قابل دسترس گیاه و عمق محدود کننده ریشه وارد مدل شدند. همچنین، بازه‌های زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۲ و ۲۰۱۳-۲۰۱۷ برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل انتخاب شدند. در ادامه، میزان تقاضای آب بر اساس نیاز آبی اراضی تحت کشت، مصرف شهروندان و صنایع محاسبه شد و از اختلاف عرضه و تقاضای آب، میزان بازدهی آب مشخص شد. در نهایت، تعادل مکانی عرضه و تقاضای آب با شاخص RWBI ارزیابی شد. طبق نتایج، در مقابل تقاضای سالانه ۷۴۶ میلیون مترمکعب آب، عرضه سالانه آب معادل ۱۶۵۵/۷ میلیون مترمکعب آب برآورد شد. زیرحوضه‌های S2، S19، S5 و S23 به ترتیب با ۲۲۰/۲، ۱۵۵/۴، ۱۴۹/۲ و ۱۳۶/۲ میلیون مترمکعب بیشترین میزان تولید و بازدهی آب را داشتند. تولید آب در مقیاس پیکسل از صفر تا ۵۲۶ میلی‌متر با میانگین تولید ۱۰۱/۲ میلی‌متر محاسبه شد. زیرحوضه‌های S9، S2 و S1 بیشترین تولید آب در پیکسل را داشتند. طبق نتایج در زیرحوضه‌های S14، S15 و S4 کسری عرضه به تقاضای آب مشاهده شد (RWBI < 0) و زیرحوضه‌های S19، S23، S2 و S5 مازاد تولید آب داشتند (RWBI > 0). طبق نتایج، تعادل مکانی عرضه و تقاضای آب تولیدی تحت تأثیر پارامترهایی مانند کاربری اراضی، بارش و تبخیر و تعرق قرار دارد و منعکس کننده تصمیمات مدیریتی یک منطقه است.

کلمات کلیدی: InVEST-AWY، استان لرستان، مدل‌سازی، کمبود آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۳/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۵/۲۴

1- Assistant Professor, Department of Environment and Fisheries, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran. Email: asadolahi.z@lu.ac.ir

2- Ph.D. in Environmental Sciences, Department of Environmental Planning, Environmental Sciences Research Institute, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2024.459671.2760](https://doi.org/10.22034/IWRR.2024.459671.2760)

۱- استادیار گروه محیط‌زیست و شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.

۲- دانش‌آموخته دکتری محیط‌زیست، گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۳ امکان‌پذیر است.

خدمات اکوسیستم^۱ منافعی هستند که افراد از اکوسیستم بدست می‌آورند. این تعریف کلیه منافع محسوس و نامحسوس اکوسیستم را خدمت در نظر گرفته است و به منظور ایجاد ارتباط بین خدمات اکوسیستم و رفاه انسانی آنها را در چهار طبقه خدمات تأمینی^۲، تنظیمی^۳، فرهنگی^۴ و حمایتی^۵ دسته‌بندی می‌کند (MEA, 2005). تولید آب شیرین^۶ به‌عنوان یک خدمت اکوسیستمی، در طبقه خدمات تأمینی قرار می‌گیرد. اگرچه بیش از ۷۰ درصد از سطح زمین را آب تشکیل می‌دهد، تنها سه درصد آن آب شیرین است که دو سوم آن به‌شکل یخچال‌های طبیعی و کلاهک‌های یخی دائمی از دسترس خارج است و باقیمانده آن آب‌های سطحی جاری در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، سدها و نهرها هستند (Arora and Mishra, 2022). جوامع انسانی یا مستقیماً آب شیرین را برای مصارف شهری، کشاورزی، تجاری و صنعتی از اکوسیستم برداشت می‌کنند و یا از آب تولیدی استفاده‌های در محل مانند حمل و نقل آبی، تولید نیروی برقی، تفریح و ماهی‌گیری به‌عمل می‌آورند (Sharp et al., 2015). با افزایش جمعیت، نیاز به آب سالم و برداشت آب شیرین تشدید شده و در نتیجه دسترسی و حفاظت از آن به یک موضوع مبرم تبدیل شده است. به‌طوریکه اهداف توسعه پایدار^۷ (SDGs) که به‌عنوان دستور کار سازمان ملل برای سال ۲۰۳۰ به تصویب رسید، هدف ۶ خود را "اطمینان از دسترسی همگانی و مدیریت پایدار آب و فاضلاب تا سال ۲۰۳۰" معرفی کرد (Arora and Mishra, 2022). لذا کمیت و کیفیت آب در دسترس مبنای توسعه پایدار و برای توسعه اجتماعی-اقتصادی، سلامت اکوسیستم‌ها و بقای انسان حیاتی است (Yu et al., 2015). ارزش این خدمت اکوسیستمی به‌خصوص در مناطقی که در شرایط کمبود آب^۸ قرار داشته و منابع آب کافی برای رفاه انسانی یا عملکرد مناسب اکوسیستم‌ها وجود ندارد، بیشتر است. این مسأله در ایران که از نظر اقلیمی در ناحیه خشک و نیمه خشک جهان واقع شده است و آب در آن همواره به‌عنوان یک نهاده کمیاب مطرح بوده از اهمیت بیشتری برخوردار است (Salami and Taheri, 2019). برخلاف خشکسالی که خطر طبیعی ناشی از تغییر اقلیم است (Tsakiris and Vangelis, 2005; Albiac et al., 2013) کمبود آب معمولاً یک مسئله مدیریتی است که به‌استفاده طولانی مدت ناپایدار از منابع آب مربوط می‌شود، به‌طوریکه آب بیشتری نسبت به آب تولیدی اکوسیستم مصرف می‌شود (Van Loon and Van Lanen, 2013; EU, 2007; Bond et al., 2019). با افزایش جمعیت طی سال‌های اخیر، عدم تعادل فضایی عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستم به‌خصوص تولید آب افزایش یافته است (Burkhard et al., 2012; Kroll et al., 2012; Chen et al., 2020).

کمبود آب در یک منطقه به‌طور همزمان به میزان عرضه و تقاضای آب بستگی دارد. عرضه آب^۹، ظرفیت و توان یک منطقه مشخص برای تأمین آب در یک دوره زمانی معین را نشان می‌دهد در حالیکه تقاضای آب^{۱۰} میزان آبی است که در حال حاضر در یک منطقه خاص مصرف شده یا در یک دوره زمانی استفاده می‌شود (Burkhard et al., 2012; Chen et al., 2020). عرضه خدمات اکوسیستم را نمی‌توان بدون در نظر گرفتن تقاضای خدمات اکوسیستم مطالعه کرد. با توجه به اینکه تفاوت‌های مکانی در عرضه و تقاضای آب و عدم برآوردن تقاضای آب در یک منطقه می‌تواند منعکس‌کننده تصمیمات مدیریتی اتخاذ شده در آن منطقه باشد، اهداف مدیریت خدمات اکوسیستم باید تضمین کنند که عرضه بیشتر از تقاضا است (Maron et al., 2017). نقشه‌سازی مکانی خدمات اکوسیستمی ابزار مهمی برای تصمیم‌گیران است و آنها را قادر می‌سازد تا به شکل مکانی نواحی با عرضه بالای خدمات را شناسایی کنند (Martínez-Harms and Balvanera, 2012). برنامه‌ریزی و مدیریت مؤثر منابع آب نیازمند مدل‌های پیش‌بینی تولید آب و درک تعاملات پیچیده میان منابع تأمین و مصارف مختلف آب است (Milly et al., 2005). نقشه‌سازی عرضه و تقاضای آب ابزار مفیدی در سنجش تطابق و عدم تطابق مکانی عرضه و تقاضا است که خود در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی مکانی مؤثر است (Crossman et al., 2013). از جمله نرم‌افزارهای مدل‌سازی خدمات هیدرولوژیک اکوسیستم می‌توان به InVEST، SWAT و VIC اشاره نمود (Decsi et al., 2022). برخی از مدل‌ها مانند SWAT و VIC به داده‌های مشاهداتی طولانی‌مدت هیدرولوژیکی و اقلیمی برای کالیبره کردن پارامترهای مدل نیاز دارند که دسترسی به آنها ممکن است دشوار باشد (Zaccaria et al., 2018; Brulebois et al., 2015; Yen et al., 2006). با توجه به چالش‌هایی از قبیل عدم دسترسی به داده در مناطق دوردست و تخصص مورد نیاز، بررسی مدل‌هایی ضروری است که به داده و تلاش محاسباتی کمتری نیاز دارند، اما همچنان می‌توانند تخمینی مناسب از خدمات هیدرولوژیکی ارائه دهند (Decsi et al., 2022). که از آن جمله می‌توان به نرم‌افزار ارزش‌گذاری یکپارچه خدمات اکوسیستم و همکنشی آنها (InVEST)^{۱۱} اشاره نمود که توسط پروژه سرمایه طبیعی^{۱۲} توسعه یافته است. InVEST چندین مزیت دارد که آن را برای طیف وسیعی از کاربران قابل اجرا می‌کند که از آن جمله می‌توان به داده‌های ورودی کمتر، سهولت در راه‌اندازی و تخمین تولید آب سالانه با داده‌های سنجش از راه دور در مناطق با عدم دسترسی به داده‌های زمینی اشاره نمود. همچنین، تخمین‌هایی را با وضوح فضایی بالا تولید می‌کند که آن را برای ارزیابی در مقیاس‌های مختلف مناسب می‌کند (Sharp et al., 2015; Valencia et al., 2023). مطالعات اخیر انجام شده در سطح جهان با هدف بررسی اثرات

استان ایلام واقع شده است. رودخانه کرخه از به هم پیوستن رودخانه‌های اصلی گاماسیاب، سیمره، قره سو و کشکان بوجود می‌آید که هر یک از آنها به انضمام قسمت سفلی رودخانه کرخه دارای حوضه آبخیز هستند که زیر حوضه‌های اصلی کرخه را تشکیل می‌دهند زیرحوضه‌های سیمره و کشکان در محدوده استان لرستان قرار دارند (Ministry of Energy, 2004). حوضه آبخیز رودخانه کرخه با مساحت ۱۶۳۵۵ کیلومتر مربع در عرض شمالی ۳۲/۷ درجه تا ۳۴/۴ درجه و طول شرقی ۴۶/۸ تا ۴۹ درجه در استان لرستان واقع شده است (شکل ۱). شهرهای خرم‌آباد، سلسله، دلفان، پلدختر، الستر، نورآباد، چقابل، معمولان، کونانی، زاغه، ویسیان، گراب، سراب دوره، چغلوندی، درب گنبد، هفت چشمه و کوه‌دشت در محدوده این حوضه آبخیز قرار دارند. کمترین ارتفاع از سطح دریا در این منطقه ۱۸۷ متر و بیشترین ارتفاع ۳۶۳۸ متر است که باعث تغییرات میزان بارندگی شده است. متوسط بارش سالانه در این حوضه ۵۲۱ میلی‌متر است.

۲-۲- روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر شامل گام‌های اصلی زیر است:

- تخمین عرضه آب در سطح زیرحوضه‌ها با استفاده از نرم‌افزار InVEST3.9؛
- برآورد بازدهی آب در سطح زیرحوضه‌ها بر اساس تقاضای آب؛
- ارزیابی تعادل مکانی عرضه و تقاضای آب در سطح هر زیرحوضه. روند انجام پژوهش در شکل (۲) ارائه شده است.

۲-۲-۱- تخمین عرضه آب با مدل InVEST-AWY

در گام اول میزان عرضه آب با استفاده از نرم‌افزار InVEST 3.9.0 مدل‌سازی شد. مدل تولید آب سالانه^{۱۳} (AWY) در این نرم‌افزار بر اساس منحنی بودیکو^{۱۴} و متوسط بارش سالانه استوار است. میزان تولید آب سالانه (Y(x)) در هر پیکسل از سیمای سرزمین x به شکل زیر محاسبه می‌شود:

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

که، AET(x) تبخیر و تعرق سالانه واقعی برای پیکسل x و P(x) بارش سالانه در پیکسل x است. شکل (۳) دیاگرام مفهومی از بیان آب مورد استفاده در مدل AWY را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که چرخه آب ساده سازی شده است و شامل تنها پارامترهای رنگی و عدم توجه به پارامترهای با رنگ خاکستری است (Sharp et al., 2015).

سیاست‌گذاری‌های مختلف کاربری اراضی، رشد شهرنشینی و تغییرات اقلیمی بر عرضه و تقاضای آب با نرم‌افزار InVEST انجام شده است (Wang et al., 2019; Chen et al., 2020; Li et al., 2022;) (Basha et al., 2024; Jiang et al., 2024). از جمله مطالعات داخلی انجام شده در زمینه عرضه و تقاضای آب با نرم‌افزار InVEST می‌توان به پژوهش (Joorabian Shooshtari et al., 2023) اشاره نمود که در آن تغییرات آبدی در ۱۱ حوضه آبخیز واقع در مرز شرقی کشور (استان خراسان جنوبی) تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی و پوشش سرزمین شبیه‌سازی شد. مدل با استفاده از داده‌های طولانی مدت دبی در ایستگاه‌های افین، خونیک علیا، منصورآباد، گزیک و آهنگران واسنجی شد. همچنین، ارزش اقتصادی خدمت تولید آب در هر کدام از کاربری اراضی/پوشش‌های مختلف سرزمین محاسبه شد. نتایج، بیشترین حجم آبدی را حوضه آبخیز اسفدان با میزان ۳۱۲۶۱۲۱ مترمکعب و کمترین را حوضه نمکزار خواف با میزان ۱۳۵۵۱۱ مترمکعب نشان داد. همچنین، (Balist et al., 2022) به برآورد میزان عرضه و تقاضای آب و شناسایی مناطق دارای تنش آبی در سطح حوضه آبریز مرزی سیروان پرداختند. (Daneshi et al., 2021) عرضه و مصرف آب را با نرم‌افزار InVEST مدل‌سازی کردند و اثرات همزمان تغییر کاربری و تغییر اقلیم بر امنیت آب را با شاخص استرس آبی بررسی نمودند و هزینه‌های اقتصادی کاهش عرضه آب را در آینده تخمین زدند. از سایر مطالعات انجام شده با هدف مدل‌سازی تأمین آب با نرم‌افزار InVEST می‌توان به مطالعه (Shafizadeh and Chahouki, 2020) در حوضه آبخیز طالقان میانی اشاره نمود. تأمین پایدار آب برای مصارف کشاورزی، صنعت و شرب در حوضه‌های آبخیز نیمه خشک ایران باید یکی از مهمترین اولویت‌های سیاست‌گذاران باشد. با توجه به افزایش جمعیت در استان لرستان نیاز به آب برای شرب، صنعت و کشاورزی رو به افزایش است و مسئله کمبود تأمین آب باید با مدیریت منابع آب و درک مفهوم عرضه و تقاضای آب جبران شود. لذا پژوهش حاضر با هدف نقشه‌سازی مکانی عرضه و تقاضای تولید آب در حوضه آبخیز کرخه و بررسی تعادل و عدم تعادل مکانی آن انجام می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز رودخانه کرخه در غرب کشور ایران، در مناطق میانی و جنوبی رشته کوه‌های زاگرس قرار دارد. قسمت شمالی حوضه در استان کرمانشاه، شرق حوضه در استان همدان، قسمت میانی در استان لرستان، قسمت جنوبی در استان خوزستان و قسمت غربی حوضه در

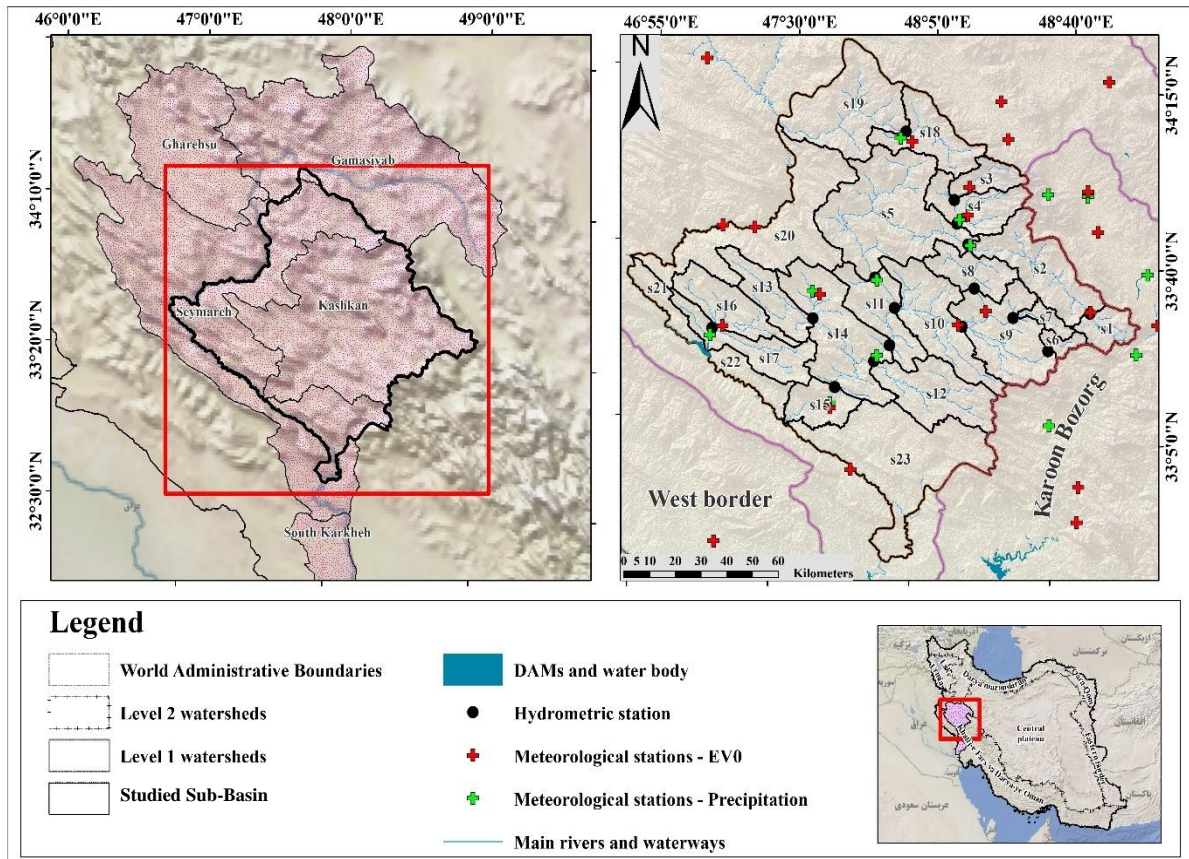


Fig. 1- Location of Karkheh watershed sub-basins in Lorestan province

شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز کرخه در استان لرستان

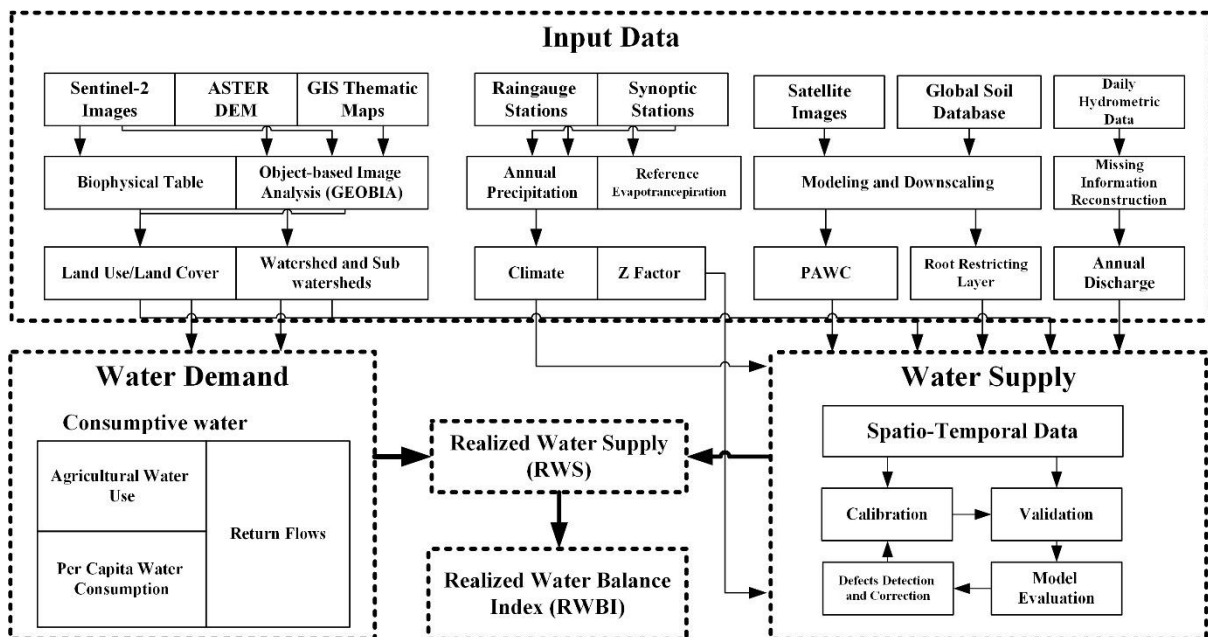


Fig. 2- The conceptual model of the research

شکل ۲- مدل مفهومی پژوهش

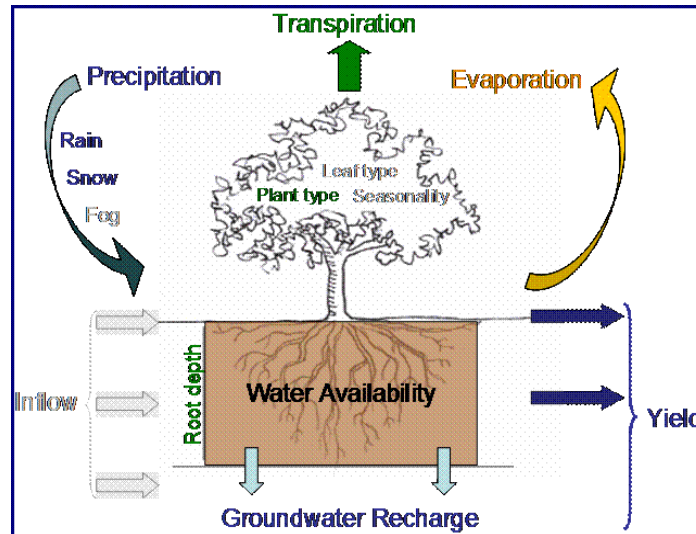


Fig. 3- Water balance in InVEST-AWY model (Sharp et al., 2015)

شکل ۳- بیلان آب در مدل InVEST-AWY

PAWC=

AWC . Min (Rest. layer. depth, root. depth)

در رابطه (۵)، عمق محدود کننده ریشه^{۱۵}، عمقی از خاک است که در آن به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از نفوذ ریشه جلوگیری می‌شود. عمق ریشه زنی گیاه اغلب عمقی است که در آن ۹۵ درصد بیوماس ریشه گیاه را در خود جای داده است. ظرفیت آب در دسترس گیاه^{۱۶} (PAWC) است که از تفریق ظرفیت نگهداری آب خاک و نقطه پژمردگی بدست می‌آید. پارامتر هیدرولوژیکی Z ثابت تجربی است که با الگوی بارش محلی و تعداد وقایع بارش هر سال مرتبط است. این ضریب ارزشی بین ۱ تا ۳۰ دارد. پارامتر Z از رابطه $N \times 0.2$ محاسبه شد که N تعداد روزهای بارانی در سال است (Donohue et al., 2012). برای طبقات کاربری اراضی بدون پوشش (مناطق شهری و تالاب و غیره) تبخیر و تعرق واقعی مستقیماً از ET_0 بر اساس رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$AET(x) = \text{Min}(K_c(I_x) \cdot ET_0(x), P(x)) \quad (6)$$

که در رابطه بالا، $ET_0(x)$ تبخیر و تعرق مرجع و $K_c(I_x)$ تبخیر و تعرق برای هر طبقه کاربری اراضی است. داده‌های ورودی مورد نیاز مدل InVEST-AWY و خروجی مورد انتظار در جدول (۱) خلاصه شده است.

– متوسط بارش سالانه

برای تهیه نقشه رستری متوسط بارش سالانه از ایستگاه‌های سینوپتیک، کلیماتولوژی و باران‌سنجی سازمان هواشناسی کشور و اطلاعات ثبت شده در ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو استفاده شد. در این پژوهش دوره آماری ۱۵ ساله (۲۰۱۷-۲۰۰۳) در نظر گرفته

برای طبقات کاربری دارای پوشش، بخش $\frac{AET(x)}{P(x)}$ عبارت است از:

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)} \right)^\omega \right]^{1/\omega} \quad (2)$$

که، $PET(x)$ تبخیر و تعرق بالقوه و ω پارامتر غیرفیزیکی است که ویژگی‌های طبیعی خاکی- اقلیمی را مشخص می‌کند. تبخیر و تعرق بالقوه $PET(x)$ عبارت است از:

$$PET(x) = K_c(I_x) \cdot ET_0(x) \quad (3)$$

در این رابطه، $ET_0(x)$ تبخیر و تعرق مرجع از پیکسل x و $K_c(I_x)$ ضریب تبخیر و تعرق گیاهی مربوط به طبقه کاربری اراضی (I_x) در پیکسل x است. $ET_0(x)$ نشان دهنده شرایط اقلیمی محلی براساس تبخیر و تعرق یک گیاه مرجع است که در آن شرایط روئیده است و $K_c(I_x)$ عمدتاً توسط ویژگی‌های پوشش گیاهی کاربری اراضی در هر پیکسل تعیین می‌شود. K_c ارزش‌های ET_0 را برای هر نوع پوشش گیاهی در هر پیکسل نقشه کاربری اراضی تعدیل می‌کند. در رابطه (۲) $\omega(x)$ یک پارامتر تجربی است که از رابطه (۴) قابل محاسبه است:

$$\omega(x) = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (4)$$

در رابطه (۴)، $AWC(x)$ حجم آب قابل دسترس گیاه (mm) است. بافت خاک و عمق مؤثر ریشه‌زنی عوامل تعیین کننده این پارامتر هستند و در واقع میزان آبی است که می‌تواند در خاک برای استفاده گیاه نگهداری و منتشر شود. $AWC(x)$ از ظرفیت آب قابل دسترس گیاه و حداقل عمق لایه محدود کننده ریشه و عمق ریشه‌زنی گیاه حاصل می‌شود.

$$AWC(x) = \text{Min}(\text{Rest layer depth and root depth}) * PAWC \quad (5)$$

جغرافیایی، ارتفاع و تابش خورشیدی است که برای ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه محاسبه شد.

شد و در گام بعد جهت تکمیل و بازسازی آمار بارش ایستگاه‌هایی که دارای کمبود آماری بودند از روابط آماری استفاده شد.

متوسط تبخیر و تعرق مرجع سالانه

برای محاسبه ET_0 از نرم‌افزار REF-ET استفاده شد. الگوریتم استفاده شده در این نرم‌افزار برگرفته از دستورالعمل ASCE و نشریه فائو ۵۶ (Allen et al., 1998) است. معادله‌ای که این نرم‌افزار برای محاسبه ET_0 از آن استفاده کرده است معادله فائو - پنمن ماتنیت^{۱۷} (FPM) است، در واقع معادله FPM حالت خاصی از معادله پنمن-ماتنیت با تغییر پارامترهای آیرودینامیک و مقاومت سطحی برای گیاه مرجع چمن است. معادله FPM برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع به صورت زیر بیان شده است:

$$ET_{FPM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.3u_2)} \quad (7)$$

ET_{FPM} تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلیمتر بر روز)؛ R_n تابش خالص ورودی به سطح گیاه (مگاژول بر متر مربع بر روز)؛ G شار گرمای خاک (مگاژول بر متر مربع بر روز)؛ T میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری (درجه سلسیوس)؛ u_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)؛ e_s فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)؛ e_a فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال)؛ $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)؛ Δ شیب منحنی فشار بخار (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس) و γ ضریب سایکرومتری (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس) است. داده‌های ورودی نرم‌افزار REF-ET برای محاسبه ET_0 شامل میانگین روزانه، کمینه و بیشینه دما، میانگین درصد رطوبت نسبی، عرض

حجم (گنجایش) آب در دسترس گیاه (PAWC) - مقدار عددی PAWC کسری از صفر تا یک است که با توجه به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک طبق رابطه زیر قابل محاسبه است (Zhou et al., 2005).

$$PAWC = 0.30 * CLAY \% + 0.369 * SILT \% + 0.045 * OM \% \quad (8)$$

که در آن SAND، SILT، CLAY و SOC به ترتیب نسبت ماسه، سیلت، رس و مواد آلی در خاک هستند. داده‌ها مطابق با ورودی به کسری از صفر به یک تبدیل شدند. پارامترهای مرتبط با خاک از مرکز داده جهانی خاک^{۱۸} استخراج شد.

عمق محدود کننده ریشه

با توجه به عدم وجود نقشه عمق محدود کننده ریشه و عمق ریشه زنی با توجه به نوع خاک، نقشه عمق خاک جایگزین شد (Sharp et al., 2015). در این پژوهش از نقشه عمق خاک تهیه شده توسط مرکز داده جهانی خاک استفاده شد.

Table 1- Required input data and expected output from the InVEST-AWY model

جدول ۱- داده‌های ورودی مورد نیاز و خروجی مورد انتظار از مدل InVEST-AWY

	Input	Data Type	Output
Supply	Average annual precipitation	GIS Raster	Water Yield (m3/s)
	Average annual reference evapotranspiration	GIS Raster	
	Root restricting layer depth	GIS Raster	
	Plant available water content	GIS Raster	
	Land use/Land cover	GIS Raster	
	Watershed/Sub watershed	Shapefile	
	Biophysical table	.csv	
Demand	Z parameter	Floating point value	Water Consume (m3/s)
	Demand Table	.csv	

کاربری و پوشش اراضی در محیط نرم‌افزار شی‌گرا استفاده شد (جدول ۲). به منظور ارزیابی دقت و صحت نقشه طبقه‌بندی شده از منطقه مورد مطالعه، با مطابقت دادن نقشه طبقه شده با نقشه واقعیت زمینی حاصل از مطالعات میدانی و نقاط کنترل زمینی برداشت شده (۱۳۰)

کاربری و پوشش اراضی

نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ به منظور پوشش بازه زمانی اجرای مدل InVEST-AWY مورد استفاده قرار گرفتند. تصاویر ماهواره لندست و سنتینل برای استخراج طبقات

نقطه تعلیمی) توسط GPS ارزیابی دقت طبقه‌بندی مشخص شد و در نهایت ماتریس خطا تشکیل شد و بر اساس آن دقت کلی و ضریب کاپا مشخص شد. در این مرحله جدول بیوفیزیکی شامل طبقات کاربری و پوشش اراضی و ضرایب بیوفیزیکی هر طبقه کاربری و پوشش اراضی تهیه شد (جدول ۳).

Table 2- Satellite Images used to extract land use and land cover
جدول ۲- تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده برای استخراج کاربری و پوشش اراضی

Platform	Number of Bands	Bands Used	Spatial Resolution	Swath Width	Acquisition Date	Path/Row Number
Landsat ETM+	8	B1	30m	185*185 km	2000/09/11, 2000/04/20, 1999/12/30	165/36
		B2			2000/09/11, 2000/04/20, 1999/12/30	165/37
		B3			2000/08/17, 2000/05/29, 1999/12/21	166/36
		B4			2000/08/17, 2000/05/29, 1999/12/21	166/37
		B5			2000/08/08, 2000/05/04, 1999/12/28	167/36
		B8			2000/08/08, 2000/05/04, 1999/12/28	167/37
Landsat OLI/TIRS	11	B2	15m-30m	185*185 km	2020/09/10, 2020/05/21, 2019/11/11	165/36
		B3			2020/09/26, 2020/05/21, 2019/11/11	165/37
		B4			2020/09/17, 2020/05/12, 2019/11/02	166/36
		B5			2020/09/17, 2020/05/12, 2019/11/02	166/37
		B6			2020/09/24, 2020/05/19, 2019/11/09	167/36
		B8			2020/09/24, 2020/05/19, 2019/11/09	167/37
Sentinel2	13	B2	10m-20m	100*100 km	2020/09/22, 2020/05/12, 2019/11/07	T39SUT
		B3			2020/09/17, 2020/05/20, 2019/11/12	T39STS
		B4			2020/09/19, 2020/05/17, 2019/11/09	T39SUS
		B8			2020/09/14, 2020/05/12, 2019/11/04	T39SVS
		B11			2020/09/22, 2020/05/30, 2019/11/22	T39STT
		B8			2020/09/22, 2020/05/30, 2019/11/22	T38SQC
		B11			2020/09/20, 2020/05/18, 2019/11/15	T38SPC
		B11			2020/09/22, 2020/05/20, 2019/11/02	T38SQD
		B11			2020/09/22, 2020/05/30, 2019/11/12	T38SQB

Table 3- Biophysical coefficients used in this research
جدول ۳- فاکتورهای بیوفیزیکی مورد استفاده در این پژوهش

K _c	Root-Depth (Sharp et al., 2015)	LULC_veg	LULC_des	lucode
0.2	1100	1	Forest	1
0.23	600	1	Rangeland	2
1.1	500	1	Irrigated Farming	3
0.3	200	1	Rainfed Farming	4
0.8	0	0	Man-made area	5
0.7	0	0	Water Resources	6

ضرایب تعیین^{۱۹} (R²) و نش-ساتکلیف^{۲۰} (NSE) مطابق روابط (۹) و (۱۰) ارزیابی شد که در آنها Q_{s,i} و Q_{m,i} به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و Q_s و Q_m به ترتیب متوسط مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده هستند.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (9)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (10)$$

اجرا و کالیبراسیون مدل

در این پژوهش مدل InVEST-AWY در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۱۰۷ اجرا شد. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مورد استفاده به منظور ارزیابی کاربری مدل در جدول (۴) قابل مشاهده است. سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ به منظور کالیبراسیون انتخاب شدند و صحت‌سنجی مدل از ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷ انجام شد. عملکرد مدل به کمک مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و محاسبه

Table 4- Discharge gauges used for the calibration of the InVEST-AWY model
جدول ۴- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مورد استفاده به منظور ارزیابی کارایی مدل InVEST-AWY

Discharge gauge number	River- Discharge gauge name	UTM_x	UTM_y	Elevation
21-183	Kashkan-Poldokhtar	753457	3672530	700
21-177	Kashkan-Afrineh	769392	3691735	820
21-173	Kashkan-Doab	775393	3710068	960
21-169	Haru-Kaka Reza	245870	3734458	1550

کشاورزی (آبی و دیم)، مناطق انسان‌ساخت و منابع آب به ترتیب ۲۵/۴، ۱/۳ و ۰/۲ درصد را به خود اختصاص دادند. زیرحوضه‌های S_8 و S_{12} بیشترین مساحت جنگل (به ترتیب ۶۳/۵ و ۵۳/۹ درصد) و زیرحوضه‌های S_3 و S_1 بیشترین مساحت مرتع (۷۹/۱ و ۶۸/۳ درصد) را به خود اختصاص دادند. در شکل ۴- (c) نقشه بارش به صورت رستری نشان داده شده است. وضعیت بارش در منطقه مورد مطالعه از شرق به غرب کاهش یافته است. میانگین بارش ۴۸۵ میلی‌متر، کمترین میزان بارش ۳۷۳ میلی‌متر در شرقی‌ترین نقطه منطقه و بیشترین میزان بارش ۷۰۹ میلی‌متر محاسبه شد. در نقشه ۳- (b) آب قابل دسترس گیاه ارائه شده است که در این مدل کسری از صفر تا یک است. در نقشه ۴- (e) تبخیر و تعرق مرجع از ۱۳۰۱ میلی‌متر تا ۱۹۰۵ میلی‌متر در غرب منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. میانگین تبخیر و تعرق واقعی ۳۶۹/۹ میلی‌متر محاسبه شد (جدول ۶). در نقشه ۴- (d) عمق محدود کننده ریشه مشاهده می‌شود که با توجه به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ریشه گیاهان تا این عمق می‌توانند نفوذ کنند که از ۷۳۰ تا ۲۰۰۰ میلی‌متر برآورد شد. نتایج R^2 و NSE دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی در ایستگاه‌های هیدرومتری انتخابی، قدرت پیش‌بینی مدل InVEST-AWY را نشان می‌دهد. در صورتی که مقادیر نهایی این پارامترها از $NSE \geq 0$ و $R^2 \geq 0$ بیشتر باشند، به عنوان مقادیر مورد قبول در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل (۵) قابل مشاهده است، چهار ایستگاه هیدرومتری که در منطقه قرار گرفته‌اند، هم در واسنجی و هم در اعتبارسنجی از نتایج قابل قبولی برخوردارند. ارتباط بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ایستگاه‌های منتخب در شکل (۶) قابل مشاهده است.

۲-۲-۲- برآورد بازدهی آب (RWS) در سطح زیرحوضه‌ها
 RWS از اختلاف میزان عرضه و تقاضای آب در هر زیرحوضه طبق روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه شد. میزان تقاضا بر اساس نیاز آبی اراضی تحت کشت آبی و مصرف شهروندان و صنایع به تفکیک زیرحوضه از سالنامه آماری و نیاز آبی گونه‌های غالب کشت شده گندم و جو برآورد شد (Sharp et al., 2015) که در رابطه (۱۲)، WC استفاده مصرفی $(m3/yr.pixel)$ برداشت W $(m3/yr)$ ، R آب برگشتی $(m3/yr)$ و n تعداد پیکسل‌ها در یک طبقه کاربری مشخص است.

$$RWS = \text{Water Yield} - \text{Water Consumption} \quad (11)$$

$$\text{Water Consumption} = \frac{W-R}{n} \quad (12)$$

۲-۲-۳- سنجش تعادل مکانی عرضه و تقاضای آب (RWBI)
 RWBI در سطح هر زیرحوضه از طریق رابطه (۱۳) محاسبه شد (Ming et al., 2022) که در آن S_{max} و D_{max} به ترتیب بیانگر حداکثر مقدار عرضه و تقاضای آب است که از نقشه‌های مکانی عرضه و تقاضا استخراج می‌شود. $RWBI > 0$ نشان‌دهنده مازاد تولید آب، $RWBI = 0$ نشان‌دهنده تعادل مکانی عرضه و تقاضا و $RWBI < 0$ نشان‌دهنده کسری عرضه به تقاضا است.

$$RWBI = \frac{RWS}{(S_{max} + D_{max}/2)} \quad (13)$$

۳- نتایج و بحث

مطابق شکل ۳ (a) طبقات کاربری و پوشش اراضی شامل کشاورزی آبی و دیم، جنگل، مرتع، مناطق انسان‌ساخت و منابع آب در منطقه مورد مطالعه شناسایی شدند. آمار بدست آمده برای دقت و صحت طبقه‌بندی نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد بطوری که ضریب کاپای طبقه‌بندی معادل ۰/۹۳ و ۰/۹۰ به ترتیب برای سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۰ برآورد شد. طبقات مناطق انسان‌ساخت و منابع آب با بیشترین دقت استخراج شدند. مطابق جدول (۵) جنگل‌ها و مراتع با مساحت ۱۱۹۵۰ کیلومتر مربع بیش از ۷۳/۱ درصد منطقه مورد مطالعه و طبقات

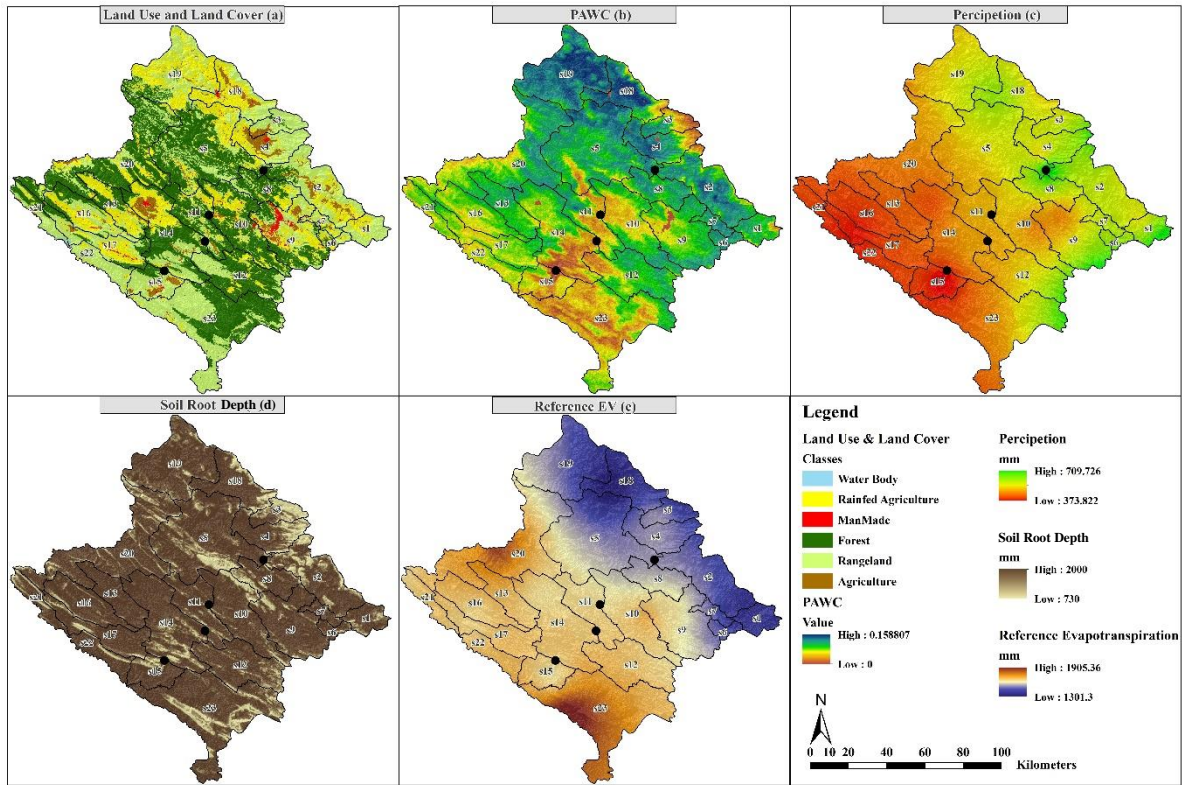
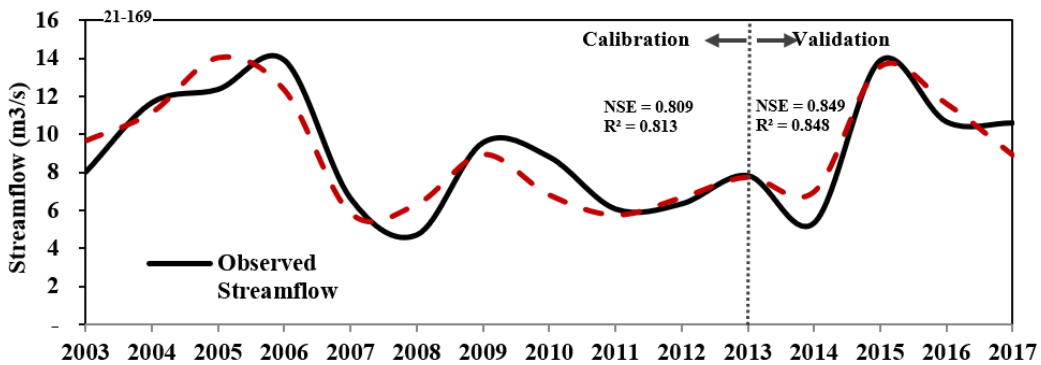
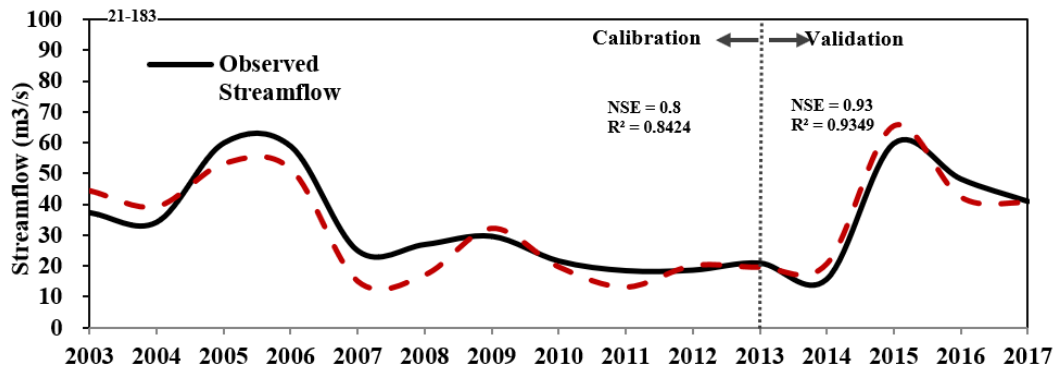


Fig. 4- a) Land use/Land cover, b) PAWC, c) Precipitation, d) Root restricting layer depth, e) ET_0
 شکل ۴- نقشه کاربری و پوشش اراضی، (b) PAWC، (c) بارش، (d) عمق محدود کننده ریشه، (e) تبخیر و تعرق مرجع سالانه



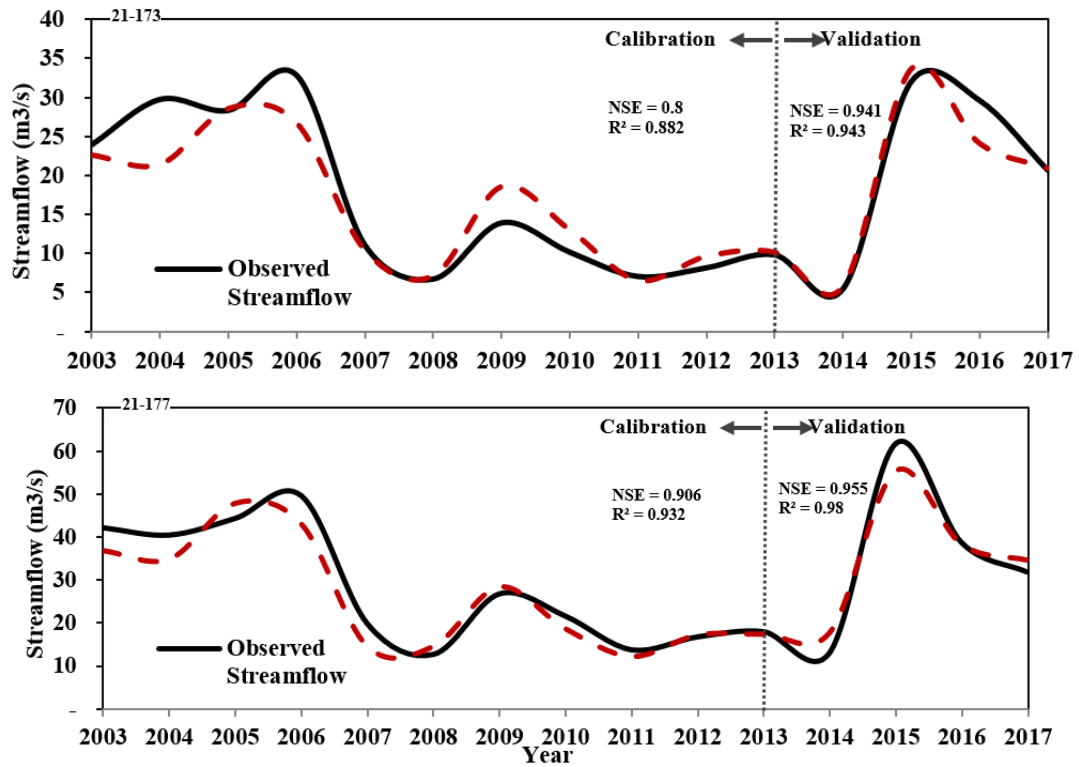
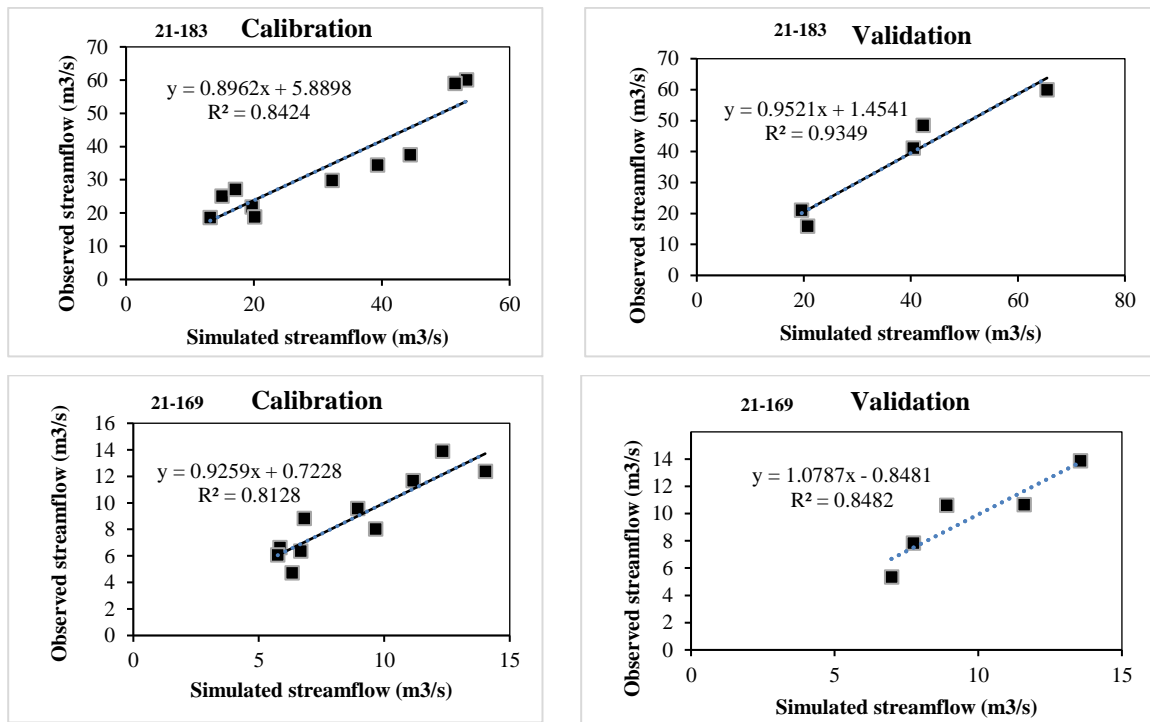


Fig. 5- Calibration and validation of discharge gauges
 شکل ۵- صحت‌سنجی و واسنجی ایستگاه‌های هیدرومتری



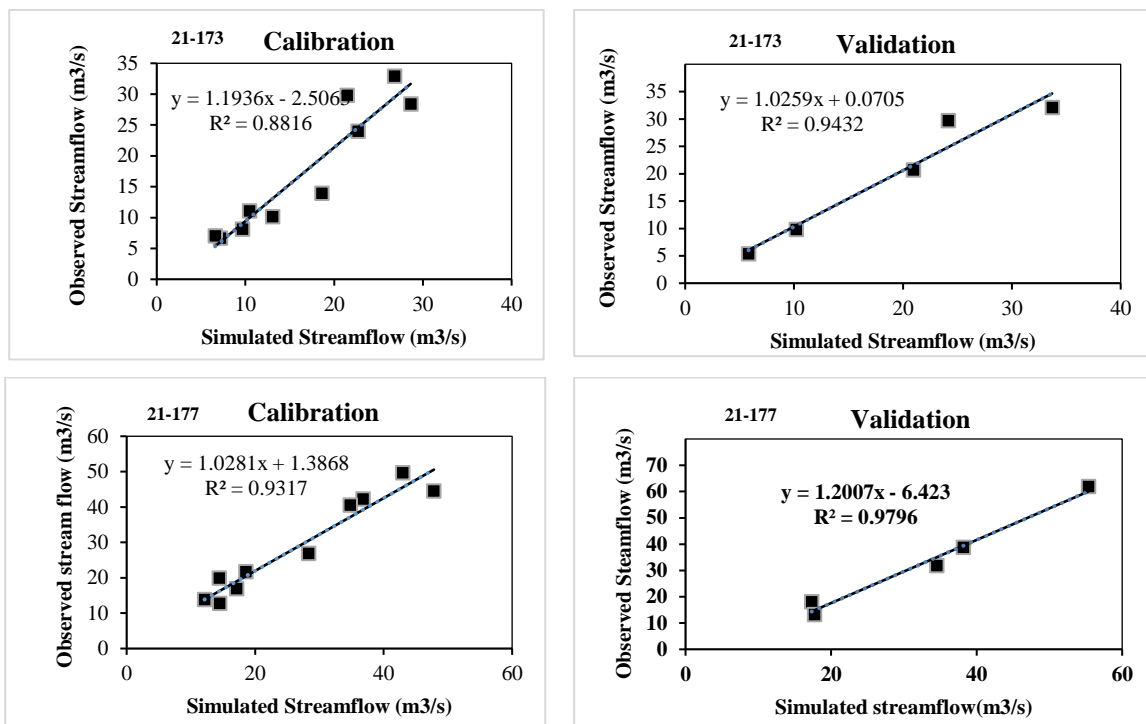


Fig. 6- Correlation between observed streamflow (x-axis) and simulated streamflow (y-axis) during calibration and validation periods (2003-2012 and 2013-2017)

شکل ۶- همبستگی میان جریان شبیه‌سازی شده (محور x) و جریان مشاهداتی (محور y) طی دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی (۱۳۹۶-۱۳۸۲)

Table 5- Outputs of InVEST-AWY model for each sub-basin

جدول ۵- خروجی‌های مدل InVEST-AWY در زیرحوضه‌ها

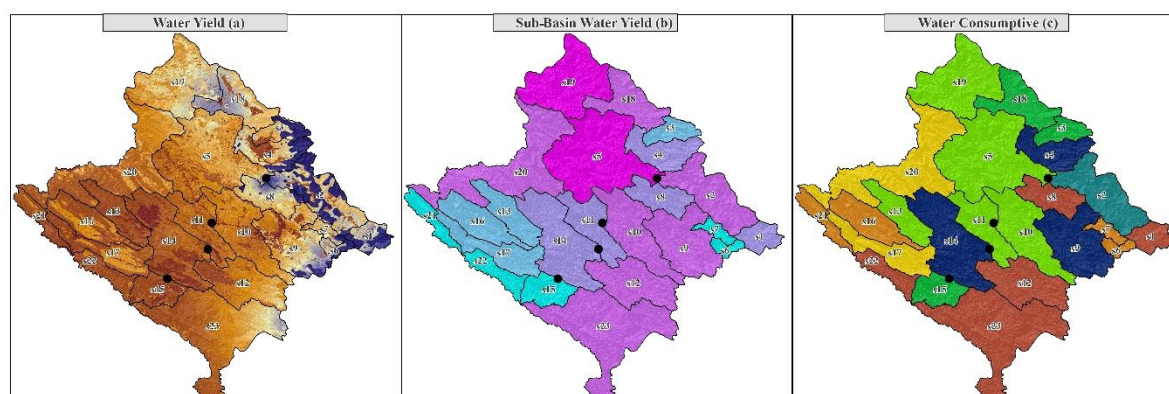
Sub-basin Code	Sub Watershed Name	Area (km ²)	Precipitation (mm)	AET (mm)	Land Use/Land Cover (%)							Water Yield (Mm ³ /year)	Water Consumption (Mm ³ /year)	RWS (Mm ³ /year)	RWBI
					Water	Rainfed Farming	Man-made	Forest	Rangeland	Irrigated Farming					
21173	S ₅	1705.5	515.0	427.5	0.1	20.0	1.0	28.2	43.7	7.0	149.2	22.6	+126.5	+0.7	
21169	S ₂	880.6	553.1	303.0	0.2	23.9	0.8	7.1	59.4	8.6	220.2	85.7	+134.4	+0.8	
21167	S ₁	265.1	582.7	289.4	0.6	29.6	0.0	0.0	68.3	1.4	77.7	3.2	+74.5	+0.4	
21171	S ₄	512.0	550.7	348.4	0.0	16.2	1.9	1.8	62.7	17.4	103.6	118.7	-15.1	-0.1	
21172	S ₁₀	886.9	491.3	422.2	0.0	24.0	3.6	42.8	25.4	4.1	61.3	21.1	+40.2	+0.2	
21175	S ₉	954.6	522.3	386.7	0.0	25.0	4.6	32.7	32.3	5.3	129.4	108.1	+21.3	+0.1	
21966	S ₆	106.6	571.4	293.1	0.0	35.1	0.4	18.5	41.6	4.4	29.7	4.3	+25.4	+0.1	
21861	S ₇	123.9	543.9	376.7	0.0	29.3	2.0	7.4	53.7	7.6	20.7	9.0	+11.7	+0.1	
21174	S ₈	425.5	547.8	377.7	0.0	18.7	0.5	53.9	26.0	0.8	72.4	3.6	+68.8	+0.4	
21177	S ₁₁	581.1	473.3	417.7	0.1	20.9	1.9	36.5	35.0	5.5	32.3	17.2	+15.1	+0.1	
21183	S ₁₄	1156.6	437.5	401.6	0.1	21.1	1.7	39.6	32.1	5.4	41.6	123.1	-81.5	-0.5	
21179	S ₁₂	807.1	510.8	436.9	0.0	8.6	0.3	63.5	27.4	0.2	59.7	2.1	+57.5	+0.3	
21954	S ₃	263.9	543.7	308.9	0.0	2.8	0.9	5.3	79.1	11.9	62.0	34.8	+27.2	+0.2	
21181	S ₁₃	456.6	423.7	391.5	0.1	46.4	0.9	32.7	16.8	3.1	14.7	16.8	-2.1	0.0	
21145	S ₁₈	612.0	536.4	388.6	0.0	51.7	2.1	0.0	36.2	9.9	90.4	53.6	+36.9	+0.2	
21163	S ₁₆	567.3	403.8	350.8	0.0	33.7	1.3	26.9	36.9	1.2	30.1	10.1	+19.9	+0.1	
2215	S ₂₃	1793.2	467.8	391.8	0.2	21.3	1.3	36.6	36.5	4.1	136.2	1.6	+134.7	+0.8	
2221	S ₁₅	372.6	389.9	356.1	0.1	20.5	1.7	38.6	33.3	5.7	12.6	56.7	-44.1	-0.3	
22220	S ₂₀	1557.9	447.8	381.1	0.1	28.2	0.5	41.4	28.5	1.3	103.9	15.3	+88.6	+0.5	

Sub-basin Code	Sub Watershed Name	Area (km ²)	Precipitation (mm)	AET (mm)	Land Use/Land Cover (%)							Water Yield (Mm ³ /year)	Water Consumption (Mm ³ /year)	RWS (Mm ³ /year)	RWBI
					Water	Rainfed Farming	Man-made	Forest	Rangeland	Irrigated Farming					
22311	S ₂₂	302.2	399.8	360.3	0.5	29.8	0.9	29.9	36.5	2.4	12.0	1.2	+10.8	+0.1	
22312	S ₁₇	583.3	404.8	351.4	0.2	32.9	1.6	25.0	38.6	1.6	31.1	14.4	+16.7	+0.1	
22313	S ₂₁	253.5	399.9	361.9	0.4	30.6	0.7	33.9	31.6	2.8	9.6	4.0	+5.6	0.0	
22334	S ₁₉	1187.0	515.4	384.4	0.1	48.6	1.1	7.5	38.4	4.5	155.4	18.7	+136.7	+0.8	
Total		16354.9	485.2	369.9	0.2	21.3	1.3	36.6	36.5	4.1	1655.7	746.0	+909.7		

۷- (b) نشان داده شده است. مطابق شکل ۷- (b)، زیرحوضه‌های S₂، S₁₉، S₅ و S₂₃ به ترتیب با ۲/۲۲۰، ۴/۱۵۵، ۲/۱۴۹ و ۲/۱۳۶ میلیون مترمکعب بیشترین میزان تولید آب و بیشترین میزان RWS معادل ۴/۱۳۴، ۷/۱۳۶، ۵/۱۲۶ و ۷/۱۳۶ میلیون مترمکعب را داشتند. این زیرحوضه‌ها بیشترین مساحت را در میان زیرحوضه‌ها داشتند. همچنین زیرحوضه S₂₁ با ۶/۹ میلیون مترمکعب کم‌ترین تولید آب را داشت. در مقابل براساس شکل ۷- (a) زیرحوضه‌های S₉، S₂ و S₁ با ۴/۵۲۶، ۲/۵۲۳ و ۳/۵۱۳ میلی‌متر در پیکسل دارای بیشترین تولید آب نقطه‌ای بودند که بدون اثر مساحت حوضه و بر مبنای پارامترهای اقلیمی محاسبه شده است.

مطابق شکل‌های ۷- (e) و ۸ در زیرحوضه‌های S₁₄، S₁₅، S₄ و S₅ با RWBI کمتر از صفر، عدم تعادل مکانی عرضه و تقاضا و کسری عرضه به تقاضای آب مشاهده شد. زیرحوضه‌های S₁₉، S₂₃، S₂ و S₅ با بیشترین میزان RWBI بالاتر از صفر دارای بیشترین تعادل مکانی عرضه و تقاضا و مازاد تولید آب بودند.

پژوهش حاضر به مدل‌سازی و ارزیابی وضعیت آب‌تولیدی در حوضه آبخیز رودخانه کرخه با شاخص RWBI پرداخته است. براساس نتایج مدل InVEST-AWY در جدول (۵)، در مقابل مصرف سالانه ۷۴۶ میلیون مترمکعب آب در حوضه آبخیز کرخه، ۷/۱۶۵۵ میلیون مترمکعب آب تولید می‌شود. میزان RWS که از اختلاف آب مصرفی از عرضه آب بدست آمده است در سطح کل حوضه آبخیز ۷/۹۰۹ میلیون مترمکعب محاسبه شد که نشان‌دهنده مازاد تولید آب است. میانگین تولید آب در هر هکتار از حوضه برابر با ۱۰۱ هزار مترمکعب بوده است که مصرف آن ۶/۴۵ هزار مترمکعب را نشان می‌دهد. شکل ۷- (a) تولید آب را بر اساس پیکسل با مساحتی برابر ۹۰۰ مترمربع از صفر تا ۵۲۶ میلی‌متر با میانگین تولید ۲/۱۰۱ میلی‌متر نشان می‌دهد. یکی از ویژگی‌های مدل InVEST-AWY تولید نقشه رستری است که تولید آب در هر پیکسل از حوضه را نشان می‌دهد که می‌تواند در کنار تولید آب در هر حوضه، جزئیات بیشتری در برنامه‌ریزی منابع آب را فراهم نماید (Balist et al., 2022). حجم تولید آب بر اساس مترمکعب در سال در ۲۳ زیرحوضه با توجه به مساحت آنها در شکل



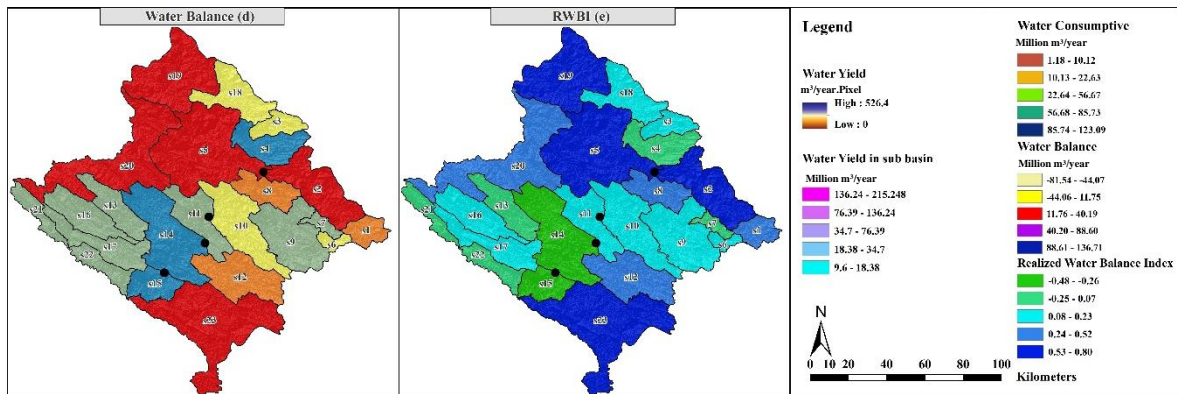


Fig. 7-a) Water supply (mm/pixel), b) Water supply in sub-basins (Mm³/year), c) Water demand (Mm³/year), d) RWS (Mm³/year), e) RWBI

شکل ۷- (a) عرضه آب (میلی متر در پیکسل)، (b) عرضه آب در زیرحوضه (میلیون مترمکعب در سال)، (c) تقاضای آب (میلیون مترمکعب در سال)، (d) RWS (میلیون مترمکعب در سال) و (e) RWBI

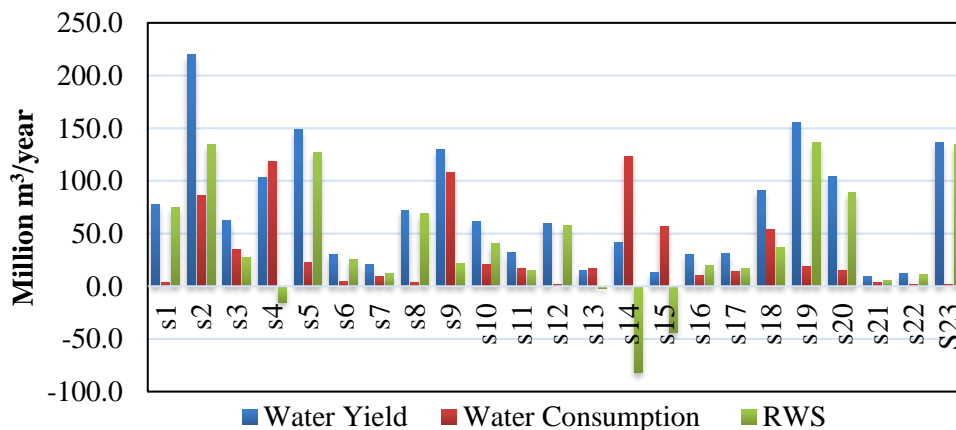


Fig. 8- Water supply, water demand and RWS (Mm³/year) in sub-basins

شکل ۸- میزان عرضه، تقاضا و بازدهی آب (میلیون مترمکعب در سال) در زیرحوضه‌ها

کم‌ترین میزان مصرف بودند. در این راستا مطالعه Wu et al. (2023) در دلتای رودخانه Pearl یک روند نزولی تدریجی در سری زمانی تقاضای آب را نشان داد که حاصل صرفه‌جویی در مصرف آب خانگی و سایر جنبه‌های بهره‌وری مصرف آب بود. توزیع فضایی تقاضای آب در مرکز منطقه مورد مطالعه زیاد و در حاشیه کم است که تقاضا برای آب در منطقه مرکزی به توزیع متراکم جمعیت آن مربوط می‌شود. مصرف آب یک پارامتر حیاتی است که نیاز به برنامه‌ریزی مناسب دارد تا وضعیت تأمین آب مختل و نامتعادل نشود. مصرف آب تابعی از جمعیت و نیاز آبی آن است. با این حال، این روش مستلزم سوابق مختلف مصرف آب است که اغلب اوقات سوابق بر اساس مرز تقسیمات سیاسی است تا حوزه آبخیز. مطابق شکل (۱۰) بیشترین همبستگی مصرف آب با بخش کشاورزی قابل

تبخیر و تعرق و بارش از مؤثرترین مؤلفه‌های بیلان آبی یک حوضه آبخیز در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است که مقایسه بارش، تبخیر و تعرق واقعی و آب تولیدی در شکل (۹) همبستگی آنها را در منطقه مورد مطالعه نشان داد. نتایج مطالعه Wu et al. (2023) در دلتای رودخانه Pearl نیز بر همبستگی عرضه آب و تغییرات بارش در هر سال تأکید داشت.

در شکل ۷- (c) میزان تقاضای آب در هر زیرحوضه برای طبقات کاربری انسان‌ساخت و کشاورزی بر اساس آب مصرفی کشاورزی و حجم فروش آب در نقاط شهری و روستایی تحت پوشش شرکت آب و فاضلاب را نشان می‌دهد. میزان مصرف آب در زیرحوضه S₄، S₁₄ و S₅ شامل شهرهای کوه‌دشت، الشتر و خرم‌آباد با ۱۲۳/۱، ۱۱۸/۷ و ۱۰۸/۱ میلیون مترمکعب بیشترین و زیرحوضه‌های S₂₂ و S₂₃ دارای

نفوذپذیری بالاتری دارند. مناطق شهری با کمترین نرخ نفوذ، بالاترین تراکم حجمی را دارند. بنابراین میزان تولید آب در اراضی کشاورزی و شیب‌های تند می‌تواند بیشتر از اراضی جنگلی و شیب‌های ملایم باشد. پارامتر خاک بر اساس ویژگی‌های آن، نقش اساسی در تولید آب از سطح حوضه دارد. خاک‌ها بسته به عمق و بافت آنها می‌توانند توسط آب نفوذ کنند یا از نفوذ آن جلوگیری کنند. علاوه بر این، آنها می‌توانند نفوذ ریشه‌های گیاه را محدود کنند. این رو استفاده از لایه عمق خاک و آب ذخیره شده در آن برای مدل‌سازی منابع آب ضروری است. عمق تحت تأثیر توپوگرافی و شیب منطقه است. در زیرحوضه‌هایی که کوه‌ها و تپه‌های قابل توجهی هستند. این در حالی است که در زیرحوضه‌هایی که عمق خاک کم است، ارتفاعات و شیب‌های بیشتری وجود دارد (Jafarzadeh et al., 2019).

مشاهده است. با توجه به نتایج، عملکرد مدل InVEST-AWY تحت تأثیر پارامترهای مختلفی از قبیل کاربری و پوشش اراضی، بارش، تبخیر و تعرق و ویژگی‌های خاک قرار دارد (Canqiang et al., 2012; Chen et al., 2020; Valencia., 2023). علاوه بر پارامترهای ذکر شده، مساحت هر زیرحوضه نیز تأثیر گذار است (Balist et al., 2022). از آنجایی که بارش در این منطقه توزیع مشابهی ندارد و از شرق به غرب کاهش می‌یابد، تبخیر و تعرق در نواحی جنوب که خروجی حوضه است بیشتر از سایر مناطق است. با توجه به نتایج به دست آمده، میانگین تولید آب در واحد سطح در مناطق شرقی به دلیل بارندگی زیاد بیشتر است؛ اما با تجمع این آب در سطح حوضه‌ها، جاری شده و به عنوان رواناب محاسبه می‌شود و در حوضه‌های بزرگتر حجم بیشتری دارد. اراضی کشاورزی با شیب‌های تند تراکم حجمی بالاتر و نرخ نفوذ کمتری دارند، در حالیکه دامنه‌های جنگلی با شیب ملایم تراکم حجمی کمتر و

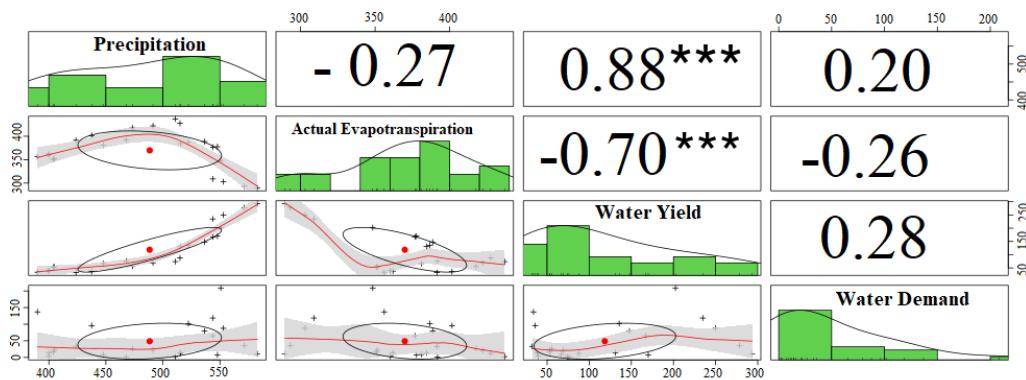
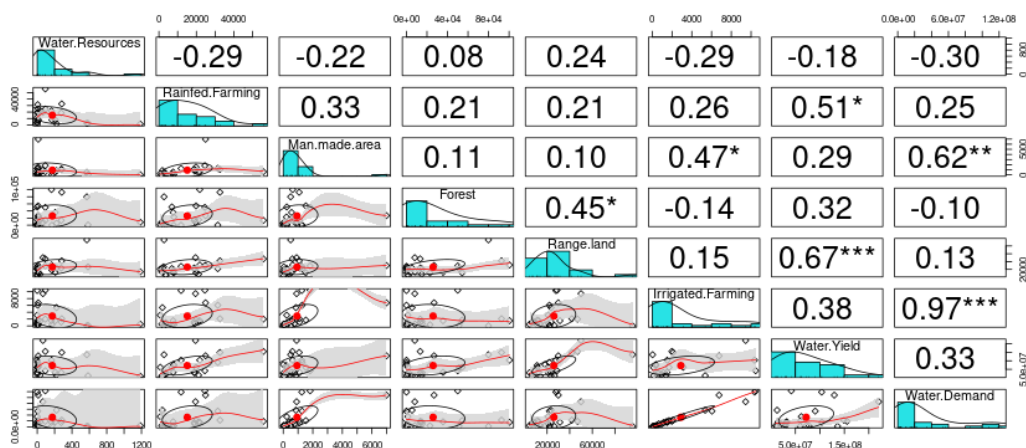


Fig. 9- Correlation between water supply, water demand, precipitation and actual evapotranspiration

شکل ۹- همبستگی میان عرضه و تقاضای آب، بارش و تبخیر واقعی



***, **, * و * به ترتیب در سطح اطمینان ۹۹ درصد، ۹۵ درصد و ۹۰ درصد معنادار است.

Fig. 10- Correlation between water supply, water demand and LULC

شکل ۱۰- همبستگی میان عرضه و تقاضای آب و کاربری و پوشش اراضی

۴- نتیجه‌گیری

پی‌نوشت‌ها

- 1- Ecosystem Services
- 2- Providing
- 3- Regulating
- 4- Cultural
- 5- Supporting
- 6- Water Yield
- 7- Sustainable Development Goals
- 8- Water Scarcity
- 9- Water Supply
- 10- Water Demand
- 11- Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoff
- 12- [http: www.naturalcapitalproject.org.InVEST.html](http://www.naturalcapitalproject.org.InVEST.html)
- 13- Annual Water Yield
- 14- Budyko
- 15- Root Restricting Layer Depth
- 16- Plant Available Water Content
- 17- FAO Penman-Monteith
- 18- isric.org
- 19- Coefficient of Determination
- 20- Nash- Sutcliffe (1970)
- 21- Realized Water Supply
- 22- Realized Water Balance Index

در این پژوهش ارزیابی کمی تعادل مکانی تولید آب با رویکرد عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستمی در حوضه آبخیز کرخه انجام شد. عدم تعادل مکانی عرضه و تقاضای آب در ۱۲/۵ درصد از کل منطقه مشاهده شد، به طوری که سه زیرحوضه با کمبود آب مواجه بوده و تقاضا بیشتر از عرضه است. خروجی حاصل از این پژوهش را می‌توان در شناسایی مناطقی با عرضه بالا و تقاضا کم یا برعکس مناطقی که عرضه کم و تقاضا زیاد است، استفاده نمود و در برنامه‌ریزی‌ها لحاظ کرد. انواع پروژه‌های انتقال آب با هدف تأمین آب شرب، کشاورزی، صنعتی و تولید انرژی در این منطقه باید با ارزیابی تعادل مکانی عرضه و تقاضای آب تولیدی همراه باشد. انتقال آب مانند هر روش دیگری در بعضی از شرایط کاری مناسب و حتی لازم است. این روش وقتی کار نامناسبی محسوب می‌شود که قرار باشد آب از منطقه‌ای که خود به آب نیازمند است به منطقه دیگری انتقال پیدا کند، به خصوص اگر با افراط و زیاده روی همراه باشد. ارزیابی عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستمی در کنار ارزیابی توان اکولوژیک و آمایش سرزمینی می‌تواند مدیریت منابع اکولوژیک و رفاه انسانی را تضمین نماید. در کنار عدم ارزیابی مکانی عرضه و تقاضای آب تولیدی دلایل دیگری مانند خشکسالی، راندمان پایین آب کشاورزی، مصرف سرانه بالا، افزایش جمعیت، گسترش صنایع آب بر و ساخت سدهای متعدد بر روی کرخه که تبخیر آب را افزایش داده است از دیگر دلایلی هستند که مردم را با بحران آب مواجه کرده است. باید دقت داشت که علیرغم عملکرد خوب مدل InVEST-AWY، ساده‌سازی آن از جمله ناتوانی در محاسبه تغییرات درونی سالانه ممکن است بر دقت مقادیر آب تولیدی مدل‌سازی شده تأثیر بگذارد. تأثیرات منفی مسائلی مانند آبیاری، معدن‌کاوی و ساخت نیروگاه آبی در عملکرد مدل InVEST-AWY در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین این مدل قادر نیست آب زیرزمینی و منابع آب برگشتی که ممکن است در تخمین آب تولیدی مهم باشند را محاسبه کند.

۵- تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی به شماره قرارداد ۱/۱۴۰۹-۰۰/۲۶ مورخ ۱۴۰۰/۰۴/۲۶ با نظارت علمی و فنی دفتر اقتصاد و فناوری سازمان حفاظت محیط‌زیست می‌باشد. بدین‌وسیله از زحمات و تلاش‌های دلسوزانه کلیه دست‌اندرکاران سازمان حفاظت محیط‌زیست و دانشگاه لرستان تشکر و قدردانی می‌شود.

- Albiac J, Esteban E, Tapia J, and Rivas E (2013) Water scarcity and droughts in Spain: Impacts and policy measures. *Drought in Arid and Semi-Arid Regions. A Multi-Disciplinary and Cross-Country, Perspective*:323-339
- Arora NK and Mishra I (2022) Sustainable development goal 6: Global water security. *Environmental Sustainability* 5(3):271-275
- Balist J, Malekmohammadi B, Jafari H R, Nohegar A, and Geneletti D (2022) Modeling the supply, demand and stress of water resources using ecosystem services concept in Sirvan River Basin (Kurdistan-Iran). *Water Supply* 22(3):2816-2831
- Basha U, Pandey M, Nayak D, Shukla S, and Shukla AK (2024) Spatial-temporal assessment of annual water yield and impact of land use changes on upper Ganga Basin India Using InVEST Model. *Journal of Hazardous Toxic and Radioactive Waste* 28(2):04024003
- Bond NR, Burrows RM, Kennard MJ, and Bunn SE (2019) Water scarcity as a driver of multiple stressor effects. In *Multiple Stressors in River Ecosystems*:111-129
- Brulebois E, Ubertosi M, Castel T, Richard Y, Sauvage S, Sanchez-Perez JM, Le Moine N, and Amiotte-Suchet P (2018) Robustness and performance of semi-distributed (SWAT) and global (GR4J) hydrological models throughout an observed climatic shift over contrasted French watersheds. *Open Water Journal* 5(1):41-56
- Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, and Müller F (2012) Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators* 21:17-29
- Canqiang Z, Wenhua L, Biao Z, and Moucheng L (2012) Water yield of Xitiaoqi river basin based on InVEST modeling. *Journal of Resources and Ecology* 3(1):50-54
- Céleri R and Feyen J (2009) The hydrology of tropical Andean ecosystems: importance, knowledge status, and perspectives. *Mountain Research and Development* 29(4):350-355
- Chen X, Li F, Li X, Hu Y and Hu P (2020) Evaluating and mapping water supply and demand for sustainable urban ecosystem management in Shenzhen, China. *Journal of Cleaner Production* 251:119754
- Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill RV, Paruelo J, and Raskin RG (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387(6630):253-260
- Crossman ND, Burkhard B, Nedkov S, Willemsen L, Petz K, Palomo I, Drakou EG, Martín-Lopez B, McPhearson T, Boyanova K, and Alkemade R (2013) A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. *Ecosystem Services* 4:4-14
- Daneshi A, Brouwer R, Najafinejad A, Panahi M, Zarandian A, and Maghsood FF (2021) Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST. *Journal of Hydrology* 593:125621
- Decsi B, Ács T, Jolánkai Z, Kardos MK, Koncsos L, Vári Á, and Kozma Z (2022) From simple to complex—comparing four modeling tools for quantifying hydrologic ecosystem services. *Ecological Indicators* 141:109143
- Donohue RJ, Roderick ML, and McVicar TR (2012) Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *Journal of Hydrology* 436:35-50
- EU (2007) Addressing the challenge of water scarcity and droughts in the European Union. Communication from the commission to the European parliament and the council, Eur. Comm, DG Environ, Brussels
- Jafarzadeh AA, Mahdavi A, Fallah Shamsi R, and Yousefpour R (2019) Annual water yield estimation for different land uses by GIS-Based InVEST model (Case study: Mish-khas Catchment, Ilam Province, Iran). *Journal of Rangeland Science* 9(1):1-12 (In Persian)
- Jiang Y, Ouyang B, and Yan Z (2024) Spatial Correlation between the changes in supply and demand for water-related ecosystem services. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 13(3):68
- Joorabian Shooshtari S, Jahanishakib F, and Ardakani T (2023) Calibration and economic evaluation of the water yield ecosystem services in basins by the eastern border of the country. *Iran-Water Resources Research* 19(4):199-213
- Kroll F, Müller F, Haase D, and Fohrer N (2012) Rural–urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics. *Land Use Policy* 29(3):521-535
- Li F, Li Y, Zhou X, Yin Z, Liu T, and Xin Q (2022) Modeling and analyzing supply-demand relationships of water resources in Xinjiang from a perspective of ecosystem services. *Journal of Arid Land* 14(2):115-138

- Maron M, Mitchell MG, Runting RK, Rhodes JR, Mace GM, Keith DA, and Watson JE (2017) Towards a threat assessment framework for ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution* 32(4):240-248
- Martínez-Harms MJ and Balvanera P (2012) Methods for mapping ecosystem service supply: A review. *International journal of biodiversity science, ecosystem services & management* 8(1-2):17-25
- MEA (2005) A report of the millennium ecosystem assessment. *Ecosystems and Human Wellbeing*, Island Press, Washington, DC, USA
- Milly PC, Dunne KA, and Vecchia AV (2005) Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature* 438(7066):347-350
- Ming L, Chang J, Li C, Chen Y, and Li C (2022) Spatial-temporal patterns of ecosystem services supply-demand and influencing factors: A case study of resource-based cities in the Yellow River Basin, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(23):16100
- Ministry of Energy (2004) Basic studies on the potential of medium electric power plants in Dez, Karun and Karkheh watersheds. Karkheh basin basic studies report: Meteorology, volumes 2 to 5 (In Persian)
- Salami H and Taheri E (2019) Assessing the state of water security in provinces of Iran. *Journal of Agricultural Economics and Development* 33(1):75-94 (In Persian)
- Shafizadeh M, Zare Chahouki M A (2020) Modeling ecosystem production services (water production) in Taleghan Middel Watershed. *Iranian Journal of Ecohydrology* 7(2):411-419 (In Persian)
- Sharp R, Tallis HT, Ricketts T, Guerry AD, Wood SA, Chaplin-Kramer R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, and Vigerstol K (2015) InVEST 3.2. 0 user's guide. The Natural Capital Project, 133p
- Tsakiris G and Vangelis HJEW (2005) Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water* 9(10):3-11
- Valencia JB, Guryanov VV, Mesa-Diez J, Tapasco J, and Gusarov AV (2023) Assessing the effectiveness of the use of the InVEST annual water yield model for the rivers of Colombia: A Case Study of the Meta River Basin. *Water* 15(8):1617
- Van Loon AF and Van Lanen H A (2013) Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework. *Water Resources Research* 49(3):1483-1502
- Wang L, Zheng H, Wen Z, Liu L, Robinson, BE, Li R, Li C and Kong L (2019) Ecosystem service synergies/trade-offs informing the supply-demand match of ecosystem services: Framework and application. *Ecosystem Services* 37:100939
- Wu J, Fan X, Li K, and Wu Y (2023) Assessment of ecosystem service flow and optimization of spatial pattern of supply and demand matching in Pearl River Delta, China. *Ecological Indicators* 153:110452
- Yen H, Jeong J, Feng Q, and Deb D (2015) Assessment of input uncertainty in SWAT using latent variables. *Water Resources Management* 29:1137-1153
- Yu J, Yuan Y, Nie Y, Ma E, Li H, and Geng X (2015) The temporal and spatial evolution of water yield in Dali County. *Sustainability* 7(5):6069-6085
- Zaccaria D, Neale CM, and Lamaddalena N (2006) A methodology for conducting diagnostic analyses and operational simulation in large-scale pressurized irrigation systems. In *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology VIII* 6359:227-239
- Zhou W, Liu, G, Pan J, and Feng X (2005) Distribution of available soil water capacity in China. *Journal of Geographical Sciences* 15:3-12