

Research Paper

Estimated renewable water in the Kashkan sub-basin in different time periods

Yadollah Khoman¹, Reza Mohammad pour^{2*}, Heidar Zarei³, Abazar Solgi⁴, Toraj Sabzevari⁵

¹ PhD student in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Estahban Branch, Estahban, Iran. Email: amin.khomman@gmail.com

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Estahban Branch, Estahban, Iran. ORCID: 0000-0002-7940-5101. Email: Re.Mo564@iau.ac.ir

³ Professor, Department of Water Science Engineering, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environment, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. ORCID: 0000-0003-3414-1816. Email: zareih@scu.ac.ir

⁴ PhD in Water Resources Engineering, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environment, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. ORCID: 0000-0003-1230-2332. Email: abazar_solgi@yahoo.com

⁵ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Estahban Branch, Estahban, Iran. ORCID: 0000-0003-3965-1751. Email: t_sabzevari@iauest.ac.ir



10.22125/iwe.2026.584239.1926

Received:

April 30, 2026

Accepted:

August 9, 2026

Available online:

?????

Available online:

September 7, 2026

Keywords:

**Renewable water,
Kashkan sub-basin,
precipitation,
modified Torrent-
White method...**

Abstract

The quantitative sustainability of water resources requires that annual water consumption does not exceed the amount of renewable water. Therefore, planning for sustainable development necessitates an accurate estimation of renewable water resources. In this study, the Kashkan sub-basina sub-basin was investigated to estimate the renewable water resources. Based on the available meteorological stations in the region, monthly temperature and precipitation data were used for the statistical period from the 1997–1998 to 2023–2024 water years, and maps for the sub-basin were generated to extract the mean values of the relevant parameters. Using the Thornthwaite method, with corrections applied for higher temperatures, renewable water resources were calculated for three-time scales: long-term (27 years), short-term (10 years), and the 2023–2024 water year.

The results indicated that the renewable water resources of the Kashkan sub-basin were 2,227.72, 2,458.88 and 1,618.26 million cubic meters in the long-term period, in the short-term period, and in the 2023–2024 water year, respectively. The results also showed a 10.38% increase in renewable water in the short-term period compared to the long-term period. Considering the temperature increase in recent years, a decrease in renewable water during the short-term period relative to the long-term period was expected; however, precipitation during the short-term period increased compared to the long-term period, with certain years such as 2018 and 2019 experiencing higher rainfall than others. The renewable water in the 2023–2024 water year decreased by 34.19% compared to the short-term period and by 27.36% compared to the long-term period.

* Corresponding Author: Reza Mohammad pour

Address: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Estahban Branch, Estahban, Iran.

Email: Re.Mo564@iau.ac.ir

Tel: 09173134112

Keywords: Renewable water, Kashkan sub-basin, precipitation, modified Thornthwaite method.

1. Introduction

play a crucial role in water balance calculations and in the accuracy of hydrological models. In countries like Iran, where total precipitation is low and its temporal and spatial distribution is uneven, addressing the issue of renewable water becomes even more critical. Renewable water is the water renewed over a specific period through the hydrological cycle of a region, including streams, reservoirs, and aquifers recharged by precipitation, runoff, and groundwater. In some cases, transboundary water inflows are also considered part of renewable water. The total renewable water available in a region represents the amount of water accessible for various uses and is usually expressed in cubic kilometers. Therefore, this study focuses on the Kashkan sub-basin (Lorestan Province) of the Karkheh River Basin to estimate renewable water resources across six study areas over different time periods.

2. Methodology

Data from available meteorological stations in the region, including monthly average temperature and precipitation, were used. Spatial maps of these parameters were prepared for the Kashkan sub-basin, and average values were extracted. The statistical period considered was 27 years, from the 1997–1998 to the 2023–2024 water years. Renewable water was estimated using the Thornthwaite method, with modifications applied to account for higher temperatures. Calculations were performed for three-time scales: long-term (27 years), short-term (10 years), and the 2023–2024 water year.

3. Discussion and Conclusion

The long-term renewable water in the Kashkan sub-basin was estimated at 2,227.72 million cubic meters (MCM), while short-term renewable water increased to 2,458.88 MCM. In the 2023–2024 water year, renewable water decreased to 1,618.26 MCM. This represents a 10.38% increase in the short-term period compared to the long-term average. Despite the overall rise in temperature, renewable water in the short-term period increased due to higher precipitation, particularly in certain years such as 2018 and 2019. However, in the 2023–2024 water year, renewable water declined by 34.19% relative to the short-term period and by 27.36% relative to the long-term period. These findings highlight the combined effects of climatic variability, particularly precipitation patterns, on renewable water availability in the region.

4. Results

Estimating renewable water is essential for sustainable water resource management. In the Kashkan sub-basin, short-term fluctuations in precipitation can offset the expected negative impacts of rising temperatures, but significant declines, such as those observed in 2023–2024, underline the vulnerability of water resources to climatic variability. Effective management strategies should consider both long-term trends and short-term anomalies to ensure sustainable water use.

5. The most important references

- 1) Mianabadi, A., S.M. Hasheminia, K. Davary, H. Derakhshan and M. Hrachowitz. 2021. Estimating the Aquifer's Renewable Water to Mitigate the Challenges of Upcoming Megadrought Events. *Water Resources Management*, 35:4927-4942.
- 2) Zahmat kash Gorabzarmakhi, R. 1400. Estimation and investigation of annual renewable water in different time periods using satellite data in Khorasan Razavi Province. Master's thesis, Civil-Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology.
- 3) Shaabani Lakrani, A. 2013. Estimating the renewable water amount of the Sarab Plain aquifer and determining the optimal pattern of the number of exploitation wells. Master's thesis, Tourism Planning-Water Resources, Faculty of Agriculture, University of Tabriz.

- 4) Talebi Hosseinabad, F., M. Shahedi, and S.A. Velayati. 2014. Estimating renewable water using the water balance model under data shortage conditions. *Journal of Geography and Regional Development*, 12 (22): 129-150.
- 5) Alizadeh, A. 2005. *Principles of Applied Hydrology*. Astan Quds Razavi, Imam Reza University (AS), 24th edition, pp.872.

Acknowledgments

The authors sincerely appreciate the Iran Water Resources Management Company for providing the data required for this study.

برآورد آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان در دوره‌های زمانی مختلف

یداله خمان^۱، رضا محمدپور^{۲*}، حیدر زارعی^۳، اباذر سلگی^۴، تورج سبزواری^۵

تاریخ ارسال: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۸

مقاله پژوهشی

چکیده

پایداری کمی منابع آب مستلزم آن است که میزان برداشت سالانه از منابع آب از مقدار آب تجدیدپذیر فراتر نرود؛ از این رو، برآورد دقیق آب تجدیدپذیر یکی از ارکان اصلی برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب به شمار می‌رود. در این پژوهش، آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان در استان لرستان برای سه دوره زمانی شامل دوره بلندمدت (۲۷ ساله)، دوره کوتاه‌مدت (۱۰ ساله) و سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ برآورد شد. برای این منظور، از داده‌های متوسط ماهانه بارش و دمای ایستگاه‌های هواشناسی زیرحوضه طی دوره آماری سال آبی ۱۳۷۷-۱۳۷۶ تا ۱۴۰۳-۱۴۰۲ استفاده شد. پس از تهیه نقشه‌های هم‌بارش و هم‌دما به روش کریجینگ در محیط GIS، مقادیر متوسط بارش و دما استخراج و با استفاده از روش تورنت‌وایت اصلاح‌شده، مقدار آب تجدیدپذیر محاسبه گردید. نتایج نشان داد که مقدار آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان در دوره بلندمدت، دوره کوتاه‌مدت و سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ به ترتیب برابر با ۲۲۲۷/۷۲، ۲۴۵۸/۸۸ و ۱۶۱۸/۲۶ میلیون مترمکعب است. همچنین، آب تجدیدپذیر در دوره کوتاه‌مدت نسبت به دوره بلندمدت ۱۰/۳۸ درصد افزایش یافت، در حالی که در سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ نسبت به دوره کوتاه‌مدت و بلندمدت به ترتیب ۳۴/۱۹ و ۲۷/۳۶ درصد کاهش نشان داد. نتایج نشان داد که تغییرات آب تجدیدپذیر حاصل اثر همزمان بارش و دما است؛ به گونه‌ای که افزایش بارش در دوره کوتاه‌مدت اثر افزایش دما را تا حد زیادی جبران کرده، اما کاهش بارندگی همراه با افزایش دما در سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ موجب کاهش قابل توجه آب تجدیدپذیر شده است. این یافته‌ها بر ضرورت پایش مستمر شرایط اقلیمی برای مدیریت پایدار منابع آب تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: آب تجدیدپذیر، زیرحوضه کشکان، بارش، روش تورنت‌وایت اصلاح شده.

^۱ - دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد استهبان، استهبان، ایران. ایمیل: amin.khomman@gmail.com

^۲ - استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد استهبان، استهبان، ایران. ایمیل: Re.Mo564@iau.ac.ir

^۳ - استاد گروه مهندسی علوم آب، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. ایمیل: zareih@scu.ac.ir

^۴ - دکتری مهندسی منابع آب، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. ایمیل: abazar_solgi@yahoo.com

^۵ - استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد استهبان، استهبان، ایران. ایمیل: Tooraj.sabzevari@gmail.com

*Corresponding Author Email: Re.Mo564@iau.ac.ir



مقدمه

محاسبه مقدار متوسط بارندگی در هر حوضه و برآورد میزان بارش در مناطق فاقد آمار، نقش تعیین کننده‌ای بر محاسبات بیلان آب و دقت محاسبات مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی دارد. از طرفی پایین بودن ریزش‌های جوی و نامناسب بودن پراکنش زمانی و مکانی آن، به خصوص در کشوری مانند ایران، اهمیت پرداختن به مبحث آب تجدیدپذیر را دوچندان نموده است.

توسعه بخش‌های مختلف اقتصادی کشور در دهه‌های اخیر، متکی بر منابع آب غیرتجدیدشونده بوده است. برداشت بی‌رویه از این منابع منجر به کسری مخازن آب زیرزمینی شده که مشکلات ناشی از این وضعیت، روند توسعه فعلی را با مخاطره جدی مواجه کرده است. در برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای برای توسعه پایدار، کاهش مصرف فعلی آب تا رسیدن به تراز تعادل سطح آب زیرزمینی اجتناب‌ناپذیر است. همچنین تخصیص آب به بخش‌های مختلف بایستی بر اساس میزان آب تجدیدشونده سالانه صورت گیرد (شاهدی و طالبی‌حسین‌آباد، ۱۳۹۵).

آب تجدیدپذیر، آبی است که در یک بازه زمانی مشخص از طریق چرخه هیدرولوژیکی تجدید شده و شامل آب‌های سطحی، رواناب‌ها، مخازن و آب‌های زیرزمینی تغذیه شده از نزولات جوی است. در برخی موارد، آب‌های ورودی از کشورهای همسایه نیز بخشی از منابع آب تجدیدپذیر محسوب می‌شوند. در واقع، آب تجدیدپذیر بیانگر کل منابع آب قابل دسترس برای مصارف مختلف بوده و معمولاً به صورت میانگین سالانه و بر حسب کیلومترمکعب بیان می‌شود.

بر اساس اطلاعات سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)، مقدار آب تجدیدپذیر ایران و جهان در سال ۲۰۱۱ به ترتیب برابر با ۱۳۷ و ۵۳۷۸۹ کیلومترمکعب بوده است. همچنین مقدار آب تجدیدپذیر سالانه ایران در سال ۲۰۱۵ توسط وزارت نیرو برابر با ۱۲۰ کیلومترمکعب اعلام شده است.

در حالت کلی، منابع آب کشور را می‌توان به دو دسته تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم نمود. منابع آب تجدیدپذیر، متوسط درازمدت منابع آب سطحی و

زیرزمینی بوده، در حالی که منابع آب تجدیدناپذیر شامل ذخایر عمیق آب هستند که در مقیاس زمانی مورد مطالعه قابلیت تغذیه مجدد نداشته و برداشت از آن‌ها موجب کاهش دائمی ذخایر آب می‌شود.

با افزایش جمعیت، توسعه فعالیت‌های اقتصادی، تغییرات اقلیمی و تداوم خشکسالی‌ها، طی سال‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه برآورد منابع آب تجدیدپذیر، تحلیل بیلان آب، ارزیابی امنیت منابع آب و بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب در سطح جهان انجام شده است.

در مطالعات خارجی، زو و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat روند تغییرات پهنه‌های آب سطحی ایالات متحده را طی سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۶ بررسی کردند. نتایج نشان داد که مناطق غربی آمریکا با کاهش منابع آب سطحی و افزایش تنش آبی روبه‌رو بوده و تغییرات پهنه‌های آب سطحی ارتباط نزدیکی با تغییرات ذخیره آب خشکی و برداشت آب زیرزمینی دارد.

گاسلینگ و آرنل (۲۰۱۶) با بهره‌گیری از ۲۱ مدل گردش عمومی جو و یک مدل هیدرولوژیکی جهانی، اثر تغییر اقلیم بر منابع آب و تنش آبی را در ۱۳۳۹ حوضه آبریز جهان ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که تا سال ۲۰۵۰، بسته به سناریوی اقلیمی، بین ۵۰٪ تا ۱/۳ میلیارد نفر در معرض افزایش کمبود آب قرار خواهند گرفت.

مکون و هوکسترا (۲۰۱۶) نیز با ارزیابی ماهانه تنش آبی در مقیاس جهانی نشان دادند که حدود چهار میلیارد نفر، حداقل یک ماه از سال با کمبود شدید آب مواجه هستند و مدیریت تقاضا، افزایش بهره‌وری مصرف و تخصیص بهینه منابع آب، مهم‌ترین راهکارهای کاهش این بحران محسوب می‌شود.

میان‌آبادی و همکاران (۲۰۲۱) چارچوبی برای برآورد آب تجدیدپذیر آبخوان‌ها با استفاده از شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه وزنی (wsPEI) ارائه کردند. نتایج مطالعه موردی در حوزه آبخیز نیشابور نشان داد که این شاخص می‌تواند ابزار مناسبی برای برآورد حجم آب تجدیدپذیر و مدیریت خشکسالی‌های آینده باشد.

استکپول و همکاران (۲۰۲۳) در یک مقاله مروری بر ضرورت توسعه روش‌های نوین برای پایش همزمان کمیت و کیفیت منابع آب، بهبود برآورد روندها در مناطق فاقد



زیرحوضه‌های کشف‌رود را برآورد کرده و تغییرات آب تجدیدپذیر را در سال‌های تر و خشک مورد بررسی قرار دادند.

شاهدی و طالبی‌حسین‌آباد (۱۳۹۵) در یک یادداشت تحلیلی، ضمن تشریح مفاهیم پایه منابع آب، بر ضرورت تخصیص منابع آب بر اساس میزان آب تجدیدشونده سالانه تأکید کردند.

زحمت‌کش‌گورابزمخی (۱۴۰۰) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزار ENVI، میزان آب تجدیدپذیر سالانه استان خراسان رضوی را محاسبه و با داده‌های زمینی کالیبره نمود.

شعبانی‌لکرانی (۱۴۰۲) میزان آب قابل تجدید آبخوان دشت سراب و الگوی بهینه بهره‌برداری از چاه‌ها را بررسی کرده و نشان داد که کاهش تعداد چاه‌های بهره‌برداری یا کاهش دبی برداشت می‌تواند در حفظ تعادل آبخوان مؤثر باشد.

درخشان و همکاران (۱۴۰۲) در یک مقاله مروری، تحول مفهوم تجدیدپذیری آب زیرزمینی را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که تجدیدپذیری آب زیرزمینی مفهومی پویا و چندبعدی بوده و تعیین صحیح آن، مبنای اصلی تخصیص و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی است. همچنین بر ارتباط میان تجدیدپذیری، تاب‌آوری و ریسک ابرخشکسالی در مدیریت منابع آب زیرزمینی تأکید شد.

مرور مطالعات داخلی و خارجی نشان می‌دهد که اگرچه پژوهش‌های متعددی در زمینه برآورد منابع آب تجدیدپذیر، تحلیل بیلان آب، ارزیابی امنیت منابع آب و بررسی اثرات تغییر اقلیم انجام شده است، اما اغلب مطالعات خارجی بر توسعه مدل‌ها، تحلیل اثرات تغییر اقلیم و ارزیابی تنش آبی در مقیاس حوضه یا منطقه تمرکز داشته‌اند و مطالعات داخلی نیز عمدتاً به برآورد منابع آب تجدیدپذیر در آبخوان‌ها یا حوضه‌های خاص و در یک دوره زمانی مشخص پرداخته‌اند. تاکنون مطالعه‌ای که منابع آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان را با استفاده از روش تورنت‌وایت اصلاح‌شده، بر پایه داده‌های اقلیمی بلندمدت و با مقایسه همزمان سه مقیاس زمانی شامل دوره بلندمدت (۲۷ ساله)، دوره کوتاه‌مدت (۱۰ ساله) و سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در شش محدوده مطالعاتی این زیرحوضه ارزیابی

داده و درک بهتر ارتباط آب‌های سطحی و زیرزمینی به‌منظور مدیریت پایدار منابع آب تأکید کردند.

آمدار و همکاران (۲۰۲۴) با توسعه چارچوب Water Accounting Plus (WA+) و تلفیق آن با مدل PixSWAB، بیلان آب حوضه عمان-زرقاء اردن را برآورد کردند. نتایج نشان داد کاهش بارندگی موجب افت قابل توجه منابع آب قابل دسترس شده و افزایش مصارف انسانی سبب گردیده است که تقاضای آب از عرضه موجود فراتر رود.

دینگ و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل SWAT، اثر تغییرات اقلیمی و تغییر کاربری اراضی را بر امنیت منابع آب در حوضه رودخانه ویهه چین بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که منابع آب آبی بیش از منابع آب سبز تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار داشته و توسعه کشاورزی با بهره‌وری بیشتر در مصرف آب می‌تواند امنیت منابع آب را بهبود بخشد.

دهقانی و همکاران (۲۰۲۴) با تلفیق مدل پویایی سیستم و شبکه بیزی، ریسک کم‌آبی ناشی از تغییر اقلیم را در دشت قزوین ارزیابی کردند. نتایج نشان داد احتمال وقوع کم‌آبی در آینده افزایش یافته و اتخاذ سیاست‌های سازگاری، مدیریت برداشت آب و توسعه اقتصادی نقش مهمی در کاهش این مخاطرات دارد.

کلانتری و همکاران (۲۰۲۵) نیز چارچوبی جامع برای برآورد منابع آب تجدیدپذیر در شرایط تغییر اقلیم ارائه کردند که در آن عواملی نظیر جریان‌های برگشتی، ظرفیت مخازن، ظرفیت ذخیره آبخوان‌ها، رشد جمعیت و عدم قطعیت سناریوهای اقلیمی لحاظ شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات اقلیمی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر میزان منابع آب تجدیدپذیر و نحوه تخصیص آن داشته باشد.

در مطالعات داخلی، شاهدی و طالبی‌حسین‌آباد (۱۳۹۲) چند شاخص کاربردی برای بررسی تعادل منابع آب و پایداری توسعه در حوضه آبریز قره‌قوم ارائه کردند و نشان دادند که نسبت مصرف به آب تجدیدپذیر بیانگر عدم تعادل در بیلان منابع آب این حوضه است.

طالبی‌حسین‌آباد و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از مدل بیلان آب در شرایط کمبود داده، منابع آب تجدیدپذیر



زیرحوضه کشکان در حوضه آبریز کرخه و کشور ایران نمایش داده شده است. همچنین در این شکل موقعیت و پراکنش ایستگاه‌های بارانسنجی، آبسنجی و هواشناسی موجود در منطقه قابل مشاهده است.

این زیرحوضه در استان لرستان و در شهرستان‌های خرم‌آباد، سلسله (الشتر)، کوهدشت و پلدختر قرار دارد. این زیرحوضه از شش محدوده مطالعاتی با نام‌های چغلوندی (۲۲۱۱)، الشتر (۲۲۱۰)، شیراوند (۲۲۰۹)، خرم‌آباد (۲۲۰۸)، کوهدشت (۲۲۰۷) و پل دختر (۲۲۰۶) تشکیل شده است. مساحت این زیرحوضه ۹۵۱۰/۴۳ کیلومتر مربع می‌باشد. حداقل ارتفاع زیرحوضه ۵۲۹ متر از سطح دریا و حداکثر ارتفاع آن ۳۶۲۶ متر از سطح دریا می‌باشد. مشخصات ایستگاه‌های استفاده شده در جدول (۱) ارائه شده است.

کرده باشد، مشاهده نشد. از این رو، نوآوری پژوهش حاضر در تلفیق تحلیل مکانی با استفاده از GIS، به کارگیری روش تورنتولیت اصلاح شده و مقایسه تغییرات آب تجدیدپذیر در سه مقیاس زمانی به منظور ارائه تصویری جامع از تغییرات زمانی و مکانی منابع آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان است. این اطلاعات می‌تواند مبنای مناسب‌تری برای برنامه‌ریزی، تخصیص و مدیریت پایدار منابع آب در منطقه فراهم کند.

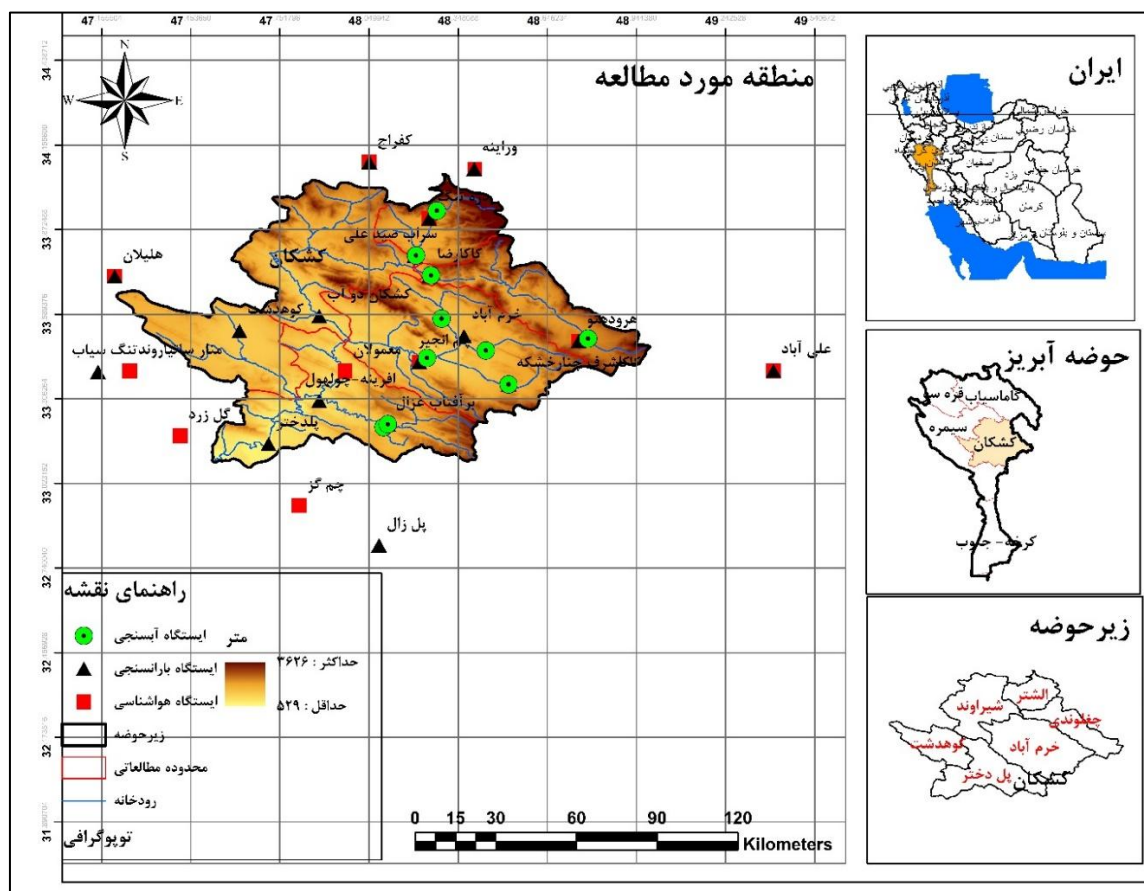
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

زیرحوضه کشکان یکی از زیرحوضه‌های اصلی حوضه آبریز کرخه به شمار می‌رود. این زیرحوضه در موقعیت جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۹ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. در شکل (۱) موقعیت

جدول (۱): مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده

نام ایستگاه	متغیر	کد ایستگاه	طول جغرافیایی (متر)	عرض جغرافیایی (متر)	ارتفاع از سطح دریا (متر)	زون
کفراج (نورآباد)	بارش و دما	۲۱-۱۳۸	۲۲۸۷۶۷	۳۷۷۶۹۹۳	۱۸۳۰	۳۹
هلیلان	بارش و دما	۲۱-۱۴۷	۷۰۶۳۳۷	۳۷۳۴۸۱۵	۱۰۰۰	۳۸
تنگ سیاب	بارش	۲۱-۱۶۳	۷۰۴۹۹۶	۳۶۹۶۳۲۴	۸۸۰	۳۸
هرودهنو	بارش و دما	۲۱-۱۶۷	۲۹۴۲۵۳	۳۷۱۰۷۹۵	۱۸۰۰	۳۹
کاکارضا	بارش	۲۱-۱۶۹	۲۴۵۳۲۵	۳۷۳۴۳۱۸	۱۵۵۰	۳۹
منار ساتیاروند	دما	۲۱-۱۷۰	۷۰۹۲۱۸	۳۶۹۹۵۲۸	۹۶۸	۳۸
سراب صید علی	بارش	۲۱-۱۷۱	۲۴۰۹۹۶	۳۷۴۱۸۹۷	۱۵۳۰	۳۹
کشکان دو آب	بارش	۲۱-۱۷۳	۷۶۷۶۰۷	۳۷۱۹۶۸۵	۹۶۰	۳۸
چم انجیر	بارش و دما	۲۱-۱۷۵	۲۴۴۲۴۹	۳۷۰۳۵۴۵	۱۱۴۰	۳۹
افرینه-چولهول	بارش	۲۱-۱۷۹	۷۶۸۴۷۹	۳۶۸۸۲۵۷	۸۰۰	۳۸
پلدختر	بارش	۲۱-۱۸۳	۷۵۳۱۱۴	۳۶۷۱۷۸۱	۷۰۰	۳۸
خرم آباد	بارش	۲۱-۱۸۴	۲۵۵۴۹۱	۳۷۱۱۶۰۸	۱۲۸۰	۳۹
چم گز	دما	۲۱-۱۸۷	۷۶۳۳۱۳	۳۶۴۹۲۶۶	۳۸	۳۸
پل زال	بارش	۲۱-۱۸۹	۲۲۶۹۲۶	۳۶۳۴۷۳۲	۳۰۰	۳۹
گل زرد	دما	۲۱-۲۲۰	۷۲۵۴۹۵	۳۶۷۴۲۴۸	۶۸۰	۳۸
علی آباد	بارش و دما	۲۱-۳۴۲	۳۵۱۴۶۴	۳۶۹۶۸۰۳	۱۸۳۰	۳۹
برآفتاب غزال	بارش	۲۱-۳۴۶	۲۳۰۹۲۰	۳۶۷۹۶۳۹	۱۱۹۷	۳۹
معمولان	دما	۲۱-۴۵۴	۷۷۶۲۳۶	۳۶۹۹۵۷۶	۹۵۰	۳۸
وراینه	بارش و دما	۲۱-۵۳۴	۲۶۰۲۵۹	۳۷۷۳۶۴۲	۲۰۵۰	۳۹
کوه‌دشت	بارش	۲۱-۸۶۶	۷۴۲۹۹۰	۳۷۱۳۴۸۱	۱۱۹۴	۳۸
دره تنگ	بارش و دما	۲۱-۹۵۴	۲۴۷۹۰۷	۳۷۵۷۸۳۷	۱۷۲۰	۳۹
کاکاشرف چنار خشکه	بارش	۲۱-۹۶۶	۲۶۸۹۴۸	۳۶۹۳۳۹۷	۱۴۵۰	۳۹



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های بارانسنجی و هواشناسی استفاده شده در منطقه

برآورد آب تجدیدپذیر

منابع آب تجدیدپذیر را می‌توان از سه دیدگاه مختلف تعریف کرد که عملاً هر سه تعریف از لحاظ مفهومی یکسان

دیدگاه اول تبخیر و تعرق واقعی - بارش = منابع آب تجدیدپذیر
دیدگاه دوم رواناب + نفوذ = منابع آب تجدیدپذیر

بیان هیدروکلیماتولوژی (دیدگاه اول و دوم)

بیان هیدروکلیماتولوژی، نوع خاصی از بیان است که در آن عوامل مختلف ورودی، خروجی و تغییرات ذخیره سطحی برای یک محدوده مورد بررسی قرار می‌گیرند. مؤلفه‌های بیان هیدروکلیماتولوژی شامل بارندگی، تبخیر و تعرق واقعی از بارندگی، رواناب و نفوذ می‌باشد. معادله بیان هیدروکلیماتولوژی به قرار زیر می‌باشد:

$$P = E + (R + I) \quad (1)$$

هستند اما می‌توانند پایه و مبنای سه روش محاسباتی مختلف قرار گیرند. این سه تعریف کاربردی به شرح زیر هستند:

دیدگاه سوم رواناب مشاهده‌ای + تغییرات ذخیره آب + برداشت خالص آب = منابع آب تجدیدپذیر

P = بارندگی برحسب میلیمتر

E = تبخیر و تعرق واقعی از بارندگی برحسب میلیمتر

R = رواناب ناشی از بارندگی برحسب میلیمتر

I = نفوذ از بارندگی برحسب میلیمتر

مقدار $(R + I)$ مربوط به بارندگی مفید یا آب تجدیدپذیر می‌باشد.

دستیابی به برقراری بیان آب مستلزم اندازه‌گیری مستقیم، محاسبه بوسیله معادلات، استفاده از نتایج تجربی و در برخی مواقع تخمین مولفه‌های مختلف بیان می‌باشد.

بارندگی بیشتر از تبخیر پتانسیل باشد، بارندگی مازاد پس از کسر آب مورد نیاز رطوبت خاک، بارندگی مفید نامیده می‌شود که خود شامل رواناب و نفوذ بوده که با تفکیک رواناب اندازه‌گیری شده، مقدار نفوذ به دست می‌آید. در روش تورنت‌وایت، برای برقراری تعادل بین بارندگی و تبخیر و تعرق، مقدار مشخصی از آب برای تأمین رطوبت خاک و جذب ریشه گیاهان در نظر گرفته می‌شود. با این حال، استفاده از یک مقدار ثابت برای این پارامتر در تمامی مناطق، به دلیل تفاوت‌های اقلیمی، پوشش گیاهی و ویژگی‌های فیزیکی خاک، می‌تواند موجب افزایش خطای برآورد منابع آب تجدیدپذیر شود. از این رو، در این پژوهش به منظور افزایش دقت روش تورنت‌وایت، ضریب رطوبتی به عنوان یک پارامتر وابسته به بارش سالانه معرفی شد. بر این اساس، مقدار آب مورد نیاز برای تأمین رطوبت خاک به صورت متغیر و متناسب با شرایط بارندگی هر منطقه تعیین می‌شود. برای این منظور، نویسندگان این پژوهش جدول (۲) را به عنوان بخشی از روش اصلاح شده تورنت‌وایت پیشنهاد کرده‌اند. در این جدول، ضریب رطوبتی در ۹ طبقه بر اساس بارش سالانه تعریف شده و سپس با استفاده از درونیابی مقادیر جدول (۳)، ضریب رطوبتی متناظر هر منطقه محاسبه می‌شود. جدول (۲) و مقادیر ارائه شده در آن، بخشی از اصلاحات و نوآوری‌های روش پیشنهادی این پژوهش در توسعه روش تورنت‌وایت بوده و بر اساس تحلیل‌های انجام شده در این مطالعه تدوین شده‌اند و از منبع دیگری اقتباس نشده‌اند.

جدول (۲): طبقات ضریب رطوبتی.

طبقه	بارش (میلیمتر)	ضریب رطوبتی
۱	۰-۲۰۰	۴۰-۶۰
۲	۲۰۰-۴۰۰	۶۰-۸۰
۳	۴۰۰-۶۰۰	۸۰-۱۰۰
۴	۶۰۰-۸۰۰	۱۰۰-۱۲۰
۵	۸۰۰-۱۰۰۰	۱۲۰-۱۴۰
۶	۱۰۰۰-۱۲۰۰	۱۴۰-۱۶۰
۷	۱۲۰۰-۱۴۰۰	۱۶۰-۱۸۰
۸	۱۴۰۰-۱۶۰۰	۱۸۰-۲۰۰
۹	>۱۶۰۰	۲۰۰

برای برقراری بیلان هیدروکلیماتولوژی، روش‌های تجربی متعددی ارائه شده است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به روش تورنت‌وایت (Thornthwaite, 1948) اشاره کرد. انتخاب هر یک از این روش‌ها به هدف پژوهش، مقیاس مطالعه و نوع داده‌های در دسترس بستگی دارد. در پژوهش حاضر، با توجه به در دسترس بودن داده‌های بلندمدت بارش و دما و محدودیت اطلاعات مربوط به سایر مؤلفه‌های بیلان آب، روش تورنت‌وایت به عنوان مبنای محاسبات انتخاب شد. با این حال، به منظور کاهش خطاهای ناشی از برخی فرضیات روش کلاسیک تورنت‌وایت، اصلاحاتی در این روش اعمال گردید. این اصلاحات شامل توسعه روابط مربوط به برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل برای دماهای بالاتر از محدوده روش اصلی و همچنین اصلاح نحوه تعیین حداکثر ذخیره رطوبتی خاک با معرفی ضریب رطوبتی وابسته به بارش سالانه است. بنابراین، محاسبات این پژوهش بر اساس نسخه اصلاح شده روش تورنت‌وایت انجام شده است. هرچند این روش نسبت به نسخه کلاسیک از دقت بیشتری برخوردار است، اما همچنان مبتنی بر روابط تجربی بوده و برخی فرآیندهای هیدرولوژیکی نظیر جریان پایه، تبادلات آب زیرزمینی، تغییرات کاربری اراضی و مداخلات انسانی را به صورت مستقیم شبیه‌سازی نمی‌کند؛ بنابراین نتایج باید در چارچوب فرضیات این روش تفسیر شوند.

روش تورنت‌وایت

روش تورنت‌وایت مقایسه بین بارندگی و تبخیر با در نظر گرفتن آب مورد نیاز برای تأمین رطوبت خاک می‌باشد. این بررسی را می‌توان با آمار مجموعه ایستگاه‌های هواشناسی یک حوضه یا هر ایستگاه به صورت مجزا انجام داده و نتیجه را به کل حوضه تعمیم داد. تجزیه و تحلیل می‌تواند برای یک سال خاص یا متوسط طولانی مدت چندین ساله باشد. در این روش که به صورت جدول تهیه می‌گردد، بارندگی و تبخیر پتانسیل ماهانه مقایسه می‌شوند. در صورتی که بارندگی از تبخیر پتانسیل کمتر باشد، کلیه بارندگی، تبخیر واقعی محسوب می‌شود. در صورتی که

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{t_i}{5}\right)^{1.514} = \sum_{i=1}^{12} N_i \quad (3)$$

$$N_i = \left(\frac{t_i}{5}\right)^{1.514} \quad (4)$$

$$a = (0.675 I^3 - 77.1 I^2 + 17920 I + 492390) \times 10^{-6} \quad (5)$$

در روابط فوق، ET_{Pi} تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه، I شاخص حرارتی سالانه که از مجموع شاخص‌های حرارتی ماهانه بدست می‌آید، N_i شاخص حرارتی ماهانه است که بر اساس درجه حرارت متوسط ماهانه و بر اساس جدول مربوطه بدست می‌آید. مقدار a ، ضریبی است که از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت بوده و به شاخص حرارتی سالانه بستگی داشته و از رابطه (۵) بدست می‌آید. این رابطه در مواقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد که درجه حرارت متوسط ماهانه بین صفر و $26/5$ درجه سانتی‌گراد باشد. برای درجه حرارت‌های صفر و زیر صفر، تبخیر و تعرق صفر در نظر گرفته شده و شاخص حرارتی آن نیز صفر است. برای درجه حرارت‌های بیشتر از $26/5$ درجه سانتی‌گراد، تا 37 درجه سانتی‌گراد، تبخیر و تعرق پتانسیل مستقل از شاخص حرارتی سالانه (I) بوده و بر اساس درجه حرارت متوسط ماهانه از جدول (۴) تعیین می‌شود (Thornthwaite and Mather, 1957).

جدول (۴): تبخیر و تعرق پتانسیل برای دمای بیشتر از $26/5$ درجه سانتی‌گراد تا دمای 37 درجه سانتی‌گراد

تبخیر و تعرق پتانسیل	درجه حرارت به سانتی‌گراد
۱۳۹	۲۷
۱۴۷	۲۸
۱۵۵	۲۹
۱۶۲	۳۰
۱۶۸	۳۱
۱۷۳	۳۲
۱۷۷	۳۳
۱۸۰	۳۴
۱۸۳	۳۵
۱۸۴	۳۶
۱۸۵	۳۷

همچنین با توجه به بازه هر طبقه می‌توان جدول (۲) را به صورت جدول (۳) نیز نوشت. طبق جدول (۳) مقدار ضریب رطوبتی به ۱۰ طبقه تقسیم می‌شود. با توجه به مقدار بارش برای هر منطقه، می‌توان با درونیابی مقادیر بارش جدول (۳)، مقدار ضریب رطوبتی را بدست آورد.

جدول (۳): طبقات ضریب رطوبتی.

طبقه	بارش (میلیمتر)	ضریب رطوبتی
۱	۰	۴۰
۲	۲۰۰	۶۰
۳	۴۰۰	۸۰
۴	۶۰۰	۱۰۰
۵	۸۰۰	۱۲۰
۶	۱۰۰۰	۱۴۰
۷	۱۲۰۰	۱۶۰
۸	۱۴۰۰	۱۸۰
۹	۱۶۰۰	۲۰۰
۱۰	>۱۶۰۰	۲۰۰

مقدار پتانسیل آب تجدیدپذیر برابر است با تفاوت بین بارش و تبخیر:

پتانسیل منابع آب تجدیدپذیر = حجم تبخیر - حجم بارش
برای اجرای روش تورنت‌وایت به صورت زیر عمل می‌شود:

الف-اطلاعات مورد نیاز:

در این مرحله از داده‌های دما و بارندگی و آمار ایستگاه هیدرومتری استفاده می‌شود، در این روش برای حداکثر مقدار ذخیره رطوبتی خاک با توجه به شرایط منطقه مقداری انتخاب می‌شود. به عنوان پیشنهاد، می‌توان از جدول (۳) برای محاسبه مقدار ضریب رطوبتی استفاده نمود.

ب-محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل

جهت محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل از روابط زیر استفاده می‌شود (Thornthwaite, 1948):

$$ET_{Pi} = 16 \left(\frac{10t_i}{I} \right)^a \quad (2)$$

در عرض‌های جغرافیایی مختلف سال بوده و براساس جدول (۶) بدست می‌آید، N ، تعداد روزهای ماه مورد نظر می‌باشد. در ادامه، فرض بر این است که مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل که با ET_{pi} نشان داده می‌شود همان مقدار تصحیح شده برای هر ماه باشد.

جدول (۵): تبخیر و تعرق پتانسیل برای دمای بیشتر از ۳۷ درجه سانتیگراد تا دمای ۵۰ درجه سانتیگراد

تبخیر و تعرق پتانسیل	دمای ۵۰ درجه سانتیگراد	تبخیر و تعرق پتانسیل	دمای ۳۷ درجه سانتیگراد
۱۸۷	۳۹	۱۳۹	۲۷
۱۸۸	۴۰	۱۴۷	۲۸
۱۸۹	۴۱	۱۵۵	۲۹
۱۹۰	۴۲	۱۶۲	۳۰
۱۹۱	۴۳	۱۶۸	۳۱
۱۹۲	۴۴	۱۷۳	۳۲
۱۹۳	۴۵	۱۷۷	۳۳
۱۹۴	۴۶	۱۸۰	۳۴
۱۹۵	۴۷	۱۸۳	۳۵
۱۹۶	۴۸	۱۸۴	۳۶
۱۹۷	۴۹	۱۸۵	۳۷
۱۹۷	۵۰	۱۸۶	۳۸

زمانی که دما بیشتر از ۳۷ درجه سانتیگراد باشد پیشنهاد می‌شود که با توجه به روند مقادیر پایانی جدول (۴)، همان روند اعمال شده و تا دمای ۵۰ درجه، مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شود. زمانی که دما بیشتر از ۵۰ درجه سانتیگراد باشد، همان مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل دمای ۵۰ درجه در نظر گرفته می‌شود. این موارد در جدول (۵) ارائه شده است. همچنین زمانی که دما کمتر از صفر باشد، تبخیر و تعرق پتانسیل صفر در نظر گرفته می‌شود.

روابط فوق تبخیر و تعرق پتانسیل را بر اساس هر ماه ۳۰ روز و هر روز ۱۲ ساعت روشنایی بدست می‌دهد، در حالتی که تعداد روزهای هر ماه و تعداد ساعات روشنایی در ماه‌های مختلف سال متفاوت باشد، لازم است که تبخیر و تعرق محاسبه طبق رابطه زیر اصلاح گردد.

$$ET_{pc} = ET_{pi} \left(\frac{D \cdot N}{360} \right) \quad (۶)$$

در این رابطه ET_{pc} ، تبخیر و تعرق پتانسیل اصلاح شده به میلی‌متر، ET_{pi} تبخیر و تعرق محاسبه شده از رابطه (۲) به میلی‌متر، D ، متوسط ماهانه حداکثر ساعات آفتابی ممکن

جدول (۶): متوسط ماهانه حداکثر ساعات آفتابی ممکن

عرض جغرافیایی	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۵۰	۱۱/۳۱	۹/۵۵	۸/۳۷	۸/۳۷	۹/۵۱	۱۱/۲۱	۱۳/۰۹	۱۴/۸۸	۱۶/۰۱	۱۶/۰۲	۱۴/۹۱	۱۳/۲۲
۴۸	۱۱/۳۵	۹/۷۳	۸/۵۷	۸/۶۳	۹/۶۹	۱۱/۲۵	۱۲/۹۶	۱۴/۶۸	۱۵/۷۴	۱۵/۷۲	۱۴/۶۸	۱۳/۹۰
۴۶	۱۱/۳۵	۹/۸۷	۸/۹۱	۸/۹۷	۹/۹۲	۱۱/۳۸	۱۲/۹۳	۱۴/۴۵	۱۵/۴۴	۱۵/۴۹	۱۴/۵۵	۱۳/۰۶
۴۴	۱۱/۴۳	۱۰/۰۵	۹/۱۱	۹/۱۷	۱۰/۰۶	۱۱/۴۲	۱۲/۸۷	۱۴/۲۸	۱۵/۱۷	۱۵/۲۶	۱۴/۳۵	۱۳/۰۱
۴۲	۱۱/۵۰	۱۰/۱۵	۹/۲۹	۹/۳۰	۱۰/۱۶	۱۱/۴۵	۱۲/۸۷	۱۴/۲۱	۱۵/۰۱	۱۴/۹۹	۱۴/۱۹	۱۲/۹۸
۴۰	۱۱/۵۵	۱۰/۳۲	۹/۴۹	۹/۵۰	۱۰/۳۰	۱۱/۴۹	۱۲/۸۰	۱۴/۰۵	۱۴/۸۱	۱۴/۷۹	۱۳/۹۹	۱۲/۸۵
۳۵	۱۱/۵۹	۱۰/۵۷	۹/۹۳	۱۰/۰۰	۱۰/۶۷	۱۱/۵۹	۱۲/۶۷	۱۳/۷۱	۱۴/۳۴	۱۴/۳۶	۱۳/۷۳	۱۲/۷۲
۳۰	۱۱/۷۴	۱۰/۸۴	۱۰/۳۱	۱۰/۳۳	۱۰/۸۴	۱۱/۶۹	۱۲/۵۸	۱۳/۳۷	۱۳/۸۷	۱۳/۹۳	۱۳/۴۰	۱۲/۶۳
۲۵	۱۱/۷۹	۱۱/۰۹	۱۰/۶۸	۱۰/۶۷	۱۱/۰۸	۱۱/۷۶	۱۲/۴۵	۱۳/۱۱	۱۳/۵۷	۱۳/۵۶	۱۳/۱۵	۱۲/۰۵
۲۰	۱۱/۸۶	۱۱/۳۳	۱۰/۹۸	۱۰/۹۷	۱۱/۳۲	۱۱/۸۳	۱۲/۳۹	۱۲/۹۴	۱۳/۲۴	۱۳/۲۳	۱۲/۹۲	۱۲/۴۵
۱۵	۱۱/۹۱	۱۱/۵۱	۱۱/۲۵	۱۱/۲۷	۱۱/۴۹	۱۱/۸۶	۱۲/۳۲	۱۲/۷۰	۱۲/۹۴	۱۲/۹۳	۱۲/۶۹	۱۲/۳۲
۱۰	۱۱/۸۸	۱۱/۶۵	۱۱/۵۳	۱۱/۵۷	۱۱/۷۳	۱۱/۹۳	۱۲/۱۹	۱۲/۵۰	۱۲/۶۷	۱۲/۶۳	۱۲/۴۶	۱۲/۱۹
۵	۱۲/۰۳	۱۱/۹۳	۱۱/۸۳	۱۱/۸۰	۱۱/۸۶	۱۱/۹۷	۱۲/۱۳	۱۲/۲۷	۱۲/۳۷	۱۲/۳۳	۱۲/۳۰	۱۲/۱۶
۰	۱۲/۱۰	۱۲/۱۰	۱۲/۱۰	۱۲/۱۰	۱۲/۱۰	۱۲/۱۰	۱۲/۱۰	۱۲/۱۰	۱۲/۱۰	۱۲/۱۰	۱۲/۱۰	۱۲/۱۰

$$\text{then } ET_{ri} = P_i + m_{i-1}$$

د-محاسبه ذخیره رطوبتی خاک (m_i)

همان طوری که قبلاً اشاره شد حداکثر ذخیره رطوبتی برای مناطق مختلف، متفاوت است، این مقدار به عنوان پیشنهاد با توجه به شرایط منطقه، براساس جدول (۳) انتخاب می‌شود، حداکثر ذخیره رطوبتی خاک با نماد m_{max} نشان داده می‌شود. برای محاسبه ذخیره رطوبتی ۳ حالت پیش می‌آید:

ابتدا مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل را از مجموع بارندگی ماه جاری و رطوبت ماه قبل، کسر نموده و آنرا با نماد m_{ai} معرفی نمایید.

$$P_i + m_{i-1} - ET_{pi} = m_{ai} \quad (9)$$

حالت اول: اگر m_{ai} بیشتر از m_{max} باشد، ذخیره رطوبتی ماه جاری برابر حداکثر ذخیره رطوبتی (m_{max}) می‌باشد، یعنی

$$\text{if } m_{ai} > m_{max} \quad \text{then } m_i = m_{max} \quad (10)$$

ج-بدست آوردن تبخیر و تعرق واقعی

در این مرحله دو حالت پیش می‌آید.

حالت اول: اگر مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل ماه جاری از مجموع بارندگی ماه جاری و رطوبت ماه قبل، بیشتر باشد، تبخیر و تعرق واقعی برابر تبخیر و تعرق پتانسیل می‌باشد، یعنی

$$\text{if } P_i + m_{i-1} < ET_{pi} \quad \text{then } ET_{ri} = ET_{pi} \quad (7)$$

در رابطه فوق، P_i بارندگی ماهانه برحسب میلی‌متر، m_{i-1} ذخیره رطوبتی ماه قبل برحسب میلی‌متر، ET_{pi} تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه برحسب میلی‌متر، ET_{ri} تبخیر و تعرق واقعی ماهانه برحسب میلی‌متر می‌باشد. در صورتی که مقداری برای رطوبت ماه قبل وجود نداشته باشد، مقدار آن صفر در نظر گرفته می‌شود.

حالت دوم: اگر مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل ماه جاری از مجموع بارندگی ماه جاری و رطوبت ماه قبل، کمتر باشد، تبخیر و تعرق واقعی برابر مجموع بارندگی ماه جاری و ذخیره رطوبتی ماه قبل می‌باشد، یعنی

$$\text{if } P_i + m_{i-1} > ET_{pi} \quad (8)$$

$$P_i + m_{i-1} - ET_{ri} = m_{bi} \quad (14)$$

برای محاسبه بارندگی مازاد دو حالت پیش خواهد آمد:
حالت اول: اگر تفاوت m_{bi} و m_{max} بزرگتر از صفر باشد،
بارندگی مازاد ماه جاری برابر $m_{bi} - m_{max}$ می‌باشد، یعنی

$$\text{if } m_{bi} - m_{max} > 0 \text{ then } P_{ei} = m_{bi} - m_{max} \quad (15)$$

حالت دوم: اگر تفاوت m_{bi} و m_{max} کمتر از صفر باشد،
بارندگی مازاد ماه جاری برابر صفر می‌باشد، یعنی

$$\text{if } m_{bi} - m_{max} < 0 \text{ then } P_{ei} = 0 \quad (16)$$

با محاسبه باران مازاد، با توجه به مقدار رواناب، مقدار نفوذ
از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

بیان منابع و مصارف (دیدگاه سوم)

این روش شامل دو بخش اصلی آب تجدیدپذیر سطحی
و آب تجدیدپذیر زیرزمینی می‌باشد. هر یک از این بخش‌ها
مطابق جدول (۷) بدست می‌آید. در صورتی که در جدول
(۷) مؤلفه‌های مربوط به آب سطحی یا آب زیرزمینی وارد
شوند، آب تجدیدپذیر سطحی یا زیرزمینی محاسبه می‌شود
و در صورتی که برای هر مؤلفه مجموع آب سطحی و
زیرزمینی وارد شود، آب تجدیدپذیر کلی بدست می‌آید.

حوض	حوض	حوض	حوض	حوض	حوض	حوض	حوض
ه	ه	ه	ه	ه	ه	ه	ه

شده در اغلب ایستگاه‌های هیدرومتری دارای رژیم طبیعی
نبوده و متأثر از برداشت آب است. از آنجا که استفاده از
داده‌های تاریخی گذشته از فرضیات حاکم بر شبیه‌سازی
سیستم‌های منابع آب است، طبیعی‌سازی رژیم آبدی
رودخانه‌ها امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. در غیر این
صورت، امکان پیاده‌سازی صحیح اجزاء بیان منابع و
مصارف در مطالعات برنامه‌ریزی منابع آب میسر نخواهد شد.

حالت دوم: اگر m_{ai} کمتر از m_{max} ولی بیشتر از صفر باشد،
ذخیره رطوبتی ماه جاری برابر m_{ai} می‌باشد، یعنی

$$\text{if } 0 < m_{ai} < m_{max} \text{ then } m_i = m_{ai} \quad (11)$$

حالت سوم: اگر m_{ai} کمتر از صفر باشد، ذخیره رطوبتی
ماه جاری برابر صفر می‌باشد، یعنی

$$\text{if } m_{ai} < 0 \text{ then } m_i = 0 \quad (12)$$

و- محاسبه بارندگی مفید (R+I)

بارندگی مازاد یا بارندگی مفید، تفاوت بارندگی از تبخیر
می‌باشد یا به عبارتی مجموع رواناب و نفوذ است، که با نماد
 P_{ei} نشان داده می‌شود.

$$P_{ei} = R_i + I_i \quad (13)$$

در رابطه فوق، P_{ei} بارندگی مفید ماهانه برحسب میلی
متر، R_i رواناب ماهانه برحسب میلی‌متر که از آمار بدست
خواهد آمد، I_i نفوذ ماهانه برحسب میلی‌متر می‌باشد.
به‌منظور محاسبه رطوبت باقی‌مانده خاک، مقدار تبخیر
و تعرق واقعی از مجموع بارندگی ماه جاری و ذخیره رطوبت
ماه قبل کسر شده و مقدار حاصل با نماد m_{bi} نمایش داده
می‌شود.

جدول (۷): رابطه محاسبه آب تجدیدپذیر در روش بیان

منابع و مصارف

انتق	انتق	تغییر	مصارف	خروج	آب
ال به	ال به	ت	ف +	ی از	تجدیدپذیر
داخل	خارج	خالص	ی به	حوضه	

آب تجدیدپذیر سطحی

جهت به دست آوردن آب تجدیدپذیر سطحی یا به
عبارتی آبدی طبیعی نیاز است که ابتدا آمار مشاهده‌ای
ایستگاه‌های هیدرومتری و مصارف خالص آب سطحی
حوضه محاسبه شود. با توجه به توسعه اراضی کشاورزی و
سایر مصارف از منابع آب سطحی و زیرزمینی طی سال‌های
اخیر و اثرات آن بر آبدی حوضه‌های آبریز، جریان ثبت



زیرحوضه کشکان در طی دوره آماری ۲۷ ساله (۱۴۰۳-۱۳۷۶) برابر ۵۰۲/۷۳ میلیمتر می‌باشد.

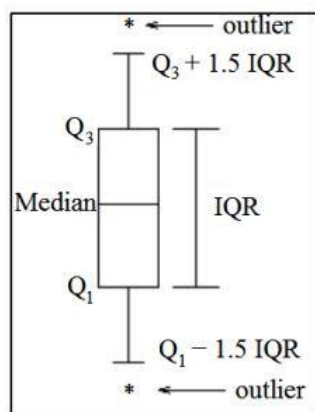
برای بررسی داده‌های دما و تطویل آنها از روش تفاضلات استفاده شد. بعد از بررسی داده‌های پرت، نقشه‌های هم‌دمای ماهانه برای زیرحوضه کشکان ترسیم شد. سپس مقادیر دمای متوسط ماهانه برای زیرحوضه و محدوده‌های مطالعاتی استخراج گردید. متوسط دمای زیرحوضه کشکان به ترتیب ۱۵/۸۲ درجه سانتیگراد بدست آمد.

روش نمودار جعبه‌ای

در روش نمودار جعبه‌ای، چارک‌ها مشخص شده و مقادیر بیشتر و کمتر از رابطه (۱۷) به عنوان داده پرت شناخته می‌شوند. همانطوری که در شکل (۲) دیده می‌شود، Q_3 چارک سوم ($x_{0.75}$) و Q_1 چارک اول ($x_{0.25}$) می‌باشد (Asikoglu, 2017). IQR طول جعبه می‌باشد.

$$x < Q_1 - 1.5IQR \quad \text{or} \quad x > Q_3 + 1.5IQR \quad (17)$$

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (18)$$



شکل (۲): نمودار جعبه‌ای

روش تفاضلات

برای برآورد داده‌های مفقود ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری از روش تفاضلات استفاده شد (علیزاده، ۱۳۸۴):

$$X_{tb} = X_{ta} \times \frac{X_a}{X_b} \quad (19)$$

کاهش آبدی رودخانه‌ها تحت تأثیر دو دسته عوامل قرار دارد. دسته اول عوامل اقلیمی هستند که اثر این عوامل جزء ذات آبدی بوده و برگشت پذیر نیستند (تغییر اقلیم). دسته دوم عوامل انسانی هستند که در اثر توسعه و رشد برداشت‌های آبی در حوضه باعث تغییر رژیم و کاهش آبدی رودخانه‌ها می‌شوند. هدف از طبیعی‌سازی آبدی رودخانه‌ها حذف اثر عوامل برگشت پذیر (عوامل انسانی) و تعیین مقدار آبدی قبل از توسعه سدها و برداشت آب در بالادست است.

آب تجدیدپذیر زیرزمینی

آب تجدیدپذیر زیرزمینی مجموع تغییرات ذخیره و برداشت خالص آب زیرزمینی می‌باشد. برای محاسبه آب تجدیدپذیر ناشی از منابع آب‌های زیرزمینی به صورت زیر اقدام می‌شود، ابتدا با استفاده از بیلان آب زیرزمینی مقدار تغییرات ذخیره برای هر محدوده و حوضه محاسبه شده، سپس مقدار برداشت خالص آب زیرزمینی نیز بدست آمده و با استفاده از آنها آب تجدیدپذیر زیرزمینی محاسبه می‌شود.

آماده‌سازی داده‌ها

داده‌های این مطالعه، شامل داده‌های بارش و دمای متوسط ایستگاه‌های هواشناسی از شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان اخذ گردید. با توجه به موقعیت زیرحوضه کشکان، ایستگاه‌هایی که در داخل و اطراف مرز زیرحوضه واقع شده‌اند و دارای دوره آماری بهتری بودند، انتخاب شدند. بعد از تکمیل آمار آنها با استفاده از نرم افزار HEC-4، از روش نمودار جعبه‌ای (باکس پلات)^۱ به منظور بررسی داده‌های پرت استفاده شد. در صورت مواجهه با داده‌های پرت، آن داده‌ها حذف و دوباره با نرم‌افزار HEC-4 بازسازی صورت گرفت. برای ترسیم نقشه‌ها از نرم‌افزار GIS و روش کریجینگ استفاده شد. نقشه‌های هم‌بارش ماهانه برای زیرحوضه کشکان ترسیم شد. سپس مقادیر بارش ماهانه برای زیرحوضه کشکان و محدوده‌های مطالعاتی استخراج گردید. با توجه به این نقشه‌ها، مقدار متوسط بارش

^۱-Box plot

نتایج و بحث

ترسیم نقشه‌های پارامترهای مختلف

به منظور بررسی توزیع مکانی پارامترهای اقلیمی در زیرحوضه کشکان، نقشه‌های هم‌بارش و هم‌دما با استفاده از نرم‌افزار GIS و روش درون‌یابی کریجینگ تهیه شد. پس از تهیه نقشه‌ها، مقادیر بارش و دما برای هر یک از محدوده‌های مطالعاتی و همچنین کل زیرحوضه کشکان استخراج گردید. استفاده از این روش امکان بررسی تغییرات مکانی پارامترهای اقلیمی و تحلیل تفاوت شرایط اقلیمی در بخش‌های مختلف زیرحوضه را فراهم می‌کند.

نتایج استخراج شده از نقشه‌های هم‌بارش نشان می‌دهد که متوسط بارش زیرحوضه کشکان در دوره بلندمدت (۲۷ ساله)، دوره کوتاه‌مدت (۱۰ ساله) و سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ به ترتیب برابر با ۵۰۲/۷۳، ۵۴۶/۴۲ و ۴۸۲/۶۷ میلی‌متر است. مقایسه این مقادیر بیانگر آن است که میانگین بارش در دوره کوتاه‌مدت نسبت به دوره بلندمدت افزایش یافته، در حالی که در سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ نسبت به هر دو دوره کاهش داشته است. این موضوع نشان‌دهنده نوسان قابل توجه بارندگی در سال‌های اخیر بوده و بیان می‌کند که استفاده از میانگین‌های بلندمدت به تنهایی نمی‌تواند تغییرات زمانی منابع آب را به طور کامل منعکس کند.

از سوی دیگر، نتایج حاصل از نقشه‌های هم‌دما نشان داد که متوسط دمای زیرحوضه کشکان در دوره بلندمدت (۲۷ ساله)، دوره کوتاه‌مدت (۱۰ ساله) و سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ به ترتیب برابر با ۱۵/۸۲، ۱۴/۳۹ و ۱۸/۱۲ درجه سانتیگراد است. این نتایج بیانگر آن است که سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ نسبت به هر دو دوره آماری دارای میانگین دمای بیشتری بوده است. افزایش دما، با افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل همراه بوده و در صورت عدم جبران توسط افزایش بارندگی، می‌تواند موجب کاهش مقدار آب تجدیدپذیر شود.

که در آن:

X_{tb} مقدار برآوردی پارامتر در ایستگاه B در زمان (t)؛
 X_{ta} مقدار مشاهده شده همان پارامتر در ایستگاه A در زمان (t)؛
 X_a میانگین بلندمدت پارامتر در ایستگاه A طی دوره آماری مشترک؛
 X_b میانگین بلندمدت همان پارامتر در ایستگاه B طی دوره آماری مشترک.

روش درون‌یابی کریجینگ

برای تهیه نقشه یکپارچه و پیوسته از یک مکان با داده‌های گسسته‌ای همچون داده‌های نقطه‌ای یا خطی از روش‌هایی استفاده می‌شود که به آن درون‌یابی^۱ گویند. در فرایند درون‌یابی با استفاده از مقادیر معلوم، مقادیر مجهول پیدا می‌شود. عوامل مهمی مانند تعداد، توزیع مکانی نقاط نمونه برداری و توانایی مدل درونیابی نقش مؤثری در دقت تهیه نقشه پهنه‌بندی دارند. روش‌های متعددی برای درون‌یابی داده‌های مکانی وجود دارد که از جمله متداول‌ترین آنها می‌توان به روش‌های چند ضلعی تیسن^۲، سطح روند^۳، درونیابی مثلثی یا تین^۴، اسپیلاین^۵، کریجینگ^۶ و فاصله معکوس وزنی^۷ (IDW) اشاره کرد (Burrough and McDonnell, 1998; Goovaerts, 1997). کریجینگ یک روش زمین آمار برای درون‌یابی داده‌ها بر اساس واریانس فضایی است، در کریجینگ واریانس فضایی تابعی از فاصله شناخته می‌شود و این تخمین به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (20)$$

در این رابطه، $Z(s_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده برای نمونه i ام، λ_i وزن یا اهمیت وابسته به نمونه i ام، s_0 محل پیش‌بینی، N تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده است.

^۵-Spline

^۶-Kriging

^۷-Inverse distance weighting

^۱-Interpolation

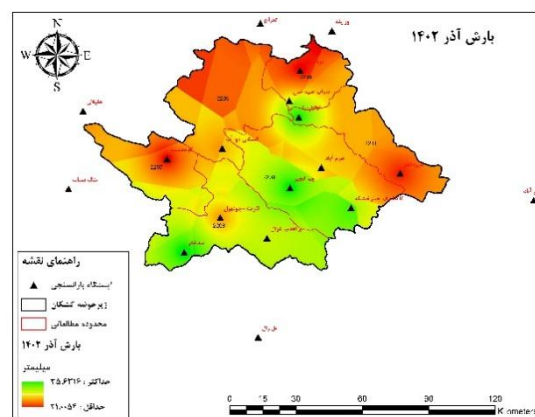
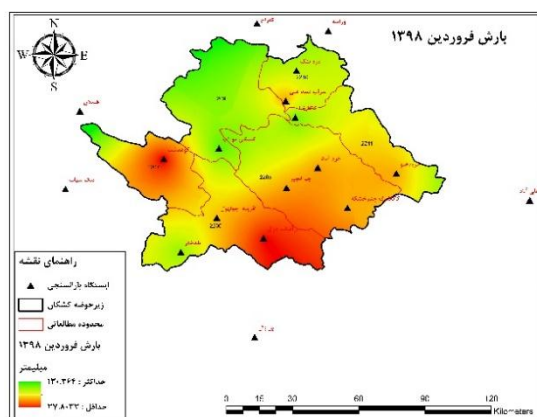
^۲-Thiessen polygon method

^۳-Trend surfaces

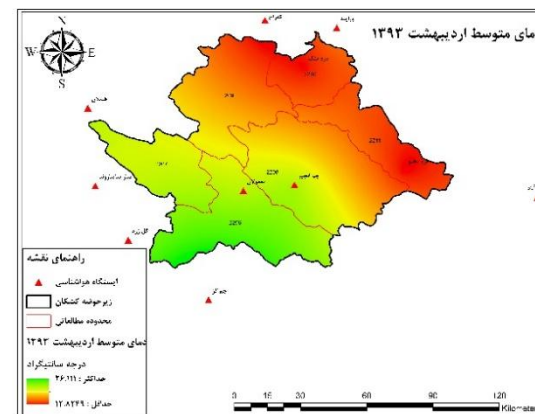
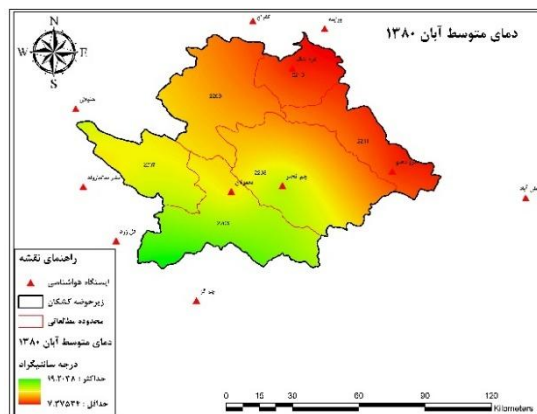
^۴-Triangulated Irregular Network (Tin)

بنابراین، تحلیل همزمان توزیع مکانی بارش و دما، مبنای مناسبی برای تفسیر نتایج محاسبه آب تجدیدپذیر در دوره‌های مختلف زمانی فراهم می‌آورد. برخی از نقشه‌های هم‌بارش برای ماه‌های مختلف و دوره‌های آماری به‌عنوان نمونه در شکل (۳) و برخی از نقشه‌های هم‌دما در شکل (۴) ارائه شده‌اند.

بررسی همزمان نقشه‌های بارش و دما نشان می‌دهد که تغییرات آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان حاصل اثر متقابل این دو پارامتر اقلیمی است. به عبارت دیگر، افزایش بارندگی موجب افزایش پتانسیل تغذیه منابع آب و افزایش آب تجدیدپذیر می‌شود، در حالی که افزایش دما از طریق افزایش تبخیر و تعرق، بخشی از این اثر را کاهش می‌دهد.



شکل (۳): نقشه‌های هم‌بارش در زیرحوضه کشکان و محدوده‌های مطالعاتی آن



شکل (۴): نقشه‌های هم‌دما در زیرحوضه کشکان و محدوده‌های مطالعاتی آن.

بارش، امکان برآورد تغییرات منابع آب تجدیدپذیر را در دوره‌های زمانی مختلف فراهم می‌کند. با توجه به وابستگی مستقیم منابع آب تجدیدپذیر به شرایط اقلیمی، تغییرات زمانی و مکانی پارامترهایی مانند بارش و دما می‌تواند موجب تغییر در مقدار آب قابل دسترس شود. از این رو، در این مطالعه مقدار آب تجدیدپذیر برای سه دوره آماری شامل دوره بلندمدت (۲۷ ساله)، دوره کوتاه‌مدت (۱۰ ساله) و سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ محاسبه شد که نتایج آن در جدول (۸) ارائه شده است.

محاسبه آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان
همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، روش‌های مختلفی برای برآورد آب تجدیدپذیر وجود دارد که انتخاب روش مناسب به نوع، کیفیت و میزان داده‌های در دسترس بستگی دارد. در این مطالعه، با توجه به داده‌های اقلیمی موجود، از روش تورنت‌وایت برای محاسبه آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان و محدوده‌های مطالعاتی آن استفاده شد. این روش با استفاده از پارامترهای اقلیمی، به‌ویژه دما و

براساس جدول (۸)، مقدار آب تجدیدپذیر در دوره کوتاه مدت نسبت به دوره بلندمدت ۱۰/۳۸ درصد افزایش یافته است. با این حال، این افزایش نشان دهنده یک روند قطعی و پایدار افزایشی در منابع آب نیست، زیرا تغییرات منابع آب در منطقه تحت تأثیر نوسانات سالانه اقلیم قرار دارد.

در سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲، مقدار آب تجدیدپذیر نسبت به دوره کوتاه مدت ۳۴/۱۹ درصد کاهش و نسبت به دوره بلندمدت ۲۷/۳۶ درصد کاهش نشان داده است. این کاهش را می توان مرتبط با شرایط گرم تر و کاهش مقدار بارش در این سال دانست. افزایش دما موجب افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل شده و کاهش بارندگی نیز میزان ورودی آب به سیستم هیدرولوژیکی را محدود کرده است؛ در نتیجه، مقدار آب تجدیدپذیر کاهش یافته است.

در مجموع، نتایج نشان می دهد که تغییرات آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان حاصل اثر همزمان تغییرات بارش و دما بوده و بررسی یک پارامتر به تنهایی نمی تواند تغییرات منابع آب را به طور کامل توضیح دهد. بنابراین، تحلیل همزمان متغیرهای اقلیمی و تغییرات زمانی آن ها برای ارزیابی وضعیت منابع آب و برنامه ریزی مدیریتی در این زیرحوضه ضروری است.

براساس نتایج جدول (۸)، مقدار آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان در دوره بلندمدت ۲۲۲۷/۷۲ میلیون مترمکعب، در دوره کوتاه مدت ۲۴۵۸/۸۸ میلیون مترمکعب و در سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ برابر ۱۶۱۸/۲۶ میلیون مترمکعب می باشد.

مقایسه نتایج نشان می دهد که مقدار آب تجدیدپذیر در دوره کوتاه مدت نسبت به دوره بلندمدت افزایش یافته است. این افزایش در شرایطی رخ داده که دمای متوسط دوره کوتاه مدت نسبت به دوره بلندمدت افزایش داشته است؛ بنابراین انتظار می رفت افزایش دما از طریق افزایش تبخیر و تعرق، موجب کاهش منابع آب تجدیدپذیر شود. با این حال، افزایش مقدار بارش در دوره کوتاه مدت سبب شده است اثر مثبت افزایش ورودی های آبی بر اثر منفی افزایش دما غلبه کند و در نهایت مقدار آب تجدیدپذیر افزایش یابد. بررسی مقادیر بارش دوره کوتاه مدت نیز این موضوع را تأیید می کند؛ به طوری که در برخی سال های این دوره، از جمله سال های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸، مقادیر بارش بیشتری نسبت به سایر سال ها ثبت شده است. افزایش بارندگی در این سال ها می تواند نقش مؤثری در افزایش تغذیه منابع آب و بهبود وضعیت آب تجدیدپذیر زیرحوضه داشته باشد.

جدول (۸): مقادیر آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان در دوره های زمانی مختلف

دوره زمانی	بارش (mm)	دما (C)	مساحت (KM ²)	آب تجدید پذیر (MCM)	آب تجدید پذیر در واحد سطح
بلندمدت	۵۰۲/۷۳	۱۵/۶۰	۹۵۱۰/۴۳	۲۲۲۷/۷۲	۰/۲۳
کوتاه مدت	۵۴۶/۴۲	۱۷/۳۹	۹۵۱۰/۴۳	۲۴۵۸/۸۸	۰/۲۶
۱۴۰۲-۱۴۰۳	۴۸۲/۶۷	۱۸/۱۲	۹۵۱۰/۴۳	۱۶۱۸/۲۶	۰/۱۷

کوتاه مدت و سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ به ترتیب در جداول (۹)، (۱۰) و (۱۱) ارائه شده است.

براساس نتایج جدول (۹)، مقدار آب تجدیدپذیر محدوده های مطالعاتی پلدختر، کوهدشت، خرم آباد، شیروند، الشتر و چغلوندی در دوره بلندمدت به ترتیب برابر با ۴۱۰/۵۴، ۲۱۴/۶۶، ۶۲۸/۱۹، ۴۲۸/۳۹، ۲۱۹/۲۵ و ۳۲۵/۲۵ میلیون مترمکعب می باشد.

بررسی مقادیر آب تجدیدپذیر در دوره بلندمدت نشان می دهد که بین محدوده های مطالعاتی اختلاف قابل توجهی

محاسبه آب تجدیدپذیر محدوده های مطالعاتی

به منظور بررسی تغییرات مکانی آب تجدیدپذیر در زیرحوضه کشکان، مقدار این شاخص برای محدوده های مطالعاتی مختلف در سه دوره زمانی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به تفاوت های موجود در شرایط اقلیمی، مساحت، میزان بارش و دمای محدوده های مطالعاتی، انتظار می رود مقدار آب تجدیدپذیر در بخش های مختلف زیرحوضه رفتار یکسانی نداشته باشد. نتایج محاسبات آب تجدیدپذیر محدوده های مطالعاتی در دوره های بلندمدت،

۱۴۰۲ به ترتیب برابر با ۲۴۳/۴۲، ۱۱۶/۰۴، ۴۱۳/۴۰، ۲۹۱/۴۹، ۱۹۹/۹۲ و ۲۹۳/۵۳ میلیون مترمکعب می باشد. مقایسه مقادیر سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ با دوره بلندمدت نشان می دهد که مقدار آب تجدیدپذیر در تمامی محدوده های مطالعاتی کاهش یافته است. بیشترین درصد کاهش مربوط به محدوده مطالعاتی کوهدشت با مقدار ۴۵/۹۴ درصد و کمترین درصد کاهش مربوط به محدوده مطالعاتی الشتر با مقدار ۸/۸۲ درصد می باشد.

کاهش آب تجدیدپذیر در سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ نشان دهنده اثر همزمان شرایط اقلیمی نامساعد شامل کاهش بارش و افزایش دما بر منابع آب منطقه است. بررسی اختلاف میزان کاهش در محدوده های مختلف نشان می دهد که محدوده هایی که در دوره های آماری مورد بررسی حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات اقلیمی داشته اند، کاهش شدیدتری در منابع آب تجدیدپذیر تجربه کرده اند. در مقابل، برخی محدوده ها به دلیل شرایط اقلیمی مناسب تر یا ظرفیت بیشتر نگهداری و تغذیه منابع آب، کاهش محدودتری را نشان داده اند.

همچنین، مقایسه سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ با دوره کوتاه مدت (جداول ۱۰ و ۱۱) نشان می دهد که مقدار آب تجدیدپذیر در تمامی محدوده های مطالعاتی کاهش یافته است. بیشترین درصد کاهش مربوط به محدوده مطالعاتی کوهدشت با مقدار ۴۷/۷۰ درصد و کمترین درصد کاهش مربوط به محدوده مطالعاتی چغلوندی با مقدار ۱۹/۹۵ درصد می باشد.

در مجموع، نتایج مقایسه محدوده های مطالعاتی نشان می دهد که تغییرات آب تجدیدپذیر در زیرحوضه کشکان دارای الگوی مکانی متفاوتی است و میزان تغییرات آن تنها به تغییرات کلی اقلیم منطقه وابسته نیست، بلکه تحت تأثیر ویژگی های محلی هر محدوده شامل مقدار بارش، دما، مساحت و شرایط طبیعی حاکم بر منطقه قرار دارد. این موضوع اهمیت بررسی منابع آب در مقیاس های مکانی کوچک تر را برای مدیریت دقیق تر منابع آب زیرحوضه کشکان نشان می دهد.

وجود دارد. بیشترین مقدار آب تجدیدپذیر مربوط به محدوده مطالعاتی خرم آباد با مقدار ۶۲۸/۱۹ میلیون مترمکعب و کمترین مقدار مربوط به محدوده مطالعاتی کوهدشت با مقدار ۲۱۴/۶۶ میلیون مترمکعب است. این تفاوت ها علاوه بر تأثیر مساحت محدوده ها، تحت تأثیر تفاوت در میزان بارش و شرایط دمایی آن ها قرار دارد؛ به طوری که محدوده هایی با بارش بیشتر و شرایط اقلیمی مساعدتر، ظرفیت بالاتری برای تولید و تجدید منابع آب دارند.

براساس جدول (۱۰)، مقدار آب تجدیدپذیر محدوده های مطالعاتی پلدختر، کوهدشت، خرم آباد، شیراوند، الشتر و چغلوندی در دوره کوتاه مدت به ترتیب برابر با ۴۳۹/۲۸، ۲۲۱/۸۵، ۶۷۵/۰۲، ۴۸۲/۲۶، ۲۵۶/۴۱ و ۳۶۶/۶۷ میلیون مترمکعب محاسبه شده است.

مقایسه نتایج دوره کوتاه مدت با دوره بلندمدت نشان می دهد که مقدار آب تجدیدپذیر در تمامی محدوده های مطالعاتی افزایش یافته است. بیشترین درصد افزایش مقدار آب تجدیدپذیر در دوره کوتاه مدت نسبت به دوره بلندمدت مربوط به محدوده مطالعاتی الشتر با مقدار ۱۶/۹۴ درصد و کمترین درصد افزایش مربوط به محدوده مطالعاتی کوهدشت با مقدار ۳/۳۵ درصد می باشد.

افزایش آب تجدیدپذیر در دوره کوتاه مدت را می توان عمدتاً ناشی از افزایش مقدار بارش در این دوره دانست. با وجود افزایش دما در برخی محدوده ها، افزایش بارندگی موجب افزایش ورودی آب به سیستم هیدرولوژیکی شده و اثر افزایشی آن بر منابع آب تجدیدپذیر بیشتر از اثر کاهنده افزایش دما بوده است. با این حال، تفاوت میزان افزایش در محدوده های مختلف نشان می دهد که پاسخ منابع آب به تغییرات اقلیمی در تمام بخش های زیرحوضه یکسان نیست و شرایط محلی هر محدوده در شدت تغییرات نقش دارد.

نتایج جدول (۱۱) نشان می دهد که مقدار آب تجدیدپذیر محدوده های مطالعاتی پلدختر، کوهدشت، خرم آباد، شیراوند، الشتر و چغلوندی در سال آبی ۱۴۰۳-

جدول (۹): مقادیر آب تجدیدپذیر محدوده‌های مطالعاتی در دوره بلندمدت

محدوده مطالعاتی	بارش (mm)	دما (C)	مساحت (KM ²)	آب تجدید پذیر (MCM)	آب تجدید پذیر در واحد سطح
پلدختر ۲۲۰۶	۴۷۵/۱۲	۱۹/۶۰	۲۰۳۶/۲۰	۴۱۰/۵۴	۰/۲۰
کوه‌دشت ۲۲۰۷	۴۴۸/۹۰	۱۸/۰۴	۱۱۲۲/۸۸	۲۱۴/۶۶	۰/۱۹
خرم آباد ۲۲۰۸	۵۲۳/۹۸	۱۵/۵۷	۲۵۱۶/۳۰	۶۲۸/۱۹	۰/۲۵
شیراوند ۲۲۰۹	۴۹۸/۰۴	۱۴/۳۶	۱۸۴۲/۲۵	۴۲۸/۳۹	۰/۲۳
الشتر ۲۲۱۰	۵۳۹/۷۹	۱۲/۳۶	۸۱۱/۲۹	۲۱۹/۲۵	۰/۲۷
چفلوندی ۲۲۱۱	۵۳۰/۵۶	۱۲/۳۳	۱۱۸۱/۲۲	۳۲۵/۲۵	۰/۲۸

جدول (۱۰): مقادیر آب تجدیدپذیر محدوده‌های مطالعاتی در دوره کوتاه مدت

محدوده مطالعاتی	بارش (mm)	دما (C)	مساحت (KM ²)	آب تجدید پذیر (MCM)	آب تجدید پذیر در واحد سطح
پلدختر ۲۲۰۶	۵۰۲/۲۱	۲۱/۲۶	۲۰۳۶/۲۰	۴۳۹/۲۸	۰/۲۲
کوه‌دشت ۲۲۰۷	۴۶۴/۴۵	۱۹/۵۴	۱۱۲۲/۸۸	۲۲۱/۸۵	۰/۲۰
خرم آباد ۲۲۰۸	۵۶۱/۳۹	۱۷/۳۰	۲۵۱۶/۳۰	۶۷۵/۰۲	۰/۲۷
شیراوند ۲۲۰۹	۵۴۳/۴۸	۱۵/۷۲	۱۸۴۲/۵۵	۴۸۲/۲۶	۰/۲۶
الشتر ۲۲۱۰	۶۱۴/۴۸	۱۳/۸۷	۸۱۱/۲۹	۲۵۶/۴۱	۰/۳۲
چفلوندی ۲۲۱۱	۵۹۲/۵۲	۱۳/۹۱	۱۱۸۱/۲۲	۳۶۶/۶۷	۰/۳۱

جدول (۱۱): مقادیر آب تجدیدپذیر محدوده‌های مطالعاتی در سال آبی ۱۴۰۲-۱۴۰۳

محدوده مطالعاتی	بارش (mm)	دما (C)	مساحت (KM ²)	آب تجدید پذیر (MCM)	آب تجدید پذیر در واحد سطح
پلدختر ۲۲۰۶	۴۲۲/۱۵	۲۱/۹۰	۲۰۳۶/۲۰	۲۴۳/۴۲	۰/۱۲
کوه‌دشت ۲۲۰۷	۳۹۸/۲۲	۲۰/۳۷	۱۱۲۲/۸۸	۱۱۶/۰۴	۰/۱۰
خرم آباد ۲۲۰۸	۴۹۳/۳۴	۱۷/۹۱	۲۵۱۶/۳۰	۴۱۳/۴۰	۰/۱۶
شیراوند ۲۲۰۹	۴۶۴/۱۳	۱۶/۶۱	۱۸۴۲/۵۵	۲۹۱/۴۹	۰/۱۶
الشتر ۲۲۱۰	۵۶۶/۵۵	۱۴/۶۴	۸۱۱/۹	۱۹۹/۹۲	۰/۲۵
چفلوندی ۲۲۱۱	۵۵۱/۶۱	۱۴/۶۴	۱۱۸۱/۲۲	۲۹۳/۵۳	۰/۲۵

بحث و تحلیل تغییرات آب تجدیدپذیر در زیرحوضه کشکان

تغییرات آب تجدیدپذیر در یک حوضه آبریز حاصل برهم‌کنش عوامل اقلیمی، ویژگی‌های فیزیوگرافی و فرآیندهای هیدرولوژیکی است؛ از این رو تبیین تغییرات آن صرفاً بر پایه مقادیر برآورد شده کافی نبوده و مستلزم تحلیل نقش متغیرهای کنترل‌کننده و ارتباط متقابل آن‌ها است.

نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات آب تجدیدپذیر در زیرحوضه کشکان تحت تأثیر برهم‌کنش همزمان بارش و دما قرار دارد و نمی‌توان تغییرات منابع آب را تنها بر اساس یکی از این دو متغیر تفسیر کرد. اگرچه افزایش دما معمولاً با افزایش تبخیر و تعرق و در نتیجه کاهش آب در دسترس همراه است، اما نتایج این مطالعه نشان داد که در دوره

کوتاه‌مدت، افزایش بارش توانسته است اثر افزایش دما را تا حد زیادی جبران کند و در نهایت موجب افزایش آب تجدیدپذیر نسبت به دوره بلندمدت شود. در دوره‌های بررسی‌شده این پژوهش، نتایج نشان داد که تغییرات بارندگی نسبت به تغییرات دما نقش پررنگ‌تری در کنترل میزان آب تجدیدپذیر داشته است.

این موضوع نشان می‌دهد که در شرایط اقلیمی زیرحوضه کشکان، اثر افزایش دما زمانی می‌تواند به کاهش محسوس آب تجدیدپذیر منجر شود که با کاهش بارندگی نیز همراه باشد؛ در غیر این صورت، افزایش بارندگی قادر است بخش قابل توجهی از افزایش تبخیر و تعرق ناشی از دما را جبران کند. این یافته با نتایج طالبی‌حسین‌آباد و همکاران (۱۳۹۳) همخوانی دارد که بیان کردند مقدار آب

آب تجدیدپذیر ایجاد کند. در چنین شرایطی، پایش مستمر پارامترهای اقلیمی و به‌روزرسانی دوره‌ای برآورد آب تجدیدپذیر می‌تواند مبنای مناسب‌تری برای تصمیم‌گیری در زمینه تخصیص منابع آب، مدیریت برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی و تدوین برنامه‌های سازگاری با تغییر اقلیم فراهم کند. این نتیجه با دیدگاه کلانتری و همکاران (۲۰۲۵) مبنی بر لزوم تلفیق ارزیابی آب تجدیدپذیر با راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم و همچنین با نتایج استکیپول و همکاران (۲۰۲۳) درباره ضرورت پایش مستمر روندهای منابع آب برای مدیریت یکپارچه حوضه‌های آبریز همسو است.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان بیش از آنکه تابع تغییرات منفرد دما یا بارش باشد، حاصل برهم‌کنش این دو عامل اقلیمی و ویژگی‌های محلی هر محدوده مطالعاتی است. از این‌رو، ارزیابی همزمان تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای اقلیمی می‌تواند مبنای قابل اتکاتری برای برآورد آب تجدیدپذیر و تصمیم‌گیری در مدیریت پایدار منابع آب فراهم کند.

با وجود آنکه اعتبارسنجی نتایج با داده‌های مشاهداتی رواناب، بیان رسمی منابع آب یا آمار منتشرشده شرکت آب منطقه‌ای می‌تواند موجب افزایش قابلیت اعتماد برآوردها شود، در زمان انجام این پژوهش داده‌های کمی منتشرشده و قابل استناد برای آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان در دسترس نبود؛ از این‌رو امکان اعتبارسنجی مستقیم نتایج فراهم نشد. همچنین، تحلیل عدم قطعیت و تحلیل حساسیت نتایج نسبت به پارامترهای ورودی نیز به دلیل محدودیت داده‌ها و خارج بودن آن از دامنه این پژوهش انجام نشد. با این حال، در این مطالعه با استفاده از روش تورنت‌وایت اصلاح‌شده و اعمال ضرایب اصلاحی رطوبتی، بخشی از محدودیت‌های روش کلاسیک کاهش یافت و روند تغییرات برآوردشده با رفتار متغیرهای اقلیمی منطقه سازگاری مناسبی نشان داد؛ به‌گونه‌ای که افزایش بارندگی در دوره کوتاه‌مدت با افزایش آب تجدیدپذیر و کاهش بارندگی همراه با افزایش دما در سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ با کاهش آب تجدیدپذیر همراه بود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، با بهره‌گیری از داده‌های بیان منابع آب،

تجدیدپذیر حاصل برهم‌کنش اجزای مختلف چرخه هیدرولوژیکی بوده و ارزیابی آن مستلزم بررسی همزمان متغیرهای اقلیمی است. همچنین میان‌آبادی و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان دادند که برآورد صحیح آب تجدیدپذیر، مبنای اصلی مدیریت پایدار منابع آب و کاهش آسیب‌پذیری آبخوان‌ها در برابر خشکسالی‌های آینده محسوب می‌شود. از سوی دیگر، کاهش قابل توجه آب تجدیدپذیر در سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ نشان داد که منابع آب زیرحوضه کشکان نسبت به نوسانات اقلیمی حساسیت بالایی دارند. همزمانی کاهش بارندگی و افزایش دما در این سال موجب کاهش منابع آب تجدیدپذیر شد که بیانگر تأثیر مستقیم شرایط اقلیمی بر وضعیت منابع آب منطقه است. این نتیجه با یافته‌های گاسلینگ و آرئل (۲۰۱۶) مطابقت دارد که نشان دادند تغییرات اقلیمی از طریق تغییر الگوی بارش و افزایش تبخیر و تعرق، یکی از مهم‌ترین عوامل تشدید کمبود منابع آب در بسیاری از حوضه‌های آبریز جهان محسوب می‌شود. همچنین دهقانی و همکاران (۲۰۲۴) نیز گزارش کردند که افزایش دما و تغییر الگوی بارش، ریسک کم‌آبی را به‌طور قابل توجهی افزایش داده و ضرورت به‌کارگیری راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم را بیش از پیش نمایان می‌کند.

بررسی نتایج در محدوده‌های مطالعاتی مختلف نیز نشان داد که پاسخ منابع آب به تغییرات اقلیمی در تمام بخش‌های زیرحوضه یکسان نیست. تفاوت در روند تغییرات آب تجدیدپذیر میان محدوده‌های مطالعاتی بیانگر آن است که علاوه بر شرایط عمومی اقلیم، ویژگی‌های محلی هر محدوده، از جمله اختلاف ارتفاع، شرایط توپوگرافی، پراکنش مکانی بارش و ویژگی‌های هیدرولوژیکی نیز در میزان تولید و تجدید منابع آب نقش دارد. این موضوع با نتایج درخشان و همکاران (۱۴۰۲) همخوانی دارد که تأکید کرده‌اند تجدیدپذیری منابع آب، مفهومی وابسته به ویژگی‌های هیدرولوژیکی و شرایط محلی هر آبخوان بوده و نمی‌توان از یک الگوی ثابت برای تمام مناطق استفاده کرد. از دیدگاه مدیریتی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از مقادیر متوسط بلندمدت به‌تنهایی برای برنامه‌ریزی منابع آب کافی نیست، زیرا نوسانات اقلیمی در دوره‌های کوتاه‌مدت می‌تواند تغییرات قابل توجهی در میزان

تجدیدپذیر در سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ نسبت به دوره کوتاه مدت ۳۴/۱۹ درصد و نسبت به دوره بلندمدت ۲۷/۳۶ درصد کاهش یافته که بیانگر حساسیت منابع آب زیرحوضه به تغییرات اقلیمی و نوسانات همزمان بارش و دما است.

بررسی محدوده‌های مطالعاتی نیز نشان داد که میزان تغییرات آب تجدیدپذیر در تمامی مناطق یکسان نیست و هر محدوده متناسب با شرایط اقلیمی و ویژگی‌های طبیعی خود، واکنش متفاوتی به تغییرات اقلیم نشان می‌دهد. این موضوع ضرورت انجام ارزیابی‌های منطقه‌ای و پرهیز از تعمیم نتایج یک محدوده به سایر بخش‌های زیرحوضه را آشکار می‌سازد.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان بیش از آنکه تابع تغییرات یک متغیر اقلیمی باشد، حاصل برهم‌کنش همزمان بارش و دما و تفاوت‌های مکانی زیرحوضه است. از این رو، ارزیابی دوره‌ای آب تجدیدپذیر در مقیاس‌های زمانی مختلف و با در نظر گرفتن تغییرات مکانی، می‌تواند مبنای علمی مناسب‌تری برای برنامه‌ریزی، تخصیص و مدیریت پایدار منابع آب در زیرحوضه کشکان فراهم آورد.

آمار رواناب و اطلاعات رسمی شرکت آب منطقه‌ای، ضمن اعتبارسنجی نتایج، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت روش تورنت‌وایت اصلاح‌شده نیز انجام شود تا قابلیت اعتماد برآوردها بیش از پیش ارزیابی گردد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تغییرات مکانی و زمانی آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان با استفاده از داده‌های بارش و دما و به‌کارگیری روش تورنت‌وایت اصلاح‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. تهیه نقشه‌های هم‌بارش و هم‌دما نشان داد که شرایط اقلیمی در سطح زیرحوضه یکنواخت نبوده و تفاوت‌های مکانی بارش و دما می‌تواند بر میزان آب تجدیدپذیر محدوده‌های مختلف تأثیرگذار باشد. از این رو، استفاده از میانگین‌های کلی برای کل زیرحوضه، بدون توجه به تفاوت‌های مکانی، نمی‌تواند تصویر دقیقی از وضعیت منابع آب ارائه دهد.

نتایج محاسبات نشان داد که آب تجدیدپذیر زیرحوضه کشکان در دوره کوتاه مدت نسبت به دوره بلندمدت ۱۰/۳۸ درصد افزایش یافته است. این افزایش بیانگر آن است که در دوره مورد بررسی، اثر افزایش بارش بر منابع آب از اثر افزایش دما بیشتر بوده است. در مقابل، مقدار آب

تقدیر و تشکر

نویسندگان این تحقیق، از شرکت مدیریت منابع آب ایران به دلیل در اختیار قرار دادن اطلاعات مورد نیاز این مطالعه، کمال تقدیر و تشکر را بعمل می‌آورند.

منابع

- درخشان، ه.، ک. داوری، و ا. مسادی. ۱۴۰۲. مروری بر سیر بازاندیشی در تجدیدپذیری آب زیرزمینی. تحقیقات منابع آب ایران، دوره ۱۹، شماره ۳، ص ۲۱۲-۲۳۰.
- زحمت‌کش گورابزرمخی، ر. ۱۴۰۰. برآورد و بررسی آب تجدیدپذیر سالانه در دوره‌های مختلف زمانی با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای در استان خراسان رضوی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی عمران-محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- شاهدی، م. و ف. طالبی‌حسین‌آباد. ۱۳۹۵. آشنایی با مفاهیم پایه در سیستم منابع آب. نشریه آب و توسعه پایدار، دوره ۳، شماره ۲، ص ۱۱۹-۱۱۷.
- شاهدی، م. و ف. طالبی‌حسین‌آباد. ۱۳۹۲. ارائه چند شاخص کاربردی به منظور بررسی تعادل منابع آب و پایداری توسعه (مطالعه موردی: حوضه آبریز قره‌قوم). نشریه آب و توسعه پایدار، دوره ۱، پیاپی ۱، ص ۷۹-۷۳.

- شعبانی لکرانی، ا. ۱۴۰۲. برآورد میزان آب قابل تجدید آبخوان دشت سراب و تعیین الگوی بهینه تعداد چاه‌های بهره‌برداری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته برنامه‌ریزی گردشگری-منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
- طالبی حسین آباد، ف.، م. شاهدی، و س.ا. ولایتی. ۱۳۹۳. برآورد آب تجدیدپذیر به کمک مدل بیلان آب در شرایط کمبود داده. مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، دوره ۱۲، شماره ۲۲، ص ۱۵۰-۱۲۹.
- علیزاده، ا. ۱۳۸۴. اصول هیدرولوژی کاربردی. آستان قدس رضوی، دانشگاه امام رضا (ع)، چاپ بیست و چهار، ص ۸۸۲.
- Amdar, N., S. Seyoum, J. Al-Bakri and et al. 2024. Developing a water budget for the Amman-Zarqa basin using water accounting plus and the pixel-based soil water balance model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10: 6997-7017. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02159-0>
- Asikoglu, O.L. 2017. Outlier Detection in Extreme Value Series. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, 4(5): 7314-7318.
- Burrough, P.A and R.A. McDonnell. 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.
- Dehghani, S., A. Massah Bavani, A. Roozbahani and et al. 2024. Assessment of Climate Change-Induced Water Scarcity Risk by Using a Coupled System Dynamics and Bayesian Network Modeling Approaches. *Water Resources Management*, 38: 3853-3874. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03843-7>
- Ding, B., J. Zhang, P. Zheng, Z. Li, Y. Wang, G. Jia and X. Yu. 2024. Water security assessment for effective water resource management based on multi-temporal blue and green water footprints. *Journal of Hydrology*, 632, 130761. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130761>
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York.
- Gosling, S.N and N.W. Arnell. 2016. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. *Climatic Change*, 134: 371-385. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0853-x>
- Kalantari, M., M.R. Nikoo and N. Talebbeydokhti. 2025. Assessment of renewable water in the face of climate change by a comprehensive analysis of adaptation strategies. *Climatic Change*, 178, 42. <https://doi.org/10.1007/s10584-025-03886-8>
- Mekonnen, M.M and A.Y. Hoekstra. 2016. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2):e1500323. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>
- Mianabadi, A., S.M. Hasheminia, K. Davary, H. Derakhshan and M. Hrachowitz. 2021. Estimating the Aquifer's Renewable Water to Mitigate the Challenges of Upcoming Megadrought Events. *Water Resources Management*, 35:4927-4942.
- Stackpoole, S.M., P.G Oelsner, and et al. 2023. Integrated Water Resources Trend Assessments: State of the Science, Challenges, and Opportunities For Advancement. *Journal of the American Water Resources Association*, 59 (6): 1181-1197. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.13137>
- Thornthwaite, C.W and J.R. Mather. 1957. *Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance*. Publications in Climatology, 10 (3).
- Thornthwaite, C.W. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1): 55-94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Zou, Z., X. Xiao, J. Dong, Y. Qin, R.B. Doughty, M.A. Menarguez, G. Zhang and J. Wang. 2016. Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 115 (15): 3810-3815. <https://doi.org/10.1073/pnas.1719275115>