

Analysis of spatial and temporal patterns of potential evapotranspiration by combining harmonic, stochastic and Monte Carlo methods (Case study: Zayandehrud basin)

Esmail Adib Majd¹, Rasoul Mirabbasi Najafabadi^{*2},
Mahdi Asadi Aghbolaghi³, Sayyed-Hassan Tabatabaei⁴

1. Ph.D. Student of Water Resources, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: e.adibmajd@stu.sku.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: mirabbasi@sku.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: asadi.mehdi@agr.sku.ac.ir
4. Professor, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: tabatabaei@sku.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Background and Objectives: This research presents a method to investigate and analyze the spatial and temporal patterns of potential evapotranspiration (ET_p) in Zayandehroud basin. Due to the importance of water resource management, efficient methods are needed to predict evapotranspiration (ET). Although these patterns have been studied in various ways, a method that can estimate ET_p for dry, normal, and wet periods with a daily time step over a hundred years has not yet been presented. In this study, a hybrid method for the temporal and spatial analysis of ET_p was developed for the Zayandehroud basin as the research area. This method considers the daily time step and uses a relatively dense network of points at the basin level.
Article history: Received: 09.15.2024 Revised: 10.23.2024 Accepted: 10.27.2024	
Keywords: Climate changes, Hargreaves Samani, Modeling, Random generators, Temporal and spatial	
	Materials and Methods: The proposed method combines three approaches: harmonic, stochastic, and Monte Carlo methods, to model and predict ET_p . The harmonic method helps analyze periodic, seasonal, and annual patterns of data, the stochastic method simulates natural fluctuations in data, and the Monte Carlo method is used to analyze different weather scenarios. In the hybrid method, the harmonic function was first fitted to the maximum and minimum air temperature data of all stations in the Zayandehroud basin and its surroundings over a 26-year period, from 1994 to 2019. Then, the statistical distribution of the residuals and the correlation between the air temperature parameters were determined, followed by the steps of random number generation. Using stochastic and Monte Carlo methods, 100 years of statistics for extreme air temperature variables were generated daily, allowing ET_p to be calculated in the next step using the Hargreaves-Samani method. Estimation of ET_p was done in a dense network of points over the basin by the inverse squared distance method to obtain spatial patterns. By using the percentile index-20% for mild drought, 50% for normal, and 80% for mild drought-different humidity conditions were investigated. Validation was performed for the normal period of the hybrid model, where model data were compared with observed values in the agricultural areas of the basin during the wheat cultivation period (PWC). Correlation tests and one-way ANOVA were used to assess the significance of the mean differences and confirm the accuracy of the model results.

Results: An increasing trend of ET_p was observed in all agricultural areas throughout the basin. The slope of the trend, according to the Sen method, ranged from 1.28 mm/PWC in the lands downstream of Khamiran Dam to 3.73 mm/PWC in Mahyar and Jarguyeh lands. The shortest growing period for wheat was observed in Roudasht with 211 days, while Fereidunshahr had the longest growing period of 288 days. Consequently, the expected ET_p values under normal conditions were approximately 598 millimetres for Roudasht and 795 millimetres for Fereidunshahr in PWC. Investigations at the watershed level showed that the ET_p value in the mountainous regions of the basin typically varied between 1299 and 1515 mm/y under normal conditions. In contrast, the flat eastern areas had ET_p values between 1524 and 1609 mm/y. Under moderately dry conditions, ET_p values in the higher regions ranged from 1320 to 1540 mm/y, while in the flat areas, they ranged from 1547 to 1644 mm/y. The same changes were estimated to range from 1276 to 1460 mm/y in the mountainous regions and from 1491 to 1583 mm/y in the plains.

Conclusion: The results show that using a hybrid approach improves the understanding of evapotranspiration patterns in a basin, increases prediction accuracy, and facilitates the analysis of events under different climatic conditions.

Cite this article: Adib Majd, Esmaeil, Mirabbasi Najafabadi, Rasoul, Asadi Aghbolaghi, Mahdi, Tabatabaei, Sayyed-Hassan. 2025. Analysis of spatial and temporal patterns of potential evapotranspiration by combining harmonic, stochastic and Monte Carlo methods (Case study: Zayandehrud basin). *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (4), 63-88.



© The Author(s).

DOI: [10.22069/jwsc.2025.22795.3757](https://doi.org/10.22069/jwsc.2025.22795.3757)

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تحلیل الگوهای مکانی و زمانی تبخیر-تعرق پتانسیل با تلفیق روش‌های هارمونیک، استوکستیک و مونت کارلو (مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود)

اسماعیل ادیب‌مجد^۱، رسول میرعباسی نجف‌آبادی^{۲*}، مهدی اسدی آقبلاغی^۳، سید حسن طباطبائی^۴

۱. دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: e.adibmajd@stu.sku.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: mirabbasi@sku.ac.ir

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: asadi.mehdi@agr.sku.ac.ir

۴. استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: tabatabaei@sku.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۲۵ تاریخ ویرایش: ۱۳۹۸/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۰۶ واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی زمانی و مکانی، تغییرات اقلیمی، مدل‌سازی، مولدهای تصادفی، هارگریوز سامانی	سابقه و هدف: این پژوهش به ارائه شیوه‌ای برای بررسی و تحلیل الگوهای مکانی و زمانی تبخیر-تعرق پتانسیل (ET_p) در حوضه آبریز زاینده‌رود می‌پردازد. با توجه به اهمیت مدیریت منابع آب، استفاده از راه‌های کارآمد برای پیش‌بینی تبخیر-تعرق (ET) ضروری است. تاکنون بررسی الگوهای یادشده به روش‌های متفاوت انجام شده است، با این حال رویه‌ای که بتواند ET_p را در چارچوب دوره‌های خشک، نرمال و تر برای کل حوضه‌های آبریز با گام زمانی روزانه به مدت یک‌صد سال تحلیل کند، ارائه نشده است. در این مطالعه، یک سبک تلفیقی برای این موضوع در سطح حوضه زاینده‌رود به‌عنوان محدوده پژوهش توسعه داده شد. این رویه، گام زمانی روزانه و شبکه‌ای نسبتاً متراکم از نقاط را در سطح حوضه با هدف کاربرد در برنامه‌ریزی منابع و مصارف آب در نظر می‌گیرد. مواد و روش‌ها: شیوه پیشنهادی از ترکیب سه تحلیل هارمونیک، استوکستیک و مونت کارلو برای مدل‌سازی و پیش‌بینی ET_p استفاده می‌کند. تجزیه و تحلیل هارمونیک به بررسی رفتار دوره‌ای، فصلی و سالیانه داده‌ها کمک می‌کند، روش استوکستیک به شبیه‌سازی نوسانات طبیعی در داده‌ها می‌پردازد و از تکرار مونت کارلو برای تحلیل سناریوهای مختلف آب‌وهوا استفاده می‌شود. در رویه تلفیقی، ابتدا تابع هارمونیک به داده‌های دمای هوای بیشینه و کمینه کل ایستگاه‌های حوضه زاینده‌رود و پیرامون آن در یک دوره آماری بلندمدت ۲۶ ساله از ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۹ برازش داده شد. سپس توزیع آماری باقی‌مانده‌ها مشخص شد، همبستگی بین پارامترهای دمای هوا تعیین و مراحل تولید اعداد تصادفی انجام گردید. با استفاده از فرآیندهای استوکستیک و مونت کارلو، یک‌صد سال آمار برای متغیرهای دمای هوای بیشینه و کمینه به‌صورت روزه‌روز

تولید شد تا در گام بعدی با رابطه هارگریوز-سامانی ET_p را محاسبه کرد. برآورد ET_p در شبکه متراکمی از نقاط در کل حوضه با به کارگیری عکس مجذور فاصله برای دستیابی به تغییرات مکانی انجام شد. با استفاده از شاخص صدک‌ها که در آن صدک ۲۰ درصد برای خشک‌سالی ملایم، ۵۰ درصد برای نرمال و ۸۰ درصد برای ترسالی ملایم پیشنهاد شد، شرایط رطوبتی مختلف قابلیت بررسی یافتند. اعتبارسنجی برای دوره نرمال، صورت پذیرفت. بدین منظور، داده‌های مدل با مقادیر مشاهداتی در گستره نواحی کشاورزی حوضه و برای دوره کشت گندم با آزمون‌های همبستگی و هم‌چنین تحلیل واریانس یک‌طرفه، معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها را رد کرد و دقت نتایج مدل را تأیید نمود.

یافته‌ها: روند افزایشی ET_p در همه نواحی کشاورزی سرتاسر حوضه مشاهده شد، به نحوی که شیب روند به روش سن (Sen)، از ۱/۲۸ میلی‌متر در دوره کشت گندم در اراضی پایین‌دست سد خمیران، تا ۳/۷۳ میلی‌متر در دوره کشت گندم در اراضی مهیار و جرقویه تغییر می‌کند. با توجه به این که کم‌ترین دوره کشت گندم در رودشت، ۲۱۱ روز و بیش‌ترین دوره در فریدون‌شهر، ۲۸۸ روز است انتظار می‌رود مقدار ET_p در شرایط نرمال، به ترتیب ۵۹۸ و ۷۹۵ میلی‌متر در دوره کشت گندم باشد. بررسی‌ها در سطح حوضه آبریز نیز نشان می‌دهد مقدار ET_p در نواحی کوهستانی حوضه و در شرایط نرمال، بین ۱۲۹۹ تا ۱۵۱۵ میلی‌متر در سال تغییر می‌کند. این در حالی است که در مناطق مسطح شرقی، تغییرات ET_p از ۱۵۲۴ تا ۱۶۰۹ میلی‌متر است. در شرایط خشک ملایم و در نواحی مرتفع از ۱۳۲۰ تا ۱۵۴۰ و در نواحی مسطح از ۱۵۴۷ تا ۱۶۴۴ میلی‌متر در سال تغییرات ET_p محاسبه شد. همین تغییرات برای شرایط ترسالی ملایم در نواحی کوهستانی از ۱۲۷۶ تا ۱۴۶۰ و در دشت‌ها از ۱۴۹۱ تا ۱۵۸۳ میلی‌متر در سال تخمین زده شده است.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از روش تلفیقی می‌تواند به شناخت بهتری از الگوهای زمانی و مکانی ET_p در حوضه‌های آبریز منجر شود، دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهد و وضعیت حوضه را تحت شرایط آب‌وهوایی مختلف تحلیل نماید.

استناد: ادیب‌مجد، اسماعیل، میرعباسی نجف‌آبادی، رسول، اسدی آقبلاغی، مهدی، طباطبائی، سید حسن (۱۴۰۳). تحلیل الگوهای مکانی و زمانی تبخیر-تعرق پتانسیل با تلفیق روش‌های هارمونیک، استوکستیک و مونت کارلو (مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود).

پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۱ (۴)، ۸۸-۶۳.

DOI: [10.22069/jwsc.2025.22795.3757](https://doi.org/10.22069/jwsc.2025.22795.3757)



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

نظر به این‌که در مناطق گرم و خشک حجم زیادی از آب مصرفی در یک حوضه آبریز به‌وسیله تبخیر-تعرق (ET) هدر می‌رود، بنابراین تعیین میزان ET در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، طراحی و برنامه‌ریزی سیستم‌های آبیاری و ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش مصرف آب از اهمیت زیادی برخوردار است (۱). تعیین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل (ET_p) در مناطق مختلف یک حوضه آبریز، به مدیران بخش آب کمک می‌کند تا بتوانند منابع آبی را به‌طور بهینه مدیریت کنند. با داشتن اطلاعات دقیق از میزان ET برای استفاده تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌توان بهتر برنامه‌ریزی کرد (۲). آگاهی از تغییرات زمانی و مکانی ET_p به کشاورزان و بهره‌برداران از نواحی کشاورزی کمک می‌کند تا نیاز آبی محصولات خود را بهتر شناسایی و برآورده کنند و بتوانند بهره‌وری کشت را افزایش دهند (۳). ET هم‌چنین به‌عنوان یک متغیر کلیدی در مطالعات تغییر اقلیم و اثرات آن بر منابع آبی و اکوسیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این اطلاعات می‌تواند برای پیش‌بینی رفتار رودخانه‌ها و تغییرات سطح آب در حوضه‌های آبریز مفید باشد (۴). ET_p به‌عنوان استاندارد برای مقایسه نیاز آبی محصولات مختلف با در نظر گرفتن شرایط آب‌وهوایی مختلف به‌کار می‌رود. تاکنون روش‌های متعددی برای برآورد ET توسعه یافته‌اند. نیکولو و همکاران (۲۰۲۴) معادلات مبتنی بر تابش خورشیدی مورد استفاده در کشورهای مختلف را با در نظر گرفتن داده‌های آب‌وهوایی محدود برای تخمین ET به‌کار گرفتند (۵). دین‌پژوه و همکاران (۲۰۲۳) براساس برآورد تبخیر از سطوح و تعرق از گیاهان (۶) که شیوه بسیار متداولی است (۷) مقادیر ET_p را در ایران ارزیابی کردند (۸). این شیوه در حقیقت به تعادل انرژی و قانون بقای جرم تکیه

دارد. معادلاتی مانند پنمن-مانتیت فائو و هارگریوز-سامانی (۹) از این روش استفاده می‌کنند. براساس روابط تجربی و داده‌های اندازه‌گیری‌شده، معادلاتی مثل بلینی-کریدل (۱۰) توسعه یافتند که استفاده از آن‌ها در بعضی مناطق، با واسنجی این روش‌ها قابل استفاده است. کاربرد فناوری‌های سنسور از دور نیز اطلاعات مفیدی در این زمینه ارائه می‌کند (۱۱). چن و همکاران (۲۰۲۳) با جمع‌آوری داده‌های مربوط به دما، رطوبت و پوشش گیاهی از سنسورهای ماهواره‌ای و الگوریتم $SEBAL$ ، مقادیر ET را تخمین زدند (۱۲). مکنون و همکاران (۲۰۲۴) مدل به‌روز شده‌ای را برای تخمین‌های دقیق‌تر ET با استفاده از الگوریتم $SEBSLIGEEpy$ اصلاح‌شده توسعه دادند (۱۳). از مدل‌های ET مبتنی بر سنسور از دور حرارتی نیز بسیار بهره‌برده شده است. این مدل‌ها می‌توانند ET لحظه‌ای را در زمان عبور ماهواره محاسبه کنند (۱۴). فخر و کاویانی (۲۰۲۴) از پایگاه داده $WaPOR$ برای ET_p در کل ایران شامل ۱۶ استان در چهار منطقه اقلیمی استفاده کردند. آن‌ها ضمن مقایسه محاسبات با روش $FAO-56$ نتیجه گرفتند استفاده از مدل $WaPOR$ نتایج قابل‌قبولی را برای مدیریت و ارزیابی مصرف آب در مناطق و اقلیم‌های مختلف ایران به‌ویژه در اراضی کشاورزی ارائه می‌دهد (۱۵). گاهی اندازه‌گیری تبخیر از تشت و محاسبه میزان آب تبخیرشده در یک دوره معین به‌عنوان یک شیوه برآورد غیرمستقیم تبخیر و تعرق استفاده شده است. در این حالت مقادیر اندازه‌گیری شده به‌عنوان نماینده‌ای از ET با لحاظ کردن ضریب تشت در نظر گرفته می‌شود (۱۶). در دو دهه اخیر، استفاده از روش‌های فراکاوی مثل شبکه‌های عصبی مصنوعی (۱۷) برای تخمین تبخیر-تعرق مورد توجه

پژوهش‌گران قرار گرفته است. در حوضه‌های آبریز، شناخت الگوی تغییرات ET به کشاورزان و مدیران منابع آب کمک می‌کند تا برنامه‌ریزی بهینه‌ای برای آبیاری داشته باشند ژائو و همکاران (۲۰۲۳) دو روش برآورد ET را برای برنامه‌ریزی آبیاری مبتنی بر داده خودکار استفاده کردند و در هر دو پتانسیل بالای صرفه‌جویی در مصرف آب و بهبود تصمیم‌گیری آبیاری را گزارش کردند (۱۸). این اطلاعات می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌ها و بهبود راندمان مصرف آب شود. هم‌چنین با شناسایی مناطق و زمان‌هایی که ET بالاست، می‌توان تصمیمات بهتری در موردحفاظت از منابع آب اتخاذ کرد (۱۹). نگرش دیگر به تغییرات در الگوهای ET است که می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات اقلیمی باشد (۲۰). اطلاعات دقیق درباره ET به مدل‌سازی بهتری برای تغییرات اقلیمی در مقادیر حدی کمک می‌کند و می‌تواند به تصمیم‌گیری در مورد پیشگیری از سیلاب و مدیریت بحران کمک کند (۲۱). سویی و همکاران (۲۰۲۴) برای مدل‌سازی و تحلیل سیل شدید در پاکستان، مدل جهانی تبخیر آمستردام ($GLEAM^1$) را به کار گرفتند (۲۲). اکان و همکاران (۲۰۲۴) ET_p را یکی از ورودی‌های اساسی در مدل‌های هیدرولوژیکی دانستند و برای تحلیل‌های خشک‌سالی به کار بردند (۲۳). در تعاریف کاربردی خشک‌سالی با تعیین بعضی متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی، مثل بارش یا ET_p سعی در برآورد اثرات بالقوه، مانند محدودیت در رشد گیاهان شده است (۲۴) که از آن به خشک‌سالی کشاورزی هم یاد گردیده است (۲۵). نماگرهای زیادی در دهه‌های اخیر برای خشک‌سالی استخراج شده است. شاخص دهک‌ها بر مبنای کاربرد توزیع فراوانی تجمعی بارش در یک ایستگاه ساخته شده و توسط پژوهش‌گران استرالیایی استفاده می‌شود (۲۶). ET بخشی از چرخه

آب طبیعی است و تغییرات آن می‌تواند بر سلامت اکوسیستم‌ها تأثیر بگذارد. شناخت این مقوله به حفظ تنوع زیستی و مدیریت زیستگاه‌ها کمک می‌کند (۲۷). ثابت شده است انجام طرح‌های توسعه‌ای بزرگ مانند پروژه‌های برق‌آبی در مقیاس بزرگ، تغییرات زیادی هم در رودخانه و هم در اکوسیستم ایجاد می‌کنند. در اثر احداث پروژه برق‌آبی در چین، دما و ET افزایش و بارش و شاخص رطوبت کاهش یافتند (۲۸). چنین پروژه‌هایی ممکن است اثرات قابل‌توجهی بر تغییرات پوشش گیاهی محلی داشته باشند. ساکسنا و همکاران (۲۰۲۴) توسعه کشاورزی و تغییرات کاربری اراضی متعاقب آن را در منطقه‌ای در غرب هند بررسی کردند. ازدیاد پوشش گیاهی، سکونتگاه‌های انسانی و حجم آب‌های سطحی و کاهش زمین‌های بایر در سراسر منطقه برای سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ باعث افزایش ET کل شده است (۲۹). تابع هارمونیک برای مدل‌سازی و تحلیل داده‌های زمانی و مکانی به‌خصوص در علوم زمین و آب استفاده می‌شود. در زمینه تخمین ET ، واکاوی هارمونیک می‌تواند به شناسایی رفتار دوره‌ای (زمانی) در داده‌های جوی و خاک کمک کنند. از تحلیل هارمونیک برای مدل‌سازی متغیرها و پدیده‌های مختلف استفاده شده است. سانگ و همکاران (۲۰۲۴) یک مولد تصادفی جدید را به‌عنوان مکمل عملی برای شبیه‌سازی دمای سطح زمین با استفاده از تبدیل هارمونیک کروی پیشنهاد کردند (۳۰). از توابع هارمونیک برای محاسبه دامنه، تغییر فاز و واریانس بارش مشاهداتی استفاده شده است (۳۱). راشینسکی و دیر (۲۰۲۳) یک ابزار جدید برای ارزیابی زمانی خشک‌سالی جریان، به نام مدل روند فصلی نوسان‌ساز هارمونیک^۲ ($HOST$) معرفی نمودند (۳۲). روش مونت‌کارلو یک فن آماری است که برای شبیه‌سازی و تحلیل پدیده‌های پیچیده با

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: محدوده پژوهش، حوضه آبریز زاینده‌رود در فلات مرکزی ایران، با مساحت بیش از ۲۶ هزار کیلومتر مربع برای مطالعات موردی در نظر گرفته شد. مناطق غربی حوضه شامل ارتفاعات زاگرس میانی و نواحی شرق حوضه را دشتهای کم‌شیب تشکیل داده‌اند. تالاب گاوخونی در انتهای رودخانه زاینده‌رود با طولی بیش از ۴۰۰ کیلومتر قرار دارد. خلیلی و همکاران (۲۰۲۲)، طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن را با هدف ارزیابی بوم‌شناختی، ارزیابی کردند و نقشه‌های پهنه‌بندی اقلیمی ایران را با این روش توسعه داده‌شده ارائه کردند (۳۸). براساس طبقه‌بندی دومارتن حدود ۵۳ درصد از سطح حوضه زاینده‌رود دارای اقلیم خشک و ۳۶ درصد از آن نیمه‌خشک است. زیرحوضه قلعه‌شاهرخ در بالادست حوضه زاینده‌رود، دارای اقلیم مرطوب و بسیار مرطوب است. میزان بارش سالانه در حوضه زاینده‌رود از حدود ۱۴۰۰ میلی‌متر در ارتفاعات کوه‌رنگ تا کم‌تر از ۱۰۰ میلی‌متر در جنوب‌شرقی حوضه متغیر است. رژیم بارش حوضه بالادست، مدیترانه‌ای و بیشینه بارش از ژانویه تا مارس به وقوع می‌پیوندد (۳۹). وقوع متناوب سال‌های خشک، نرمال و تر در حوضه زاینده‌رود از یک‌طرف و هم‌چنین تقاضای بسیار بالای آب از طرف دیگر، لزوم دقت زیاد در برنامه‌ریزی منابع آب و برآورد تقاضا را دوچندان می‌کند. از این‌رو، این حوضه به‌عنوان محدوده مطالعاتی برای موضوع پژوهش حاضر انتخاب شد. شکل ۱، موقعیت حوضه آبریز و ایستگاه‌های اندازه‌گیری دمای هوا به تفکیک ایستگاه‌های سینوپتیک و تبخیرسنجی و هم‌چنین ایستگاه‌های باران‌سنجی را نشان می‌دهد.

منابع داده: داده‌های بیشینه و کمینه دمای روزانه برای تعداد ۳۰ ایستگاه داخل و مجاور حوضه آبریز

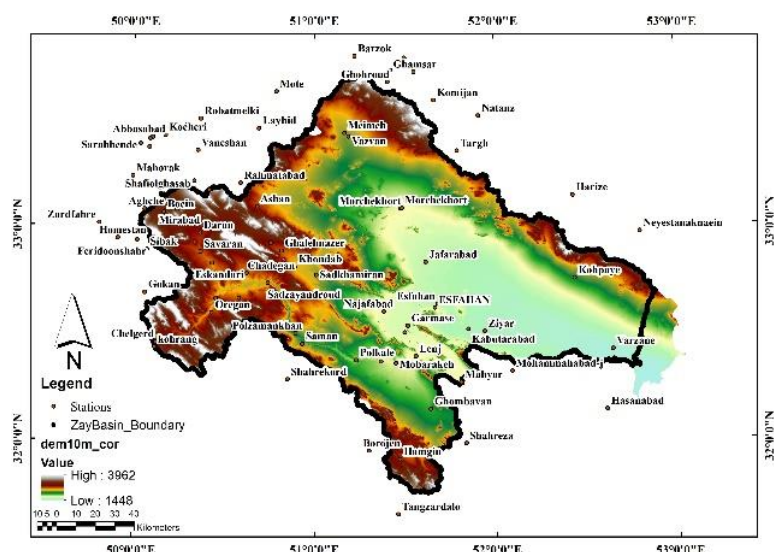
تکرارهای فراوان استفاده می‌شود. جوادی و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از یک مدل تصادفی که شامل روش مونت‌کارلو بود، تغییرات احتمالی در الگو و احتمال وقوع بارش و دمای هوا در ایران را بررسی کردند و نشان دادند در آینده عملکرد گندم دیم و آبی و برنج کاهش خواهد یافت (۳۳). این روش به‌ویژه در پیش‌بینی و تخمین تغییرات آبی ET بسیار مؤثر است (۳۴).

به‌طورمعمول در مدل‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای تحلیل ریسک و پیش‌بینی، تعداد استخراج‌ها از توزیع فراوانی مشخص‌کننده مدل، ناکافی است یا فقط به یک مورد محدود می‌شود، بنابراین لازم است که اجرای شبیه‌سازی بارها تکرار شود تا توصیف آماری کاملی از متغیرهای مدل به دست آید (۳۵). با این‌حال به‌جای تکرارهای دقیق یا مستقیم، اصطلاح تکرارهای نزدیک^۱ ترجیح داده می‌شود، زیرا در حال حاضر چیزی به نام تکرار دقیق وجود ندارد (۳۶). به‌نظر نمی‌رسد تاکنون توافق نظری بر روی یک استاندارد پذیرفته‌شده برای تعیین تعداد تکرار مناسب وجود داشته باشد (۳۷). هدف از پژوهش حاضر، ارائه یک شیوه سازمان‌یافته براساس ترکیب روش‌های استوکستیک، تحلیل هارمونیک و مونت‌کارلو برای پیش‌بینی الگوی تغییرات زمانی و مکانی ET_p در حوضه آبریز زاینده‌رود برای دوره بلندمدت ۱۰۰ ساله است که می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان منابع آب و کشاورزی در این حوضه قرار گیرد. تولید نقشه هم ET_p حوضه زاینده‌رود برای شرایط خشک‌سالی ملایم، نرمال و ترسالی ملایم و در ماه‌های مختلف با تلفیق روش‌های هارمونیک، استوکستیک و تکرار شبیه‌سازی مونت‌کارلو و هم‌چنین پیشنهاد شاخص صدک‌ها برای طبقه‌بندی خشک‌سالی از نوآوری‌های این پژوهش است.

1- Exact Repetition and Close Repetition

ایستگاه‌های سینوپتیک اصفهان، کبوترآباد و شرق اصفهان با ۲۶ سال طولانی‌ترین دوره آماری را دارند. داده‌های گمشده با استفاده از الگوریتم مولد آب‌وهوا، که نمونه آن در نرم‌افزار SWAT هم به کار گرفته شده است، بازسازی شد.

زاینده‌رود از ایستگاه‌های هواشناسی وزارت نیرو و وزارت راه و شهرسازی از ابتدای ۱۹۹۴ تا پایان سال ۲۰۱۹ جمع‌آوری شد. در جدول ۱، نام هر ایستگاه موقعیت آن و دوره آماری موردبررسی آورده شده است. در دوره یادشده، ایستگاه تبخیرسنجی دامنه‌فریدن کوتاه‌ترین دوره آماری را با ۸ سال و



شکل ۱- نقشه موقعیت حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود و ایستگاه‌های اندازه‌گیری دما.

Figure 1. Location map of Zayandehrud River Basin and the temperature measurement stations.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی دارای اندازه‌گیری بیشینه و کمینه دمای هوای روزانه.

Table 1. Characteristics of meteorological stations with maximum and minimum daily temperature measurements.

ردیف	ایستگاه	شناسه	عرض	طول	ارتفاع (متر)	سال شروع	سال پایان	طول دوره
Row	Stations	Code	Geographical Latitude	Geographical Longitude	Altitude (m)	Start Year	End Year	Data length (years)
1	Esfahan	40800	32-31-04	51-42-25	1549	1994	2019	26
2	Shargh Esfahan	40802	32-44-42	51-51-46	1541	1994	2019	26
3	Kabutarabad	40803	32-30-54	51-50-02	1541	1994	2019	26
4	Daran	40787	32-59-17	50-24-25	2323	1994	2019	26
5	Shahreza	40815	31-58-55	51-48-36	1856	1994	2019	26
6	Najafabad	99497	32-36-14	51-23-20	1634	1994	2019	26
7	Mobarakeh	99506	32-21-32	51-27-03	1678	1994	2019	26
8	PolZamankhan	42009	32-29-56	50-53-43	1864	2003	2016	14
9	Tiran	42014	32-42-12	51-09-21	1890	2003	2011	9
10	Khundab	42537	33-08-18	50-53-26	1997	2004	2018	15
11	DamaneFraidan	42004	33-01-06	50-29-42	2388	2003	2010	8

ادامه جدول ۱-

Continue Table 1.

ردیف Row	ایستگاه Stations	شناسه Code	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	ارتفاع (متر) Altitude (m)	سال شروع Start Year	سال پایان End Year	طول دوره Data length (years)
12	ZefreFalavarjan	42017	32-30-07	51-29-55	1624	2003	2018	16
13	SadZayandehroud	42007	32-44-07	50-44-31	2140	2003	2018	16
14	SadKhamiran	42463	32-46-16	51-00-36	1996	2007	2018	12
15	GhaleShahrokh	42003	32-39-46	50-27-11	2085	2003	2018	16
16	Kuhpayeh	42032	32-45-03	52-26-22	1878	2003	2018	16
17	MohammadabadJarguye	42932	32-19-10	52-05-28	1603	2003	2018	16
18	Murchehort	42024	33-04-42	51-28-50	1670	2003	2018	16
19	Mahyar	42042	32-16-09	51-48-32	1663	2003	2018	16
20	Vazvan	42022	33-25-03	51-29-10	1982	2003	2018	16
21	Hunejan	42988	31-37-07	51-52-25	2363	2009	2018	10
22	Kuhrang	40797	32-27-25	50-07-30	2329	1994	2015	22
23	Meymeh	99447	33-27-07	51-10-30	2012	1999	2015	17
24	Zarrinshahr	99507	32-23-56	51-22-37	1717	2005	2015	11
25	Golpayegan	99417	33-28-07	50-17-01	1870	1994	2015	22
26	IzadKhast	99516	31-31-48	52-07-44	2184	1999	2016	18
27	Fereidunshahr	99489	32-56-24	50-07-40	2547	2004	2014	11
28	Saman	99504	32-27-07	50-54-39	1967	2003	2015	13
29	Shahrekord	40798	32-19-41	50-51-10	2065	1994	2015	22
30	Borujen	99459	31-57-50	51-17-34	2235	1994	2015	22

هم‌چنین با استفاده از نمودار جعبه‌ای^۱ شناسایی داده‌های پرت انجام شد. در نمودار جعبه‌ای، نقاط خارج از محدوده معمول (بیش‌تر از ۱/۵ برابر دامنه بین چارک‌ها) به‌عنوان داده‌های پرت شناسایی گردید (۴۰).
روش پژوهش: در این مطالعه به‌منظور تحلیل الگوی تغییرات مکانی و زمانی ET_p در حوضه زاینده‌رود و بررسی تغییرات آن در دوره‌های خشک، نرمال و تر، از تحلیل هارمونیک، روش‌های استوکستیک و مونت‌کارلو استفاده شد. داده‌های جمع‌آوری‌شده ابتدا با استفاده از نرم‌افزارهای آماری تحلیل شدند. سپس به کمک توابع هارمونیک شبیه‌سازی انجام شد.

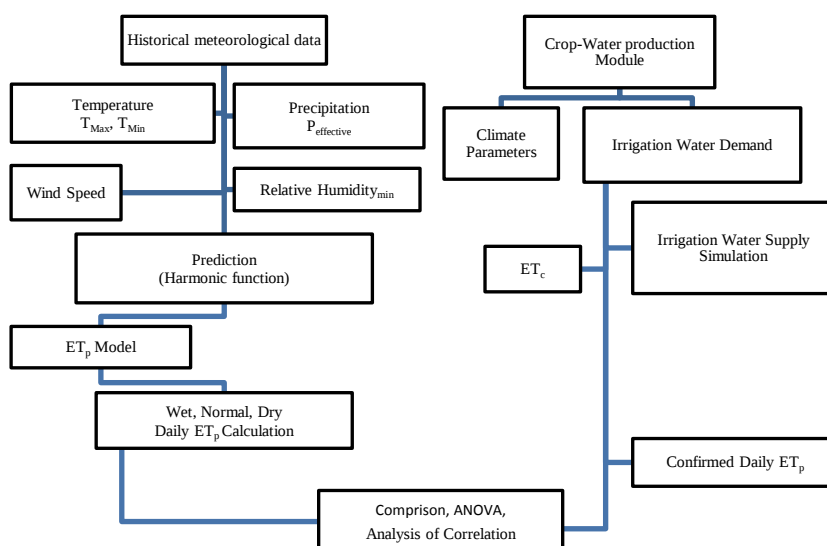
1- Box Plot

بدین ترتیب، امکان پیش‌بینی متغیرها برای آینده فراهم می‌گردد. در این پژوهش پارامترهای تصادفی الگو، شناسایی و برای یک دوره بلندمدت بازتولید شدند. سری‌های بیشینه و کمینه درجه‌حرارت که برای دوره بلندمدت تولید شدند، برای یک شبکه از نقاط به ابعاد ۵ کیلومتر در ۵ کیلومتر درونیابی شد. سپس ET_p برای هر گره با مدل هارگریوز- سامانی (۱۹۸۵) محاسبه گردید. در ادامه با استفاده از ابزارهای نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) توزیع مکانی و زمانی ET_p به‌صورت نقشه‌های هم مقدار^۲ ارائه شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اعتبارسنجی از نتایج

2- Isopleth maps

مبانی نظری پژوهش: به‌طور عمومی دمای هوا را می‌توان به‌صورت یک تابع تناوبی تعریف کرد (۴۱) و از دیرباز توابع هارمونیک برای مدل کردن داده‌های اقلیمی دارای تناوب استفاده شده‌اند و اغلب نتایج مناسبی داشته است (۴۲). در سال‌های اخیر هم برای متغیرهای مختلف اقلیمی از جمله بارندگی در عربستان (۴۳) و اتیوپی (۳۱) و دمای هوا در هنگ‌کنگ (۴۴) از این روش استفاده شده است.

مدل شبیه‌ساز گیاهی در نواحی آبیاری بهره گرفته شد تا ET_p تأیید شده در نواحی آبیاری با ET_p روش تلفیقی پژوهش حاضر مقایسه شود. همچنین آزمون‌های آماری مانند ANOVA برای بررسی تفاوت‌های معنادار میانگین‌های ET_p در مقیاس‌های زمانی مختلف (روزانه، ماهانه و فصلی) استفاده شد. مدل مفهومی شیوه تلفیقی ارائه شده و مدل شبیه‌سازی رشد گیاه حوضه رودخانه زاینده‌رود براساس ضریب گیاهی دوجزئی (به‌صورت کد رایانه‌ای) در شکل ۲، نمایش داده شده است.



شکل ۲- مدل مفهومی روابط بین ET_p محاسباتی از مدل تلفیقی با ET_p تایید شده مدل شبیه سازی گیاهی در حوضه رودخانه زاینده‌رود.

Figure 2. Conceptual model of relationships between ET_p calculated from the hybrid model and ET_p confirmed by the plant simulation model in Zayandehrud river basin.

$$\bar{T}(t)_j = \left[a_{n,j} + b_{n,j} \cdot \cos \left(2n\pi \frac{t - c_{n,j}}{365} \right) \right], \quad (1)$$

$$t = 1, 2, \dots, 365$$

که در آن، t شماره روز، j متغیر هواشناسی که ۱ برای بیشینه دمای هوا و ۲ برای کمینه دمای هوا در نظر گرفته شد. $a_{n,j}$ متوسط سال n ام متغیر j ، $b_{n,j}$ دامنه یا فاصله بین بیشینه مقدار متغیر تا متوسط سالانه در n امین سال، $c_{n,j}$ شماره روز وقوع حداکثر مقدار

توابع سینوس و کسینوس را می‌توان برای مدل‌سازی نوسانات در داده‌های دما در طول سال استفاده کرد. تابع هارمونیک به‌کار گرفته شده در پژوهش حاضر به‌صورت رابطه ۱ نوشته شد. این رابطه به راحتی از توصیف سیگنال تناوبی سری فوری می‌تواند به صورت مجموع توابع سینوس و کسینوس یا یکی از آن‌ها نوشته شود (۴۵).

$$z = \rho x_1 + \sqrt{(1 - \rho^2)} x_2 \quad (3)$$

در این صورت همبستگی اعداد تصادفی x_1 و z با ضریب همبستگی ρ نشان داده می‌شود. تاکنون مولدهای زیادی برای تولید اعداد تصادفی توسط رایانه توسعه داده شده است که از الگوریتم‌های مختلفی استفاده می‌کنند (۴۶). اعداد تولید شده درواقع شبه‌تصادفی^۶ هستند و در این پژوهش تفاوت آن‌ها با اعداد تصادفی نادیده گرفته شد. مدل پیش‌بینی دمای هوای روزانه با روش استوکستیک طبق رابطه ۴ پیشنهاد گردید (۴۸).

$$T_i = \bar{T} + r_1(T_{i-1} - \bar{T}) + t\sigma_T(1 - r_T^2)^{1/2} \quad (4)$$

$i=1,2,\dots,365$

که در آن، T_i دمای هوای روز جاری، T_{i-1} دمای هوای روز قبل، $\bar{T}$ متوسط دمای هوای روزانه، r_1 ضریب همبستگی با تاخیر یک روزه یا همان Lag-1 ، σ_T انحراف معیار دمای هوای روزانه و t متغیر تصادفی استاندارد نرمال مستقل است. ارزیابی روش‌های درونیابی مختلف نشان داد که روش بسیار سریع و ساده درونیابی وزندهی معکوس فاصله^۷، زمانی که هدف یافتن یک نمای کلی از توزیع فضایی ET_p باشد، به‌خصوص زمانی که مکان‌های نمونه‌گیری پراکنده هستند، به اندازه کافی دقیق است (۴۰). طبق فرض اساسی این روش، افزایش فاصله باعث کاهش تأثیر پارامترها در برآورد می‌شود. به‌منظور پیش‌بینی در موقعیت‌های فاقد اندازه‌گیری، عامل وزن که بر مبنای فاصله از نقاط دارای اندازه‌گیری است، محاسبه می‌شود. رابطه ۵ در این روش برای میان‌یابی به‌کار برده شد.

متغیر در سال n ام و $\bar{T}(t)_j$ مقدار متوسط روزانه متغیر در طول دوره آماری است. شماره روز در ابتدای یک سال میلادی از یک شروع می‌شود. مقادیر دقیق $a_{n,j}$ و $b_{n,j}$ برای هر سال از یک بهینه‌سازی محاسبه می‌شود. به‌این‌ترتیب $\bar{T}(t)_j$ برای همه روزهای دوره آماری پژوهش قابل محاسبه است. به‌منظور تولید اعداد تصادفی با توزیع نرمال $N(\mu, \sigma)$ ، ابتدا باید مجموعه‌ای از اعداد تصادفی که دارای توزیع نرمال استاندارد $N(0,1)$ هستند را تولید کرده و با کمک رابطه خطی (رابطه ۲) به اعداد تصادفی نرمال با میانگین μ و انحراف معیار σ تبدیل کرد.

$$N(\mu, \sigma) = \sigma N(\mu, \sigma) + \mu \quad (2)$$

یک روش ساده تولید اعداد تصادفی با توزیع نرمال استاندارد، استفاده از قضیه حد مرکزی و اعمال آن به مجموعه n متغیر تصادفی U_i دارای توزیع یکنواخت در بازه $[0,1]$ است. تولید اعداد تصادفی همبسته با روش‌های گوناگونی صورت می‌پذیرد. برای تولید یک جفت متغیر تصادفی مستقل با توزیع نرمال استاندارد می‌توان از روش باکس مولر^۱ استفاده کرد (۴۶). روش‌هایی مثل تجزیه چولیسکی^۲، تجزیه مقدارهای منفرد^۳، مدل‌های خطی از پیش تعیین شده^۴ و تبدیل باکس مولر^۵ برای تولید اعداد تصادفی همبسته به‌کار می‌روند (۴۷). در پژوهش حاضر از مدل خطی رابطه ۳ برای اعداد تصادفی با همبستگی استفاده شد. به‌عبارتی ابتدا x_1 و x_2 دو سری زمانی از اعداد تصادفی با توزیع نرمال ولی غیرهمبسته تولید می‌شوند. در ادامه سری زمانی z ، که براساس رابطه ۳ ساخته می‌شود با سری x_1 همبسته است.

- 1- Box and Muller, 1958
- 2- Cholesky decomposition
- 3- Singular Value Decomposition
- 4- Prespecified Linear Models
- 5- Box-Muller transform

6- Pseudo Random
7- Inverse Distance Weighting

برای نقطه فاقد اندازه‌گیری است (۲۶). ET_p با روش هارگریوز- سامانی در ابتدا توسط هارگریوز در ۱۹۷۵، برای ۸ سال در فصل سرد آلتا^۱ در ایالت کالیفرنیا استخراج شد. سپس روابط اصلی اصلاح گردید و در نهایت رابطه ۶ ارائه شد (۲۰):

$$ET_p = 0.0023 \frac{1}{\lambda} R_a (\bar{T}_{avg} + 17.8)(T_{Max} - T_{Min})^{0.5} \quad (6)$$

۲۰ درجه سانتی‌گراد برابر $(\frac{mJ}{kg})$ ۲/۴۵ می‌باشد. در برخی محاسبات، از ضرب مقدار $\frac{1}{\lambda} = 0.408$ برای بیان انرژی ورودی هوا در واحد زمان و تبدیل مگاژول بر مترمربع در روز به میلی‌متر در روز استفاده می‌شود. همچنین برای محاسبه R_a برای هر روز از رابطه ۷ مندرج در گزارش سازمان جهانی خواربار و کشاورزی ملل متحد^۲ (FAO) استفاده شد.

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{SC} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (7)$$

طول یک سال، یک تابع درجه شش برازش داده شد و با استفاده از آن و محاسبه مقادیر روزانه تابع برازش داده شده پارامترهای تابع هارمونیک (a، b و c) در دوره دارای آمار استخراج شد. متوسطی از پارامترهای تابع هارمونیک در دوره آماری برای هر ایستگاه در جدول ۲ و برای دو متغیر بیشینه و کمینه دمای هوای روزانه گزارش شده است. در گام دوم، با داشتن تابع هارمونیک، مقادیر پایه یا متوسط روزانه بیشینه و کمینه دمای هوا محاسبه شد. اختلاف این مقادیر با بیشینه و کمینه دمای هوای مشاهداتی، مقادیر باقی‌مانده را به دست می‌دهد. به این ترتیب امکان انتخاب بهترین توزیع آماری برازش داده شده (از بین توزیع‌های خانواده نرمال، لجستیک، گامابی، نمایی، تی‌استیودنت

$$Z_i = \frac{\sum_{i=1}^n (\frac{z_i}{d_i^m})}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{d_i^m})} \quad (5)$$

که در آن، Z_i مقدار اندازه‌گیری شده در نقطه i ام، n تعداد نقاط دارای اندازه‌گیری، d_i فاصله نقطه فاقد اندازه‌گیری تا هر یک از نقاط دارای اندازه‌گیری، m عامل توان (۲ در نظر گرفته شد) و Z برآورد مقدار

که در آن، λ گرمای نهان تبخیر (مگاژول در کیلوگرم)، ET_p تبخیر-تعرق پتانسیل (میلی‌متر در روز)، T_{Max} بیشینه دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)، T_{Min} کمینه دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)، $\bar{T}_{avg}$ میانگین دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد) و R_a تابش فرازمینی (مگاژول بر مترمربع در روز) است. گرمای نهان تبخیر برای هر روز با توجه به رابطه خطی آن با دما محاسبه شد. به‌طور کلی گرمای نهان تبخیر برای درجه حرارت

که در آن، G_{SC} ثابت خورشیدی معادل ۰/۰۸۲۰ مگاژول بر مترمربع در دقیقه، φ عرض جغرافیایی بر حسب رادیان، d_r فاصله نسبی زمین تا خورشید و δ زاویه میل خورشید بر حسب رادیان است. اگر j شماره روز فرض شود، مقدار d_r در هر روز معادل $[1 + 0.033 \cos(2\pi j / 365)]$ و مقدار δ معادل $[0.409 \sin(2\frac{\pi j}{365} - 1.39)]$ محاسبه می‌شود. همچنین ω_s زاویه ساعتی خورشید به صورت $\arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)]$ قابل محاسبه است.

روش‌ها: روش تلفیقی پیشنهادی در این پژوهش در شش گام اجرا شد. در گام اول تابع هارمونیک برای هر ایستگاه به داده‌های روزانه، برازش داده شد. به منظور برآورد مقادیر $a_{n,j}$ ، $b_{n,j}$ و $c_{n,j}$ برای هر سال از یک مازول بهینه‌ساز به صورت کد برنامه‌نویسی استفاده شد. به‌طوری‌که ابتدا به داده‌های روزانه در

1- Alta, California

2- Food and Agriculture Organization of the United Nations

و چند توزیع دیگر) به مقادیر باقی‌مانده به‌وجود آمد. براساس آزمون کلموگروف-اسمیرنف، برای همه ایستگاه‌ها، توزیع نرمال بهترین توزیع برازش داده شده به مقادیر باقی‌مانده تشخیص داده شد. در گام سوم برای متغیرهای بیشینه و کمینه دمای هوا و به‌تفکیک هر ماه مقادیر میانگین و انحراف معیار مقادیر مشاهداتی محاسبه گردید. در گام چهارم همبستگی بین بیشینه دمای هوای روزانه با مقادیر کمینه آن محاسبه شد. گام پنجم، تولید اعداد تصادفی است. برای یک دوره ۱۰۰ ساله و برای روزهای هر ماه دو سری از اعداد تصادفی با توزیع نرمال تولید شد. به‌منظور ایجاد همبستگی بین دو سری اعداد تصادفی از روش مدل خطی و استفاده از ضرایب همبستگی تولید شده در گام چهارم، استفاده شد. در ادامه، برای هر سال مقادیر پایه بیشینه و کمینه دمای هوای روزانه محاسبه گردید. با اضافه کردن جزء تصادفی به مقادیر پایه، مقادیر بیشینه و کمینه دمای هوای مطلق برای ۱۰۰ سال و به‌صورت روزانه تولید شد. جزء تصادفی مورد اشاره، حاصل ضرب انحراف معیار مقادیر روزانه متغیر در مقادیر تصادفی تولید شده است. به‌این‌ترتیب در ۳۰ ایستگاه موردبررسی، ۱۰۰ سال آمار روزانه برای بیشینه و کمینه دمای هوا تولید گردید. در گام ششم، با روش هارگریوز-سامانی مقادیر ET_p روزانه برای ۱۰۰ سال در هر ایستگاه تولید شد. سپس با به‌کارگیری روش درونیابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)، مقادیر ET_p روزانه طی ۱۰۰ سال آمار تولید شده برای یک شبکه 5×5 کیلومترمربع در کل حوضه آبریز زاینده‌رود محاسبه گردید.

از آنجائی که توزیع داده‌های ET_p به واسطه پیوستگی داده‌ها و وجود نوسانات طبیعی در بازه‌های طولانی‌مدت، نرمال یا نزدیک به نرمال بودند به‌راحتی با نمایه‌های میانگین و انحراف معیار قابل تفسیر هستند؛ بنابراین و با فرض نرمال بودن داده‌ها از روش تعیین

صدک‌ها برای شناسایی و طبقه‌بندی وضعیت خشک‌سالی استفاده شد. مراجع معتبر زیادی از جمله سازمان هواشناسی جهانی^۱ و هیئت بین دول تغییر اقلیم^۲ از این روش استفاده کرده‌اند. به‌این‌ترتیب برای یک صد سال محاسبه ET_p در تعداد زیادی نقطه از یک شبکه گسترده در حوضه و نواحی کشاورزی و باتوجه‌به داده‌های مشاهداتی ۲۶ ساله موجود سه طبقه برای شرایط رطوبتی (خشک‌سالی ملایم، نرمال و ترسالی ملایم) پیشنهاد شد. در طبقه‌بندی شاخص صدک‌ها در این پژوهش، صدک ۲۰ درصد برای خشک‌سالی ملایم، ۵۰ درصد برای دوره نرمال و ۸۰ درصد برای ترسالی‌های ملایم لحاظ و نسبت به ترسیم نقشه پهنه‌بندی ET_p اقدام شد. به‌منظور اعتبارسنجی، مقادیر محاسباتی ET_p حاصل از روش تلفیقی در نواحی مختلف کشاورزی با مقادیر تأیید شده ET_p در مدل شبیه‌سازی رشد گیاه این نواحی به‌عنوان مقادیر مشاهداتی مقایسه شد. لازم به توضیح است مدل شبیه‌سازی رشد گیاه، تمامی محصولات الگوی کشت حوضه آبریز زاینده‌رود را مورد ارزیابی قرار داده است. باتوجه‌به مقدار آب سطحی و زیرزمینی که به نواحی آبیاری در طول سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۱ تحویل داده شده و پارامترهای کشت، واسنجی شده است. به عبارتی مقدار واقعی ET در هر ناحیه آبیاری به تفکیک محصول مشخص شده است. به‌این‌ترتیب با استفاده از ضریب گیاهی و ET واقعی می‌توان ET_p را برای دوره ۲۸ ساله پیش‌گفته در همه نواحی آبیاری استخراج کرد. این مدل براساس روش ضریب گیاهی دوجزئی و به‌صورت یک کد برنامه‌نویسی در دسترس است. از اطلاعات موجود هر یک از محصولات الگوی کشت در حوضه، اعتبارسنجی محاسبه ET_p در نواحی کشاورزی میسر است. انتخاب محصولی که در نواحی کشاورزی بیش‌تری در کل حوضه کشت

1- World Meteorological Organization

2- The Intergovernmental Panel on Climate Change

برای نواحی باریک خطی که تراکم نقاط شبکه یادشده کافی نبود، ابعاد شبکه ۱ کیلومتر در ۱ کیلومتر تعریف شد. میان‌یابی برای همه نقاط تعریف شده با روش IDW صورت گرفت و در انتها ET_p برای هر ناحیه، از روی نقاط شبکه محاسبه شد. با استفاده از روش تلفیقی برای هر ناحیه آبیاری، مقادیر ET_p درازمدت ۱۰۰ ساله به‌صورت روزانه به‌دست آمد. در این پژوهش به‌منظور اعتبارسنجی، با استفاده از روش‌های آماری، مقایسه میانگین و واریانس دو روش با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد.

می‌شود از نظر دربرداشتن گستره بیش‌تر اهمیت دارد. در این پژوهش، گندم به‌عنوان کشت زراعی غالب در حوضه انتخاب شد. این رویکرد کمک می‌کند تا تغییرات منطقه‌ای در نظر گرفته شود و قابلیت اطمینان محاسبات ET_p بهبود یابد (۲۹). به این منظور، پس از محاسبه مقادیر میانگین و واریانس ET_p محاسبه شده از مدل رشد گیاهی، سعی شد همین مقادیر از روش تلفیقی پژوهش برای دوره صدساله نیز محاسبه شود. بدین‌منظور یک شبکه از نقاط به ابعاد ۵ کیلومتر در ۵ کیلومتر در کل سطوح آبیاری حوضه ترسیم شد.

جدول ۲- پارامترهای تابع هارمونیک برای متغیرهای بیشینه و کمینه دمای هوا در ایستگاه‌های داخل و پیرامون حوضه زاینده‌رود.
Table 2. Parameters of the harmonic function for the maximum and minimum temperature variables in the stations inside and around the Zayandehrud basin.

ردیف	ایستگاه	شناسه	ضرایب هارمونیک بیشینه دمای هوای روزانه			ضرایب هارمونیک کمینه دمای هوای روزانه		
Row	Stations	Code	Harmonic Parameters (Daily T_{max})			Harmonic Parameters (Daily T_{min})		
			(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)
1	Esfahan	40800	24.378	13.4	208	9.716	11.562	193
2	Shargh Esfahan	40802	24.344	13.651	209	6.675	11.463	193
3	Kabutarabad	40803	24.511	13.451	209	7.33	10.895	193
4	Daran	40787	17.872	13.597	212	4.805	11.009	200
5	Shahreza	40815	22.474	12.863	208	7.123	10.632	192
6	NajafAbad	99497	23.903	13.258	208	9.211	11.267	195
7	Mobarakeh	99506	23.898	12.905	208	6.798	10.804	193
8	PolZamankhan	42-009	23.002	13.18	207	3.521	8.646	199
9	Tiran	42-014	23.935	13.251	212	7.307	10.798	202
10	Khundab	42-537	19.31	14.488	215	2.001	10.391	206
11	DamaneFraidan	42-004	18.515	13.632	211	1.01	10.666	203
12	ZefreFalavarjan	42-017	24.966	12.433	210	5.857	10.371	195
13	SadZayandehroud	42-007	20.18	14.397	211	4.443	11.2	206
14	SadKhamiran	42-463	21.764	13.004	209	4.384	11.429	200
15	GhaleShahrokh	42-003	20.216	13.938	213	-0.424	8.215	199
16	Kuhpayeh	42-032	22.9	13.255	208	7.238	12.661	202
17	MohammadAbadJarghuye	42-932	25.207	13.109	208	7.703	12.279	199
18	Murchekhort	42-024	24.616	13.383	216	9.589	13.295	190
19	Mahyar	42-042	24.665	12.727	208	9.327	11.766	202
20	Vazvan	42-022	21.581	13.391	212	5.008	12.082	200
21	Hunejan	42-988	20.483	12.109	206	4.96	10.025	205
22	Kuhrang	40797	16.579	14.264	213	3.158	10.294	208
23	Meymeh	99447	20.244	13.658	210	4.45	11.108	202
24	Zarrinshahr	99507	24.316	13.08	207	7.749	11.535	198
25	Golpayegan	99417	20.839	13.962	211	8.21	11.45	206
26	IzadKhast	99516	20.721	12.288	207	6.949	10.24	203
27	Fereidunshahr	99489	15.791	13.804	213	4.507	10.598	210
28	Saman	99504	20.174	13.356	210	6.589	10.089	207
29	Shahrekord	40798	20.36	13.385	211	2.605	9.299	201
30	Borujen	99459	18.91	13.071	210	3.386	9.133	201

(a) Annual Average, (b) Amplitude, (c) Position of Maximum

نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا داده‌های مشاهداتی خروجی از شبیه‌ساز رشد گیاه مورد بحث واقع شد. مقادیر ET_p در نواحی مختلف آبیاری حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود، که در این تحقیق برای اعتبارسنجی به‌کار رفته‌اند، در جدول ۳ ارائه شده‌اند. برای هر ناحیه، در کل روزهای دوره کشت گندم، مقادیر ET_p محاسبه و جمع کل دوره در هر سال گزارش شده است. چنان‌چه ملاحظه می‌شود، این مقدار طی سال‌های مختلف دوره بررسی تغییر می‌کند. سعی شد تغییرات به‌صورت طیف رنگی نشان داده شود به‌طوری که رنگ سبز کم‌ترین مقدار و رنگ قرمز بیش‌ترین مقدار را نشان دهد. مقادیر متوسط ET_p و شیب روند Sen^1 برای هر ناحیه، در انتهای جدول درج شده‌اند. برای درک بهتر شکل ۳ به‌عنوان نمونه، تغییرات ET_p در دوره ۱۹۹۴ تا ۲۰۲۱ برای رودشت جنوبی را نشان می‌دهد. در این شکل، متوسط دوره و میانگین متحرک ۳ ساله نیز ترسیم شده است تا دوره‌های خشک و مرطوب بهتر مشخص شوند. بدیهی است در سال‌هایی که میانگین متحرک بالاتر از خط میانگین واقع شده دوره خشک‌سالی تلقی می‌شود. براساس آزمون من-کندال^۲، ملاحظه می‌شود که ET_p روند افزایشی داشته است (۴۹). دین‌پژوه و همکاران (۲۰۱۱) برای مناطق مختلف در ایران نتایج مشابهی گزارش کردند (۸). از جدول ۳ نیز برای همه نواحی آبیاری حوضه چنین روندی ملاحظه شد. در ادامه به نتایج محاسباتی حاصل از روش پژوهش حاضر پرداخته شد. با استفاده از روش تلفیقی ارائه‌شده در این پژوهش، که شامل شش گام توضیح داده‌شده در بخش روش‌ها است، مقادیر ET_p برای شرایط مختلف آب‌وهوایی ترمالایم، خشک‌ملایم و

نرمال محاسبه شد. مقادیر نرمال در هر ناحیه آبیاری باید با مقادیر بلندمدت مشاهداتی جدول ۳ همخوانی داشته باشد. برای اعتبارسنجی، همبستگی بین دو مجموعه داده آماری بررسی شد. برای مقایسه میانگین‌های محاسباتی و مشاهداتی از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه علاوه‌بر همبستگی استفاده شد. نتایج هر دو آزمون یادشده در جدول ۴ درج شد. مقدار F در جدول تحلیل واریانس، به شدت از نظر آماری معنی‌دار است. نمودار پراکنش نیز ضریب تعیین ۰/۹۷ و برقراری رابطه خطی دو متغیر را تأیید نمود. تحلیل واریانس یک‌طرفه برای ۱۹ ناحیه آبیاری نشان می‌دهد به جز دو ناحیه مهیار و چادگان میانگین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی برای بقیه نواحی تفاوت معنی‌داری ندارند. به‌خاطر حجم زیاد جدول، نتایج به‌عنوان نمونه برای رودشت جنوبی آورده شد. مقادیر مشاهداتی برای ۲۸ سال و مقادیر محاسباتی یک‌صد سال آمار دارند. علاوه بر کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر میانگین و توصیف آماری در آزمون میانگین یک‌طرفه، مقدار F و P -Value برای t که با sig نشان داده شده است، نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار میانگین‌هاست.

در نواحی آبیاری و در دوره کشت گندم، اختلاف مقادیر ET_p مشاهداتی در دوره ۲۸ ساله با مقادیر نرمال محاسبه شده از آمار صدساله تولید شده در شکل ۴، آورده شد. حداکثر اختلاف در شبکه برخوار با ۲۵ میلی‌متر و کم‌ترین آن در شبکه چپ نکوآباد با ۰/۹ میلی‌متر است. مقادیر ET_p به روش تلفیقی می‌تواند تحلیل مناسبی از تغییرات مکانی و زمانی حوضه را ارائه دهد. تغییرات این مقادیر در مناطق مختلف حوضه را می‌توان از جنبه‌های گوناگون بررسی نمود.

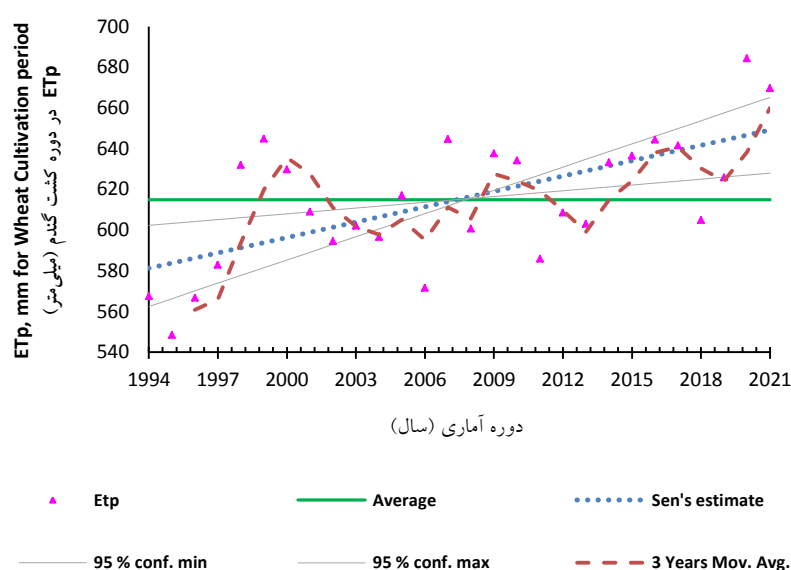
1- Sen's Slope Estimator

2- Mann-Kendall Test

جدول ۳- تغییرات ET_p در نواحی مختلف آبیاری حوضه زاینده‌رود در دوره کشت گندم با مدل گیاهی و استفاده از داده‌های مشاهداتی (۱۹۹۴-۲۰۲۱).

Table 3. Potential evapotranspiration variations in different irrigation zones of Zayandehrud basin during wheat cultivation period using plant simulation model and observational data (1994-2021).

فریدن Farydoon shahr	نکوباد راست Nekouabad right	مهبیار جرقویه Mahyar and Jarghoyeh	لنجان Lenjanat	پایین دست Nekouabad left	چادگان Chadegan	کرون پایین دست Karvan downstream Khamiran	کرون بالا دست Karvan upstream Khamiran	بک‌خار Borkhar	آبشار چپ Abshar left	آبشار راست Abshar right	رودشت شمالی Roodasht north	رودشت جنوبی Roodasht south	تاریخ Date
746	702	694	696	692	674	733	720	621	614	611	576	567	1994
752	710	695	704	702	675	733	708	607	598	595	556	548	1995
748	722	711	716	712	672	708	684	630	622	619	577	567	1996
756	745	732	739	736	681	747	723	641	635	633	594	583	1997
860	797	785	791	788	771	721	699	699	692	689	644	632	1998
842	815	801	810	807	764	743	721	707	704	704	658	645	1999
809	794	780	788	785	736	751	728	695	690	690	643	630	2000
786	782	768	776	773	716	751	725	675	674	674	624	609	2001
823	767	768	764	757	747	734	713	642	639	641	602	595	2002
789	774	778	773	766	745	776	737	655	647	644	610	602	2003
785	759	770	755	747	731	754	714	640	642	641	605	597	2004
817	787	768	786	780	764	774	730	663	665	665	625	617	2005
759	739	744	737	732	704	774	732	613	613	612	579	572	2006
842	814	813	814	811	806	748	705	691	688	685	653	645	2007
781	770	769	771	766	734	764	740	641	631	630	607	601	2008
834	808	799	809	803	796	770	739	684	677	675	646	638	2009
831	822	813	821	813	796	768	746	681	681	680	645	634	2010
784	758	755	759	750	757	772	747	628	628	629	595	586	2011
814	782	767	783	773	780	721	714	657	656	654	619	609	2012
794	779	783	779	769	763	754	747	640	640	636	613	603	2013
839	808	810	808	798	802	754	748	671	672	662	643	633	2014
858	808	816	807	796	790	743	739	671	670	664	645	636	2015
881	811	822	810	800	819	738	730	683	684	680	653	644	2016
891	819	836	816	807	825	732	721	681	683	681	651	642	2017
826	760	783	757	747	758	721	711	637	635	631	614	605	2018
806	780	778	768	757	728	763	758	675	671	672	632	626	2019
890	837	832	825	813	812	759	742	739	728	728	689	684	2020
860	828	821	824	818	776	776	760	725	714	713	676	670	2021
814	781	778	778	771	754	749	728	664	661	659	624	615	Average
3.63	2.79	3.27	2.73	2.53	3.92	0.72	1.47	1.84	1.91	1.83	2.45	2.52	Sen's slope estimate



شکل ۳- مقادیر ET_p ، میانگین متحرک و شیب Sen سری زمانی داده‌ها.
Figure 3. ET_p values, moving average and Sen slope of the data time series.

تا ۱۶۴۴ میلی‌متر در سال است. همین تغییرات برای شرایط ترسالی ملایم در نواحی کوهستانی از ۱۲۷۶ تا ۱۴۶۰ و در دشت‌ها از ۱۴۹۱ تا ۱۵۸۳ میلی‌متر در سال تخمین زده شده است. شکل ۵-الف، مدل رقومی ارتفاعی حوضه را نشان می‌دهد. در حوضه زاینده‌رود ارتفاعات در غرب و نواحی مسطح و کم‌شیب در شرق حوضه واقع شده‌اند. شکل‌های ۵-ب تا ۵-د، پهنه‌بندی ET_p را در کل حوضه در شرایط مختلف آب‌وهوایی نشان می‌دهد. افزایش مقادیر ET_p از غرب به شرق و تغییرات آن در گستره حوضه در این شکل، دیده می‌شود. شکل ۵-ه، تغییرات ET_p را در هر زیرحوضه و برای شرایط مختلف ترسالی ملایم، نرمال و خشک‌سالی ملایم نشان می‌دهد. علاوه بر الگوهای مکانی در کل حوضه، پرداختن به مدل‌های زمانی هم نتایج کاربردی را در بر دارد. تغییرات ماهیانه ET_p در شرایط نرمال مورد بررسی قرار گرفت. چنانچه در شکل ۶-الف نیز نشان داده شده است، در ژوئیه (اواخر تیرماه و اوایل مردادماه) بیش‌ترین مقدار

یکی از مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار، پستی و بلندی‌های منطقه است (۵۰) که باعث تغییرات دمای هوا، سرعت باد، رطوبت نسبی و غیره می‌شود. با در نظر گرفتن ارتفاعات در بیش از نصف هر یک از سی زیرحوضه به‌عنوان کوهستان، کل حوضه به نواحی دشت و کوهستان تقسیم شد و تفاوت میانگین ET_p در این نواحی بررسی شد. جدول ۵ تحلیل ANOVA را به‌صورت یک‌طرفه برای تعیین تفاوت معنی‌دار میانگین‌ها نشان می‌دهد. در نواحی کوهستانی، ET_p در شرایط نرمال بین ۱۲۹۹ تا ۱۵۱۵ میلی‌متر در سال تغییر می‌کند، این درحالی است که در مناطق مسطح شرقی تغییرات ET_p از ۱۵۲۴ تا ۱۶۰۹ میلی‌متر در سال است. در این جدول دامنه تغییرات در شرایط خشک و تر ملایم نیز درج شده است. علاوه بر جدول یادشده، این تغییرات در بخش‌های الف تا د شکل ۵، دیده می‌شود.

در شرایط خشک ملایم، تغییرات ET_p در نواحی مرتفع از ۱۳۲۰ تا ۱۵۴۰ و در نواحی مسطح از ۱۵۴۷

ET_p معادل ۲۳۰ میلی‌متر در ماه و در ژانویه (اواخر دی و اوایل بهمن) کم‌ترین مقدار ET_p معادل ۴۲ میلی‌متر در ماه رخ می‌دهد. در این شکل، تغییرات مکانی در هر ماه قابل مشاهده است. کولینز و همکاران (۲۰۲۱) تأیید کردند بیش‌ترین ضریب تغییرات در ماه‌های سرد سال با کم‌ترین ET_p و بیش‌ترین آن در ماه‌های گرم سال رخ می‌دهد (۵۱). در شکل ۶-ب، تغییرات دمای هوای بیشینه در ایستگاه سینوپتیک اصفهان برای سال ۱۹۹۴ به منظور درک بهتر تغییرات دمای هوا ترسیم و تابع هارمونیک برازش داده شده به دمای هوا مشخص شده است.

تغییرات روزانه ET_p در دوره کشت گندم در شبکه آبیاری رودشت جنوبی نیز در شرایط آب‌وهوایی نرمال در شکل ۶-ج، ارائه شده است.

جدول ۴- تحلیل همبستگی و تحلیل واریانس یک‌طرفه مقادیر ET_p روش تلفیقی با مقادیر حاصل از داده‌های مشاهداتی.

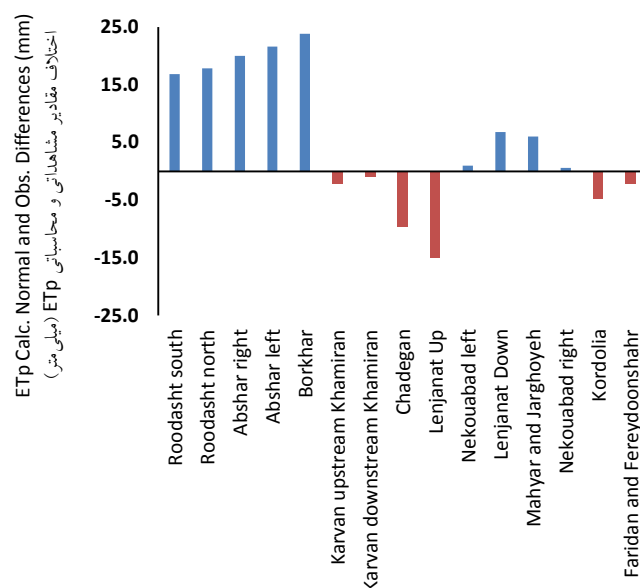
Table 4. Correlation analysis and one-way ANOVA analysis of ET_p values of the hybrid method with values obtained from observational data.

obtained from observational data.						
آنالیز همبستگی Correlation ANOVA ^a		مجموع مربعات Squares Sum of	درجه آزادی df	میانگین مربعات Square Mean	آماره F	آماره Sig.
1	Regression	148213.3	1	148213.3	563.1	0.000 ^b
	Residual	4474.5	17	263.2		
	Total	152687.9	18			

^a Dependent Variable: ET_p _Hybrid_Calc

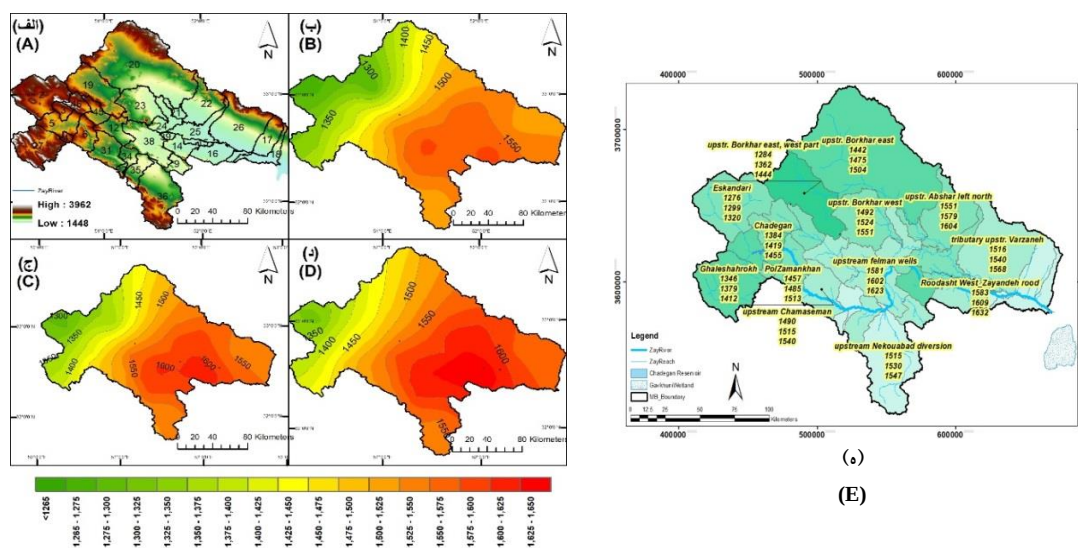
^b Predictors: (Constant), ET_p _Simulation_Obs

آنالیز واریانس یک‌طرفه One-Way ANOVA Descriptives		تعداد N	میانگین Mean	انحراف معیار Std. Deviation	خطای استاندارد Std. Error	فاصله اطمینان		کمینه Minimum	بیشینه Maximum
						95% Confidence Interval for Mean			
						Lower Bound	Upper Bound		
South Roodasht	Obs	28	615.0	32.0	6.0	602.6	627.4	548.0	684.0
	Calc	100	598.2	1.3	0.1	598.0	598.5	595.0	601.0
	Total	128	601.9	16.4	1.4	599.0	604.8	548.0	684.0
One-Way ANOVA					Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
South Roodasht	Between Groups	(Combined)			6160.045	1	6160.045	27.892	0.000
		Linear Term	Unweighted	6160.045	1	6160.045	27.892	0.000	
			Weighted	6160.045	1	6160.045	27.892	0.000	
	Within Groups					27827.837	126	220.856	
Total					33987.882	127			



شکل ۴- اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی ET_p برای نواحی آبیاری حوضه زاینده‌رود.

Figure 4. The differences between calculated and observed ET_p values for the irrigated areas of the Zayandehrud basin.



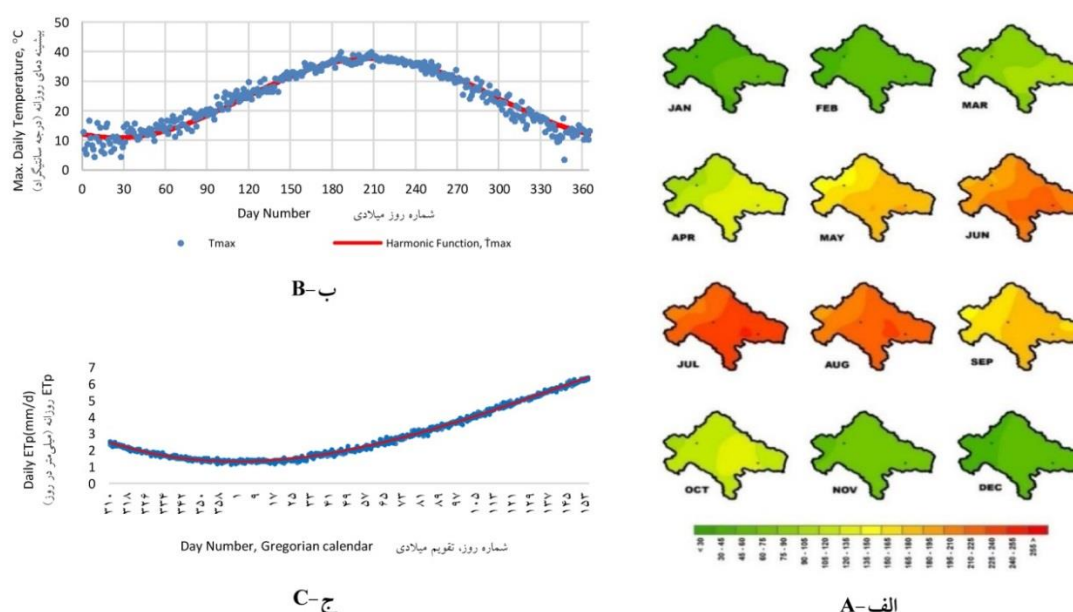
شکل ۵- ترسیم فضایی تغییرات ET_p در حوضه زاینده‌رود الف: نقشه رقومی ارتفاعی حوضه، ب: نقشه ترسیم تبخیر و تعرق بالقوه در شرایط مرطوب خفیف، ج: نقشه ترسیم تبخیر و تعرق بالقوه در شرایط عادی، د: نقشه ترسیم تبخیر و تعرق بالقوه ترسیم حوضه در شرایط خشکسالی خفیف، ه: نقشه ترسیم تبخیر و تعرق بالقوه در شرایط خشکسالی خفیف، مطالعه: برای شرایط آب و هوایی مختلف.

Figure 5. Spatial delineation of ET_p variation in zayandehrud basin A: digital elevation map of basin, B: Potential evapotranspiration delineation map in mild wet conditions, C: Potential evapotranspiration delineation map in normal conditions, D: Potential evapotranspiration delineation map in mild drought conditions, E: Potential evapotranspiration changes in sub-basins of the study area for different weather conditions.

جدول ۵- تجزیه واریانس یک‌طرفه برای بررسی تفاوت میانگین ET_p در نواحی دشت و کوهستان در شرایط آب‌وهوایی نرمال
حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود.

Table 5. One-way ANOVA analysis to investigate the difference in mean ET_p in the plains and mountainous areas under normal weather conditions of the Zayandehrud basin.

Areas under normal weather conditions of the Zayandehrud basin.										
توصیف Descriptives		تعداد N	میانگین Mean	انحراف معیار Std. Deviation	خطای استاندارد Std. Error	فاصله اطمینان 95% Confidence Interval for Mean		کمینه Minimum	بیشینه Maximum	
						Lower Bound	Upper Bound			
ETp_Dry	کوهستان Mountain	11	1454.2	60.4	18.2	1413.6	1494.8	1320.4	1539.5	
	دشت Plain	19	1596.8	32.1	7.4	1581.3	1612.2	1547.3	1643.7	
	کل Total	30	1544.5	82.3	15.0	1513.7	1575.2	1320.4	1643.7	
ETp_Normal	کوهستان Mountain	11	1422.2	62.9	19.0	1379.9	1464.5	1299.0	1515.3	
	دشت Plain	19	1573.2	28.5	6.5	1559.5	1586.9	1523.8	1609.0	
	کل Total	30	1517.8	85.7	15.6	1485.8	1549.8	1299.0	1609.0	
ETp_Wet	کوهستان Mountain	11	1389.3	68.7	20.7	1343.1	1435.4	1276.3	1490.1	
	دشت Plain	19	1548.7	25.5	5.9	1536.4	1560.9	1491.5	1583.3	
	کل Total	30	1490.2	90.2	16.5	1456.5	1523.9	1276.3	1583.3	
ANOVA		مجموع مربعات Sum of Squares		درجه آزادی df		میانگین مربعات Mean Square		آماره F	آماره Sig.	
ETp_Wet	Between Groups		141592.303		1		141592.303		72.056	0.000
	Within Groups		55020.664		28		1965.024			
	Total		196612.967		29					
ETp_Normal	Between Groups		158835.894		1		158835.894		82.056	0.000
	Within Groups		54199.349		28		1935.691			
	Total		213035.243		29					
ETp_Dry	Between Groups		176966.945		1		176966.945		84.139	0.000
	Within Groups		58891.789		28		2103.278			
	Total		235858.735		29					



شکل ۶- الگوی زمانی ET_p در حوضه زاینده‌رود الف: الگوی ماهیانه ET_p در شرایط نرمال، ب: تغییرات بیشینه دمای هوا در ایستگاه اصفهان برای سال ۱۹۹۴ و ج: تغییرات روزانه ET_p در دوره رشد گندم شبکه رودشت جنوبی.

Figure 6. Temporal pattern of ET_p in zayandehRoud basin A: Monthly pattern of ET_p in normal conditions, B: Maximum temperature variations in Esfahan station for 1994, and C: Daily variations of ET_p during the growing period of wheat in South Rudasht network.

نشان‌دهنده رفتار پیچیده زمانی و مکانی این پدیده است. نتایج نشان داد روش‌های به‌کاررفته قادر به شبیه‌سازی تغییرات زمانی و مکانی ET_p در شرایط مختلف آب‌وهوایی با دقت قابل‌قبول هستند. مقادیر ET_p به‌طور کلی از غرب حوضه (زیرحوضه قلعه‌شاه‌رخ) به سمت جنوب شرقی حوضه (مهباز و جرقویه) افزایش می‌یابد. پهنه‌بندی مکانی تفاوت حدود ۱۵۰ میلی‌متر در سال را برای ET_p در مناطق مسطح با ارتفاعات نشان داد. تغییرات زمانی روزانه و ماهیانه ET_p در حوضه آبریز مبنای مهمی برای برنامه‌ریزی منابع و مصارف از جمله نیاز و مصرف کشاورزی است. در شرایط نرمال بیش‌ترین مقدار ET_p در ژوئیه (۲۳۰ میلی‌متر) و کم‌ترین آن در ژانویه (۴۲ میلی‌متر) رخ می‌دهد. در ژوئیه تفاوت ET_p در شرایط خشک‌سالی (۲۳۴ میلی‌متر) با ترسالی (۲۲۳ میلی‌متر) بیش از ۱۰ میلی‌متر در ماه است. تغییرات زمانی و مکانی در نواحی آبیاری حوضه نیز مورد

در رودشت جنوبی، گندم حدود پانزدهم آبان یعنی ۳۰۹ امین روز سال میلادی کشت شده و در پانزدهم خرداد سال بعد یعنی ۱۵۵ امین روز سال میلادی بعد برداشت شده است، به عبارتی این دوره ۲۱۰ روز به طول می‌انجامد. ET_p روزانه از زمان کاشت تا آخرین روز ماه میلادی (پانزدهم دی‌ماه) شروع به کاهش می‌کند و پس از آن به‌صورت یک تابع محدب^۱ تا روز برداشت افزایش می‌یابد. روندها و تغییرات ET_p در دوره کشت گندم در نواحی مختلف و در شرایط متفاوت اقلیمی توسط پژوهش‌های متعددی در مناطق مختلف تأیید شده‌اند (۵۲ و ۵۳).

نتیجه‌گیری کلی

تحلیل ET_p در حوضه آبریز زاینده‌رود با تلفیقی از روش‌های هارمونیک، استوکستیک و مونت‌کارلو،

1- Convex Function

شود. به علاوه، استفاده از تلفیق روش‌ها می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها کمک کند و در زمینه برنامه‌ریزی‌های آبی و کشاورزی مؤثر واقع شود و نتیجه ارائه شده برای محاسبه موازنه کلی آب و اجرای استراتژی‌های مؤثر حفاظت از آب می‌تواند استفاده شود (۵۴).

تقدیر و تشکر

نویسندگان از سازمان هواشناسی و وزارت نیرو به‌خاطر در اختیار قرار دادن داده و اطلاعات و از دانشگاه شهرکرد که موجبات تسهیل انجام این پژوهش را فراهم نموده‌اند تشکر می‌نمایند.

داده‌ها و اطلاعات

بخشی از داده‌های این پژوهش مربوط به پایان‌نامه دکتری نویسنده اول می‌باشد و بخشی از آن با مکاتبه با وزارت نیرو و سازمان هواشناسی مهیا شد. همه داده‌ها از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی است.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این متن به شکل زیر است. نویسنده اول: آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات، تهیه پیش‌نویس مقاله، نویسنده دوم: اصلاح و نهایی‌سازی مقاله، مشارکت در آنالیزها، نظارت تحقیق، نویسنده سوم: نظارت تحقیق، نویسنده چهارم: بازبینی مقاله.

تحلیل قرار گرفت و پیش‌بینی آن در دوره‌های مختلف هواشناسی نظیر خشک‌سالی ملایم، نرمال و ترسالی ملایم بازسازی شد. در شرایط نرمال، بیش‌ترین مقدار ET_p مربوط به شبکه آبیاری نکوآباد چپ با ۱۵۵۲ میلی‌متر در سال و کم‌ترین میزان به ناحیه آبیاری فریدن و فریدون‌شهر با ۱۲۴۶ میلی‌متر در سال تعلق دارد. ET_p در شبکه‌های نکوآباد، آبشار، رودشت، کرون، برخوار و لنجانان بین ۱۵۰۰ تا ۱۵۵۲ میلی‌متر در سال است این‌درحالی است که در نواحی آبیاری دهقان، کرون پائین، شاهین‌شهر، زمان‌خان، کرون بالا، چادگان، قلعه‌شاهرخ و فریدن مقدار ET_p به‌ترتیب از ۱۴۶۵ به ۱۲۴۶ میلی‌متر در سال کاهش می‌یابد.

روش تلفیقی، درمقایسه با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه‌ها و سایر روش‌ها، امکان تحلیل دقیق‌تر الگوهای زمانی و مکانی ET_p را فراهم می‌کند. این فناوری امکان شبیه‌سازی در شرایط مختلف اقلیمی و هیدرولوژیکی را میسر می‌کند ضمن این‌که به‌خاطر استفاده از روش استوکستیک و مونت‌کارلو می‌تواند به درک بهتری از عدم قطعیت کمک کند. شاخص پیشنهادی، توانست الگوهای زمانی و مکانی ET_p را در حوضه آبریز ارائه نماید و در نواحی کشاورزی برای دوره کشت محصولات استفاده شود که از مزایای چنین نماگری است. هرچند محدودیت‌هایی از جمله پیچیدگی و طولانی بودن محاسبات قابل انکار نیست. نتایج این روش وابسته به کیفیت و دقت داده‌های ورودی است و نیاز به تفسیر تخصصی نتایج را می‌توان به‌عنوان معایب و محدودیت‌های آن دانست. این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مفید برای مدیریت منابع آب در حوضه زاینده‌رود مورد استفاده قرار گیرد و پیشنهاد می‌شود که در آینده، مطالعات بیش‌تری بر روی تأثیرات تغییرات اقلیمی و تغییر کاربری زمین بر روی الگوی ET_p انجام

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

حمایت مالی

نویسندگان مقاله در انجام این پژوهش از هیچ‌گونه حمایت مالی برخوردار نبوده‌اند.

منابع

1. Senay, G. B., Leake, S., Nagler, P. L., Artan, G., Dickinson, J., Cordova, J. T., & Glenn, E. P. (2011). Estimating basin scale evapotranspiration (ET) by water balance and remote sensing methods. *Hydrological Processes*, 25 (26), 4037-4049. <https://doi.org/10.1002/hyp.8379>.
2. Smith, M. (2000). The application of climatic data for planning and management of sustainable rainfed and irrigated crop production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103 (1), 99-108. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00121-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00121-0).
3. Liu, X., & Yang, D. (2021). Irrigation schedule analysis and optimization under the different combination of P and ETp using a spatially distributed crop model. *Agricultural Water Management*, 256, 10-89. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107084>.
4. Snyder, R. L., Moratiel, R., Zhenwei Song, Swelam, A., Jomaa, I., & Shapland, T. (2011). Evapotranspiration Response to Climate Change. *International Society for Horticultural Science*. 922, 91-98. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.922.11>.
5. Nikolaou, G., Neocleous, D., Manes, A., & Kitta, E. (2024). Calibration and validation of solar radiation-based equations to estimate crop evapotranspiration in a semi-arid climate. *International Journal of Biometeorology*, 68 (1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02566-5>.
6. Dinpashoh, Y., Jahanbakhsh-Asl, S., & Mosavi-Jahani, L. (2023). Evaluation of the three empirical models in estimation of potential evapotranspiration (Case study: Urmia Lake basin), *Water and Soil Science*, 33 (3), 21-32. **doi: 10.22034/ws.2021.46416.2419.**
7. Dinpashoh, Y., & Babamiri, O. (2020). Trends in reference crop evapotranspiration in Urmia Lake basin. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-16.
8. Dinpashoh, Y., Jhajharia, D., Fakheri-Fard, A., Singh, V. P., & Kahya, E. (2011). Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. *Journal of Hydrology*, 399 (3-4), 422-433.
9. Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1 (2), 96-99. **doi: 10.13031/2013.26773) @1985.**
10. Blaney, H. F., & Criddle, W. D. (1962). *Determining consumptive use and irrigation water requirements No. 1275*. U.S. Department of Agriculture, Beltsville.
11. Yang, Y., Shang, S., & Jiang, L. (2012). Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 164, 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.05.011>.
12. Chen, X., Yu, S., Zhang, H., Li, F., Liang, C., & Wang, Z. (2023). Estimating the Actual Evapotranspiration Using Remote Sensing and SEBAL Model in an Arid Environment of Northwest China. *Water*, 15 (8), 1555-1573. <https://doi.org/10.3390/w15081555>.
13. Mekonnen, Y. G., Alamirew, T., Malede, D. A., Pareeth, S., Bantider, A., & Chukalla, A. D. (2024). Tailoring the surface energy balance algorithm for

- land-improved (SEBALI) model using high-resolution land/use land cover for monitoring actual evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 303, 109058-109071. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109058>.
14. Xu, T., Liu, S., Xu, L., Chen, Y., Jia, Z., Xu, Z., & Nielson, J. (2015). Temporal upscaling and reconstruction of thermal remotely sensed instantaneous evapotranspiration. *Remote Sensing*, 7 (3), 3400-3425. <https://doi.org/10.3390/rs70303400>.
15. Fakhar, M. S., & Kaviani, A. (2024). Estimation of water consumption volume and water efficiency in irrigated and rainfed agriculture based on the WaPOR database in Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 15 (6), 2731-2752. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.655>.
16. Gundekar, H. G., Khodke, U. M., Sarkar, S., & Rai, R. K. (2008). Evaluation of pan coefficient for reference crop evapotranspiration for semi-arid region. *Irrigation Science*, 26, 169-175. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0083-y>.
17. Bruton, J. M., McClendon, R. W., & Hoogenboom, G. (2000). Estimating daily pan evaporation with artificial neural networks. *Transactions of the ASAE*, 43 (2), 491-496. doi: 10.13031/2013.2730) @2000.
18. Zhao, H., Di, L., Guo, L., Zhang, C., & Lin, L. (2023). An Automated Data-Driven Irrigation Scheduling Approach Using Model Simulated Soil Moisture and Evapotranspiration. *Sustainability*, 15 (17), 12908-12922. <https://doi.org/10.3390/su151712908>.
19. Christensen, L., Tague, C. L., & Baron, J. S. (2008). Spatial patterns of simulated transpiration response to climate variability in a snow dominated mountain ecosystem. *Hydrological Processes*, 22 (18), 3576-3588. <https://doi.org/10.1002/hyp.6961>.
20. Song, L., Liu, S., Kustas, W. P., Nieto, H., Sun, L., Xu, Z., ... & Li, Q. (2018). Monitoring and validating spatially and temporally continuous daily evaporation and transpiration at river basin scale. *Remote sensing of Environment*, 219, 72-88. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.002>.
21. Sun, Z., Lotz, T., & Huang, Q. (2021). An ET-based two-phase method for the calibration and application of distributed hydrological models. *Water Resources Management*, 35, 1065-1077. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02774-x>.
22. Cui, L., Meng, J., Li, Y., An, J., Zou, Z., Zhong, L., ... & Wu, G. (2024). Spatiotemporal Evolution Characteristics of 2022 Pakistan Severe Flood Event Based on Multi-Source Satellite Gravity Observations. *Remote Sensing*, 16 (9), 1601-1619. <https://doi.org/10.3390/rs16091601>.
23. Okkan, U., Fistikoglu, O., Ersoy, Z. B., & Noori, A. T. (2024). Analyzing the uncertainty of potential evapotranspiration models in drought projections derived for a semi-arid watershed. *Theoretical and Applied Climatology*, 155 (3), 2329-2346. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04817-2>.
24. Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10 (3), 111-120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>.
25. Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391 (1-2), 202-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>.
26. Gibbs, W. J., & Maher, J. V. (1967). *Rainfall deciles drought indicators*. Bureau of Meteorology. Commonwealth of Australia, Melbourne, Australia, 48-84.
27. Carpintero, E., Anderson, M. C., Andreu, A., Hain, C., Gao, F., Kustas, W. P., & González-Dugo, M. P. (2021). Estimating evapotranspiration of mediterranean oak savanna at

- multiple temporal and spatial resolutions. Implications for water resources management. *Remote Sensing*, 13 (18), 3701-3722. <https://doi.org/10.3390/rs13183701>.
28. Zhang, P., Cai, Y., Yang, W., Yi, Y., Yang, Z., & Fu, Q. (2019). Multiple spatio-temporal patterns of vegetation coverage and its relationship with climatic factors in a large dam-reservoir-river system. *Ecological Engineering*, 138, 188-199. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.016>.
 29. Saxena, D., Choudhary, M., & Sharma, G. (2024). Land use and land cover change impact on characteristics of surface evapotranspiration in semi-arid environment of Western Rajasthan, India. *Water Practice & Technology*, 19 (1), 154-169. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.222>.
 30. Song, Y., Khalid, Z., & Genton, M. G. (2024). Efficient stochastic generators with spherical harmonic transformation for high-resolution global climate simulations from CESM2-LENS2. *Journal of the American Statistical Association*, (just-accepted), 1-23. <https://doi.org/10.1080/01621459.2024.2360666>.
 31. Fetene, Z. A., Weldegerima, T. M., Zeleke, T. T., & Nigussie, M. (2018). Harmonic analysis of precipitation time series in Lake Tana Basin, Ethiopia. *Advances in Meteorology*, 2018 (1), 1598195-1598217. <https://doi.org/10.1155/2018/1598195>.
 32. Raczynski, K., & Dyer, J. (2023). Harmonic oscillator seasonal trend (HOST) model for hydrological drought pattern identification and analysis. *Journal of Hydrology*, 620, 129514-129522. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129514>.
 33. Javadi, A., Ghahremanzadeh, M., Sassi, M., Javanbakht, O., & Hayati, B. (2024). Impact of climate variables change on the yield of wheat and rice crops in Iran (application of stochastic model based on Monte Carlo simulation). *Computational Economics*, 63 (3), 983-1000. <https://doi.org/10.1007/s10614-023-10389-0>.
 34. Mundform, D. J., Schaffer, J., Kim, M. J., Shaw, D., & Thongteeraparp, A. (2011). Number of replications required in Monte Carlo simulation studies: a synthesis of four studies. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 10, 19-28. <https://doi.org/10.56801/10.56801/v10.i.520>.
 35. Cassettari, L., Mosca, R., & Revetria, R. (2012). Monte Carlo simulation models evolving in replicated runs: a methodology to choose the optimal experimental sample size. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012 (1), 463873-463884. <https://doi.org/10.1155/2012/463873>.
 36. Schmidt, S. (2009). Shall we really do it again? The powerful concept of replication is neglected in the social sciences. *Review of General Psychology*, 13 (2), 90-100. <https://doi.org/10.1037/a0015108>.
 37. Cova, F., Strickland, B., Abatista, A., Allard, A., Andow, J., Attie, M., ... & Zhou, X. (2021). Estimating the reproducibility of experimental philosophy. *Review of Philosophy and Psychology*, 12, 9-44. <https://doi.org/10.1007/s13164-018-0400-9>.
 38. Khalili, A., Bazrafshan, J., & Cheraghalizadeh, M. (2022). A Comparative study on climate maps of Iran in extended de Martonne classification and application of the method for world climate zoning, *Journal of Agricultural Meteorology*, 10 (1), 3-16. doi: 10.22125/agmj.2022.156309. [In Persian]
 39. Sabbaghi, M. A., Nazari, M., Araghinejad, S., & Soufizadeh, S. (2020). Economic impacts of climate change on water resources and agriculture in Zayandehroud river basin in Iran. *Agricultural Water Management*, 241, 106323-106345. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106323>.
 40. Naderianfar, E., Delbari, M., Afrasiab, P., & Kahkhamoghaddam, P. (2020). Comparing Different Processes for

- Mapping Reference Evapotranspiration in Iran. *Irrigation Sciences and Engineering*, 43 (3), 17-31. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.20116.1439>.
41. Steele, T. D. (1978). A simple-harmonic model for depicting the annual cycle of seasonal temperatures of streams. *US Geological Survey*, 78-155. <https://doi.org/10.3133/ofr78155>.
42. Phillips, W. F. (1984). Harmonic analysis of climatic data. *Solar Energy*, 32 (3), 319-328. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90274-3](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90274-3).
43. Tarawneh, Q. (2016). Harmonic analysis of precipitation climatology in Saudi Arabia. *Theoretical and Applied Climatology*, 124, 205-217. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1408-z>.
44. Wang, K., Li, Y., Luo, Z., Yin, S., & Chan, P. W. (2018). Harmonic analysis of 130-year hourly air temperature in Hong Kong: detecting urban warming from the perspective of annual and daily cycles. *Climate Dynamics*, 51, 613-625. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3944-y>.
45. Yang, Z. C. (2024). Data-driven discrete cosine transform (DCT)-based modeling and simulation for hourly air humidity prediction. *Soft Computing*, 28 (1), 541-563. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08297-4>.
46. L'Ecuyer, P. (2012). *Random Number Generation*. In: Gentle, J., Härdle, W., Mori, Y. (eds) *Handbook of Computational Statistics*. Springer Handbooks of Computational Statistics. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21551-3_3.
47. Babamiri, O., & Dinpajoo, Y. (2014). Comparison and Calibration of Nine Mass Transfer-Based Reference Crop Evapotranspiration Methods at Urmia Lake Basin, *Journal of Water and Soil Conservation*, 5 (21), 135-153. [In Persian]
48. Thomas, J., & B Fiering, M. (1962). Mathematical Synthesis of Streamflow Sequences for the Analysis of River Basins by Simulation. Design of Water-Resource Systems: New Techniques for Relating Economic Objectives, *Engineering Analysis and Governmental Planning*, 459-493. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674421042.c15>.
49. Talaei, P. H., Some'e, B. S., & Ardakani, S. S. (2014). Time trend and change point of reference evapotranspiration over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 116 (3-4), 639-647. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0978-x>.
50. Sun, J., Wang, G., Sun, X., Lin, S., Hu, Z., & Huang, K. (2020). Elevation-dependent changes in reference evapotranspiration due to climate change. *Hydrological Processes*, 34 (26), 5580-5594. <https://doi.org/10.1002/hyp.13978>.
51. Collins, B., Ramezani Etedali, H., Tavakol, A., & Kaviani, A. (2021). Spatiotemporal variations of evapotranspiration and reference crop water requirement over 1957–2016 in Iran based on CRU TS gridded dataset. *Journal of Arid Land*, 13, 858-878. <https://doi.org/10.1007/s40333-021-0103-4>.
52. He, H., Wu, Z., Li, D., Zhang, T., Pan, F., Yuan, H., ... & Wang, F. (2022). Characteristics of winter wheat evapotranspiration in Eastern China and comparative evaluation of applicability of different reference evapotranspiration models. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22 (2), 2078-2091. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00795-y>.
53. Singandhupe, R. B., & Sethi, R. R. (2005). Estimation of reference evapotranspiration and crop coefficient in wheat under semi-arid environment in India. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 51 (6), 619-631. <https://doi.org/10.1080/03650340500273831>.
54. Poudyal, S., & Chaudhary, A. (2023). Evapotranspiration and Precipitation Data for Calculating Irrigation Requirements in Utah. *Utah Climate Center*, 435, 1-16. <https://extension.usu.edu/irrigation/research/evapotranspiration-and-precipitation-data>.