

## تحلیل روند تبخیر و تعرق مرجع و بارندگی در تعدادی از ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه آبریز دریاچه ارومیه

مهدی عرفانیان<sup>۱\*</sup> و سحر بابایی حصار<sup>۲</sup>

### چکیده

در این پژوهش، تحلیل روند بارندگی و تبخیر و تعرق به عنوان یکی از مهم‌ترین متغیرهای ورودی و خروجی حوضه‌های آبریز بررسی شد. برای تحلیل روند، از آمار هواشناسی ماهانه پنج ایستگاه سینوپتیک حوضه آبریز دریاچه ارومیه شامل ارومیه، تبریز، خوی، سقز و مهاباد در طی سال‌های ۲۰۰۵-۱۹۷۶ استفاده شد. در ابتدا نرخ تبخیر و تعرق مرجع ( $ET_0$ ) ماهانه با مدل PMF56-Hybrid برآورد شد و سپس از آزمون من-کندال و روش سیل-سن برای تحلیل روند و از آزمون من-کندال دنباله‌ای برای شناسایی نقاط جهش استفاده شد. تحلیل روند سری سالانه بارندگی بیانگر وجود روند کاهشی (غیرمعنی‌دار) در تمام ایستگاه‌ها بجز مهاباد است. همچنین، نتایج روش سیل-سن نشان داد بیشترین نرخ افزایش مقدار  $ET_0$  در ایستگاه خوی و ۳/۴۴ میلی‌متر در سال است ولی بر اساس آزمون من-کندال، مقدار تبخیر و تعرق سالانه در سطح ۹۵٪ دارای روند افزایشی غیرمعنی‌دار است. بیشترین و کمترین نرخ کاهش بارندگی سالانه به ترتیب در ایستگاه خوی (۴/۲ میلی‌متر در سال) و تبریز (۲/۸۸ میلی‌متر در سال) است. بر اساس آزمون من-کندال دنباله‌ای در سری بارندگی، ایستگاه‌های خوی و تبریز دارای نقطه جهش با روند نزولی هستند. مقدار جهش تبخیر و تعرق در هیچیک از ایستگاه‌ها معنی‌دار نیست.

**واژه‌های کلیدی:** تبخیر و تعرق، دریاچه ارومیه، مرجع، من-کندال دنباله‌ای، مدل PMF56-Hybrid.

**ارجاع:** عرفانیان م. و بابایی حصار س. ۱۳۹۵. تحلیل روند تبخیر و تعرق مرجع و بارندگی در تعدادی از ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه آبریز دریاچه ارومیه. مجله پژوهش آب ایران. ۲۰: ۱۴۳-۱۵۲.

۱- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه.

۲- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان.

\* نویسنده مسئول: [erfanian.ma@gmail.com](mailto:erfanian.ma@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۲/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۹/۰۴

## مقدمه

در سال‌های اخیر رقوم ارتفاعی سطح تراز آب دریاچه ارومیه سیر نزولی پیدا کرده است. برخی پژوهش‌گران کاهش بارندگی و افزایش تبخیر و تعرق را از دلایل اصلی آن می‌دانند. این دو پارامتر از مهم‌ترین پارامترهای ورودی و خروجی در معادله بیلان آب هستند. مقدار بارندگی به طور معمول در ایستگاه‌های سینوپتیک (همدیدی) و باران‌سنجی اندازه‌گیری می‌شود، اما تعیین دقیق مقدار آبی که صرف تبخیر و تعرق می‌شود به طور معمول به سادگی ممکن نیست. به همین دلیل تاکنون مدل‌های مختلفی برای تخمین تبخیر و تعرق توسعه یافته است که مدل استاندارد پنمن-مونته‌یث فائو<sup>۱</sup> (PMF56) پرکاربردترین مدل در این زمینه است (طبری و همکاران، ۲۰۱۱). در ایران پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه مدل‌های برآورد نرخ تبخیر و تعرق مرجع و تحلیل مکانی و زمانی آن انجام شده است. در بیشتر این پژوهش‌ها، به اهمیت برآورد مؤلفه تابش خالص (Rn) در مدل‌های مبتنی بر تابش مانند مدل PMF56 اشاره شده است (سبزی پرور و همکاران، ۲۰۱۳). مدل‌های مختلف تخمین تابش در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران در پژوهش‌های گذشته به طور چشمگیری از سوی سبزی‌پرور و همکاران (۲۰۰۷ و ۲۰۰۸) انجام شده است. در زمینه کاربرد آزمون ناپارامتری من-کندال دنباله‌ای به ویژه در رابطه با تبخیر و تعرق و بارندگی، پژوهش‌های اندکی در ایران انجام شده است. مهم‌ترین پژوهش‌های انجام شده در ایران در زمینه مدل‌های برآورد تابش، برآورد تبخیر و تعرق و تحلیل روند شامل موارد زیر است:

سیفی و همکاران (۱۳۸۹) تبخیر و تعرق مرجع را با استفاده از مدل‌های ترکیبی رگرسیونی چندگانه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی برآورد کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که شدت تابش، ساعت‌های آفتابی، رطوبت نسبی و دما در تخمین تبخیر و تعرق مرجع اهمیت بیشتری نسبت به سایر متغیرها دارد. شیرمحمدی و همکاران (۱۳۸۹) برای تخمین تبخیر و تعرق از روش‌های پنمن-مونته‌یث-ASCE و PMF 56 در شهرستان فریمان استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در طول روز تبخیر و تعرق ساعتی پنمن-مونته‌یث-ASCE بیشتر از PMF 56 است و در شب حالت عکس رخ می‌دهد.

سبزی‌پرور و شادمانی (۱۳۹۰) روند تغییرات زمانی پارامتر تبخیر و تعرق مرجع را در مناطق خشک ایران بررسی و از داده‌های ۱۱ ایستگاه سینوپتیک با ۴۱ سال دوره آماری استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که روند تغییرات تبخیر و تعرق مرجع در برخی شهرها افزایشی و در برخی کاهش‌ی است. عرفانیان و بابایی (۱۳۹۳) با تلفیق مدل هیبرید و مدل PMF56، مدل PMF56-Hybrid را برای اولین بار در ایران توسعه و ارائه دادند و میزان تبخیر و تعرق مرجع را در تعدادی از ایستگاه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه برآورد کردند و میزان حساسیت کاربرد مدل هیبرید به جای مدل آنگستروم-پرسکات را بررسی کرده و بهبود معنی‌دار برآورد مقدار تابش را نشان دادند. کوثری و آهنی (۲۰۱۱) روند تغییرات تبخیر و تعرق مرجع را در ۴۲ ایستگاه سینوپتیک ایران در دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۷۵ با استفاده از مدل PMF56 بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تبخیر و تعرق مرجع در ایستگاه‌های واقع در نواحی مرزی دارای روند افزایش معنی‌دار است ولی تغییرات این متغیر در نواحی مرکزی، از نظر آماری معنی‌دار نیست. طبری و همکاران (۲۰۱۱)، نرخ تبخیر و تعرق مرجع را با استفاده از مدل PMF56 در نیمه غربی ایران برای ۱۱ ایستگاه محاسبه و روند آن را با استفاده از آزمون من-کندال بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از روش سیل-سن<sup>۲</sup>، شیب تغییرات تبخیر و تعرق مرجع را از سال ۱۹۶۶ تا سال ۲۰۰۵ به دست آوردند. نتایج آن‌ها نشان داد در ۳۰ درصد از ایستگاه‌ها روند افزایشی معنی‌دار وجود دارد. همچنین طبری و همکاران (۲۰۱۲) تحلیل روند ET0 را در ۱۵ ایستگاه در مناطق غربی و شمال‌غربی ایران برای سال‌های ۱۹۶۶ تا ۲۰۰۵ انجام دادند و به این نتیجه رسیدند ET0 در بیشتر ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی معنی‌دار است. سبزی‌پرور و همکاران (۲۰۱۳) از مدل تابش آنگستروم-پرسکات با ضرایب واسنجی شده و پیش فرض در ایستگاه‌های سینوپتیک ایران برای تخمین تبخیر و تعرق مورد استفاده و مدل PMF56 را به کار گرفتند. نتایج نشان از بهبود تخمین تابش با استفاده از ضرایب واسنجی شده است. بنابراین در بیشتر پژوهش‌های ایران در زمینه تخمین تبخیر و تعرق مرجع، از مدل PMF56 استفاده شده است و به دلیل نبود داده‌های لایسیمتری، نتایج یا خروجی این

خورشیدی را در دو مقیاس روزانه و ماهانه، با دقت بالاتری برآورد کند. عرفانیان و بابایی (۱۳۹۱) با ارزیابی مدل هیبرید، مدل اصلاح شده دانشیار و صباغ در ایستگاه‌های سینوپتیک تبریز و ارومیه نتیجه گرفتند مدل هیبرید، مقدار تابش ماهانه را با دقت بالایی تخمین می‌زند. پس از نتایج مدل هیبرید در تهیه نقشه‌های فصلی تابش در حوضه آبریز دریاچه ارومیه استفاده کردند.

در این پژوهش، ابتدا مدل PMF56 با مدل هیبرید تلفیق و با ارائه مدل ترکیبی PMF56-Hybrid، مقدار تبخیر و تعرق مرجع (ET0) برای پنج ایستگاه سینوپتیک حوضه آبریز دریاچه ارومیه در دوره ۲۰۰۵-۱۹۷۶ برآورد شد. سپس آزمون‌های من-کندال، من-کندال دنباله‌ای و روش سیل-سن برای تحلیل روند ET0 و سری بارندگی در ایستگاه‌های انتخابی، استفاده شد. استفاده از مدل تابش هیبرید، ارائه مدل ترکیبی PMF56-Hybrid و کاربرد آزمون من-کندال دنباله‌ای در حوضه آبریز دریاچه ارومیه از جمله موارد کلیدی این پژوهش در مقایسه با سایر پژوهش‌های شاخص مانند کوثری و همکاران (۲۰۱۱) و طبری و همکاران (۲۰۱۱) است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد بررسی

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با مساحتی بالغ بر ۵۱ هزار کیلومتر مربع، در شمال غربی کشور است و از ۴۴/۲۲ تا ۴۷/۸۹ درجه شرقی و ۳۵/۶۷ تا ۳۸/۴۷ درجه شمالی گسترش یافته است. بر اساس روش کوپن این منطقه دارای اقلیم استپی نیمه‌خشک است. مقدار بارندگی متوسط منطقه حدود ۳۵۰ میلی‌متر در سال است. آمار و اطلاعات مورد نیاز این پژوهش برای دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۷۶ از سایت سازمان هواشناسی کشور تهیه شده است. در بین ایستگاه‌های سینوپتیک در حوضه دریاچه ارومیه فقط هفت که دارای آمار بلند مدت بودند در این بررسی انتخاب شدند (جدول ۱).

مدل برای اعتبارسنجی یا ارزیابی میزان صحت سایر مدل‌های برآورد ET0 استفاده می‌شود (سبزی‌پرور و همکاران، ۲۰۱۳ و طبری و همکاران، ۲۰۱۲). در بیشتر پژوهش‌های که در زمینه عوامل مؤثر بر فرآیند تبخیر و تعرق انجام شده است، تابش خالص خورشیدی (Rn) به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای ورودی بیشتر مدل‌های تابش مینا شامل مدل PMF56 توجه شده است. در ایران اندازه‌گیری مؤلفه‌های بیلان انرژی فقط در تعدادی از ایستگاه‌های هواشناسی انجام می‌شود (عرفانیان و بابایی، ۱۳۹۱). به همین دلیل تاکنون مدل‌های مختلفی برای برآورد مقدار تابش توسعه یافته است. این مدل‌ها می‌توانند از روابط ساده و تجربی تا مدل‌های فیزیکی و پیچیده متغیر باشند. در سال‌های اخیر با توجه به گسترش علم و پیشرفت فناوری، استفاده از مدل‌های فیزیکی رونق چشم‌گیری پیدا کرده است. مدل هیبرید یکی از این مدل‌ها است و به عنوان یک مدل فیزیکی، تأثیر جو زمین را روی تابش خورشید در نظر می‌گیرد. این مدل در نقاط مختلف دنیا استفاده شده و نتایج خوبی ارائه کرده است. یانگ و همکاران (۲۰۰۱) با مقایسه مدل‌های هیبرید و آنگسترم-پرسکات در ۱۴ ایستگاه در ژاپن نشان دادند مدل هیبرید کارایی بهتری نسبت به مدل آنگسترم-پرسکات دارد. یانگ و توشیو (۲۰۰۵) با بررسی‌ای که در ایستگاه‌های آمریکا، ژاپن و عربستان انجام دادند نتیجه گرفتند مدل هیبرید می‌تواند تابش روزانه و ساعتی را با دقت بالاتری نسبت به مدل‌های فائو، آنگسترم-پرسکات با ضریب‌های جهانی و منطقه‌ای برآورد کند. آن‌ها کارایی بالای مدل هیبرید را به در نظر گرفتن عوامل مهمی از جمله اثر جذب و پخش اتمسفر نسبت دادند.

در ایران نیز مدل هیبرید برای اولین بار از سوی عرفانیان و بابایی (۱۳۹۲) در ایستگاه‌های سینوپتیک در شرایط مختلف اقلیمی ارزیابی شد و با مدل‌های اصلاح شده دانشیار (۱۹۷۸) و صباغ (۱۹۷۷) مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل هیبرید می‌تواند تابش طول موج کوتاه

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۷۶

ایستگاه	ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	میانگین بارندگی سالانه (میلی‌متر)
ارومیه	۱۳۱۶	۴۵/۰۸	۳۷/۵۳	۳۲۰/۶۶
تبریز	۱۳۶۱	۴۶/۲۸	۳۸/۰۸	۲۶۵/۹۷
خوی	۱۱۰۳	۴۴/۹۷	۳۸/۵۵	۲۸۳/۴۵
سقز	۱۵۲۳	۴۶/۲۷	۳۶/۲۵	۴۹۶/۳۴
مهاباد	۱۳۸۵	۴۵/۷۲	۳۶/۷۷	۴۰۸/۳۵

## روش حذف خود همبستگی

در تحلیل روند، وجود خودهمبستگی معنی‌دار در سری‌های زمانی موجب ایجاد خطا در نتایج آزمون‌های ناپارامتری تحلیل روند (آزمون من-کندال و آزمون من-کندال دنباله‌ای) می‌شود، لذا در این پژوهش ابتدا ضریب‌های خودهمبستگی سری‌های بارندگی و تبخیر و تعرق فصلی و سالانه با آزمون دوربین-واتسون امتحان شد و در صورت وجود خودهمبستگی از روش پری-وایتینگ<sup>۱</sup> برای حذف تأثیر خودهمبستگی<sup>۲</sup> استفاده شد وایتینگ<sup>۳</sup> برای حذف تأثیر خودهمبستگی<sup>۴</sup> استفاده شد (اوان استورچ، ۱۹۹۵). در مرحله بعد روند تغییرات تبخیر و تعرق و نیز بارندگی با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال و روش شیب سیل-سن تحلیل شد. برای تعیین زمان یا سال شروع روند (نقطه جهش ناگهانی)، از آزمون من-کندال دنباله‌ای استفاده شده است.

## مدل پنمن - مونتیت فائو (PMF56)

نرخ تبخیر و تعرق از یک سطح مرجع به صورت ET0 نشان داده می‌شود. رابطه PMF56 به صورت زیر ارائه شده است:

$$ET0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

ET0 تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر در روز)،  $R_n$  تابش خالص ورودی (مگاژول بر مترمربع در روز)،  $G$  شار گرمایی خاک (مگاژول بر مترمربع در روز)،  $T$  میانگین دمای هوا در ۲ متری سطح زمین (درجه سانتی‌گراد)،  $u_2$  سرعت باد در ارتفاع ۲ متری سطح زمین (متر بر ثانیه)،  $e_s$  فشار بخار اشباع (به کیلوپاسکال)،  $e_a$  فشار بخار واقعی به (کیلو پاسکال)،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار (کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد) و  $\gamma$  ثابت سایکومتريک (کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد) است (آلن، ۲۰۰۶).  $R_n$  با استفاده از معادله (۲) به دست می‌آید:

$$R_n = R_{n_s} + R_{n_l} \quad (2)$$

$R_{n_s}$  تابش خالص جذب شده طول موج کوتاه و  $R_{n_l}$  تابش خالص جذب شده طول موج بلند است. برای محاسبه  $R_{n_s}$  از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$R_{n_s} = R_s (1 - \alpha) \quad (3)$$

که  $\alpha$  آلبیدو یا ضریب انعکاس سطح بوده و برابر است با  $0.23/R_{n_l}$  نیز بر اساس معادله زیر به دست می‌آید:

$$R_{n_l} = \sigma \left[ \frac{T^4_{\max} + T^4_{\min}}{2} \right] \quad (4)$$

$$(0.34 - 0.14\sqrt{ea})(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35)$$

در معادله بالا  $T$  دمای هوا به کلون،  $T_{\min}$  و  $T_{\max}$  به ترتیب دمای حداقل و حداکثر است.  $R_s$  مقدار مشاهده‌ای تابش است که به دلیل نبود آمار مناسب به طور معمول از مدل آنگستروم-پرسکات استفاده می‌شود (آلن، ۲۰۰۶).

## مدل هیبرید (Hybrid)

این مدل در سال ۲۰۰۱ از سوی یانگ و همکاران به صورت معادله (۵) ارائه شده است:

$$R_{est} = (a + b \frac{n}{N}) I_b + (c + d \frac{n}{N}) I_d \quad (5)$$

$I_b$  و  $I_d$  تابش مستقیم<sup>۵</sup> و تابش پراکنده<sup>۶</sup> (ژول بر مترمربع) و  $\frac{n}{N}$  شاخص اثر پوشش ابر و  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  ضریب‌های مدل هیبرید است (یانگ و همکاران، ۲۰۰۱). در محاسبه  $I_b$  و  $I_d$  از معادلات (۶) و (۷) استفاده می‌شود:

$$I_b = I_0 \int_{sunrise}^{sunset} \tau_b \sinh dt \quad (6)$$

$$I_d = I_0 \int_{sunrise}^{sunset} \tau_d \sinh dt \quad (7)$$

که  $I_0$  ثابت خورشیدی،  $h$  زاویه ارتفاع خورشید (رادیان)،  $\tau_b$  ضریب عبور اتمسفری برای تابش مستقیم<sup>۷</sup> و  $\tau_d$  ضریب عبور اتمسفری برای تابش پراکنده<sup>۸</sup> است. اتمسفر زمین اثرات مختلف جذب و پخش روی تابش مستقیم و پراکنده دارد. این اثرات شامل موارد (۱) جذب توسط ازن ( $\tau_{oz}$ )، (۲) جذب با بخار آب ( $\tau_w$ )، (۳) جذب از سوی گازهای پایدار ( $\tau_g$ )، (۴) اتلاف انرژی در اثر مواد آیرسل ( $\tau_a$ ) و (۵)

5- Effective beam radiation  
6- Effective diffuse radiation  
7- Beam transmittance  
8- Diffuse transmittance

1- Pre-whitening  
2- Auto-Correlation (Serial Correlation)  
3- Pre-whitening  
4- Auto-Correlation (Serial Correlation)

$\beta$  شیب روند و  $X_i$  و  $X_j$  به ترتیب  $i$  امین و  $j$  امین داده مشاهده‌ای است.

### آزمون من - کندال دنباله‌ای (Sequential MK)

در بررسی زمان شروع روند از آزمون من - کندال دنباله‌ای استفاده شد. معادله آن به صورت زیر است:

$$u(t) = \frac{t_j - E(t)}{\sqrt{\text{Var}(t_j)}} \quad (13)$$

$u(t)$  عبارت است از متغیر استاندارد شده با میانگین صفر و انحراف معیار یک.  $E(t)$  میانگین و  $\text{Var}(t_j)$  واریانس آماره آزمون است (دودانگه و همکاران، ۱۳۹۰).  $u'(t)$  نیز همانند  $u(t)$  محاسبه می‌شود. با این تفاوت که سری داده‌ها عکس می‌شود. اگر دنباله  $u(t)$  و  $u'(t)$  به صورت نموداری ترسیم شود، در صورتی که دو نمودار در خارج از  $+1/96$  و  $-1/96$  همدیگر را قطع کنند روند معنی‌دار خواهد بود که به آن نقطه جهش (شروع روند) گفته می‌شود. در صورتی که  $u(t) > +1.96$  باشد آنگاه روند افزایشی و در  $u(t) < -1.96$  روند نزولی است. برای  $+1.96 < u(t) < -1.96$  نمی‌توان روند معنی‌داری تصور کرد.

### نتایج و بحث

با برنامه‌نویسی مدل‌های هیبرید و PMF56 در محیط فرترن و تلفیق آن‌ها، مدل PMF56-Hybrid توسعه یافت. با استفاده از این مدل، تبخیر و تعرق مرجع برآورد شد. بررسی روند تبخیر و تعرق سالانه و فصلی نشان‌دهنده وجود روند افزایشی غیرمعنی‌دار (سطح  $0.05$ ) در ایستگاه‌های مورد بررسی است (جدول ۲). ایستگاه‌های تبریز و سقز در فصل پاییز دارای روند افزایشی معنی‌دار در نرخ تبخیر و تعرق هستند و در سایر فصل‌ها روند افزایش غیرمعنی‌داری دیده می‌شود. نتایج آزمون من - کندال بر سری زمانی بارندگی فصلی نیز نشان دهنده وجود یک روند کاهشی در بیشتر فصل‌ها است و بجز ایستگاه‌های تبریز و خوی در فصل زمستان، روند معنی‌دار مشاهده نشد. روش سیل - سن نشان داد بیشترین نرخ افزایش در تبخیر و تعرق سالانه مربوط به ایستگاه تبریز و معادل  $1/8$  میلی‌متر در سال است.

اثر Rayleigh ( $\tau_r$ ) است. ضریب‌های عبور اتمسفریک برای تابش‌های مستقیم و پراکنده با استفاده از معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$\tau_b \cong 0.5\tau_{oz}\tau_w\tau_g\tau_r\tau_a - 0.013 \quad (8)$$

$$\tau_d \cong \tau_{oz}\tau_w\tau_g(1 - \tau_r\tau_a) + 0.013 \quad (9)$$

هر یک از پارامترهای معادلات فوق با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده در مقیاس روزانه از ایستگاه‌های هواشناسی شامل دما، رطوبت نسبی، فشار و مدت تابش، قابل برآورد است (یانگ و همکاران، ۲۰۰۱).

### آزمون من - کندال (Mann-Kendall)

آزمون من - کندال یکی از آزمون‌های ناپارامتری پرکاربرد در تحلیل روند متغیرهای آب و هواشناسی دارد. در این آزمون فرض صفر ( $H_0$ ) و فرض مقابل ( $H_1$ ) به ترتیب بیانگر عدم وجود روند و وجود آن در سری زمانی است. معادله زیر نحوه تعیین آماره من - کندال را نشان می‌دهد:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sgn}(X_j - X_i) \quad (10)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$Z$  آماره آزمون من - کندال است که برای نمونه‌های بیش از ۳۰ سال کاربرد دارد. اگر قدر مطلق آماره  $Z$  در سطح معنی‌داری  $0.05$  درصد بزرگ‌تر از  $Z_{0.05} = 1/96$  باشد در این صورت فرض صفر رد شده و در حقیقت روند وجود داشته و معنی‌دار است. مقدار منفی آماره  $Z$  نشان دهنده روند کاهشی و مقدار مثبت  $Z$  مثبت نشان دهنده روند افزایشی است (سبزی‌پرور و شادمانی، ۱۳۹۰).

### روش سیل - سن (Theil-Sen)

در این پژوهش برای تعیین شیب روندها از روش ناپارامتری سیل - سن (سیل، ۱۹۵۰ و سن، ۱۹۶۸) استفاده شد:

$$\beta = \text{Median} \left[ \frac{X_j - X_i}{j - i} \right], j > i \quad (12)$$

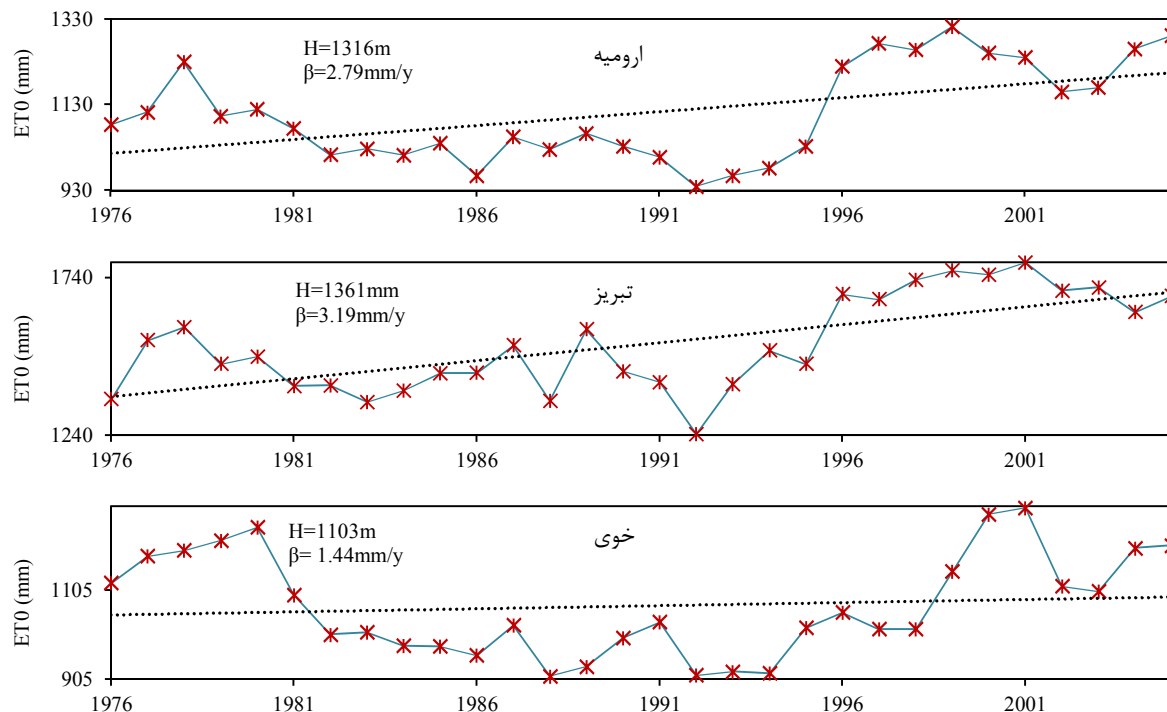
جدول ۲- مقدار آماره من- کندال (Z) برای سری زمانی تبخیر و تعرق در مقیاس فصلی و سالانه

ایستگاه	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	سالانه
ارومیه	۱/۴	۱/۱	۱/۶	۱/۹	۱/۸
تبریز	۱/۶	۱/۴	۲/۳ <sup>a</sup>	۱/۱	۱/۴
خوی	۰/۴	۱/۴	۱/۰	۰/۸	۰/۸
سقز	۰/۹	۱/۶	۲/۳ <sup>a</sup>	۰/۷	۱/۵
مهاباد	۱/۰	۱/۶	۱/۲	۰/۹	۱/۵

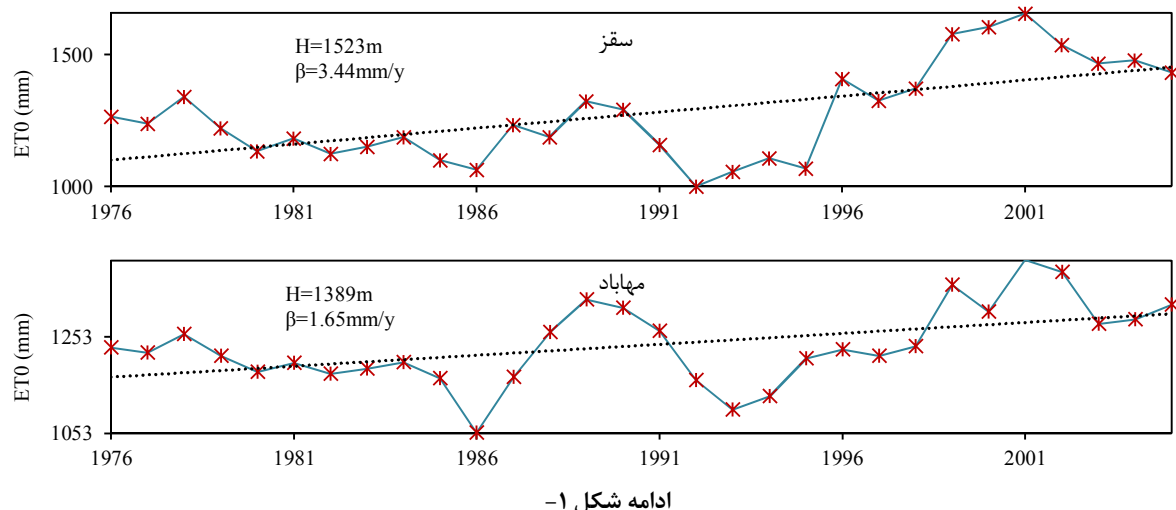
a: افزایش معنی‌دار

(۲۰۱۱) نیز روند تبخیر و تعرق در ایستگاه‌های تبریز و ارومیه دارای روند افزایشی ولی از نظر آماری معنی‌دار است که اختلاف در معنی‌دار بودن خط روند، تا حد زیادی متأثر از اندازه نمونه و تفاوت دوره آماری منتخب است. همچنین بر اساس بررسی دین‌پژوه و همکاران (۲۰۱۱) روند تبخیر و تعرق در ایستگاه تبریز افزایشی است که در مقیاس سالانه معنی‌دار تشخیص داده نشد. تحلیل روند سری بارندگی در بیشتر ایستگاه‌ها دارای روند کاهشی است (جدول ۳) که با نتایج قنبرلو (۱۳۹۱) و تحلیل روند بارندگی ۳۰ ساله بر اساس تئوری موجک در این ایستگاه‌ها هماهنگی دارد.

در ایستگاه خوی ۱/۴۴ میلی‌متر در سال کاهش در نرخ تبخیر و تعرق وجود دارد. بیشترین کاهش در بارندگی سالانه در ایستگاه خوی اتفاق افتاده است و شیب روند معادل ۴/۲۰ میلی‌متر در سال است. کمترین کاهش در بارش سالانه مربوط به ایستگاه تبریز است و در حدود ۲/۸۸ میلی‌متر در سال است (شکل ۱). نتایج تحلیل روند نشان می‌دهد که تبخیر و تعرق مرجع در همه ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی غیرمعنی‌دار است. بر اساس بررسی‌های انجام شده از سوی طبری و همکاران (۲۰۱۱)، نرخ تبخیر و تعرق در شمال‌غرب دارای روند افزایشی است. در بررسی‌های انجام شده از سوی کوثری و آهنی



شکل ۱- تغییرات تبخیر و تعرق سالانه در ایستگاه‌های مورد استفاده در سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵  
H ارتفاع ایستگاه و  $\beta$  شیب سیل - سن می‌باشد.



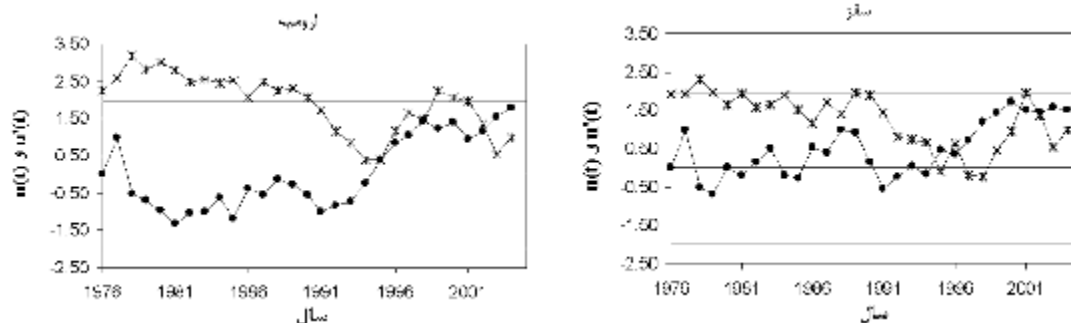
جدول ۳- مقدار آماره من- کندال (Z) برای سری زمانی بارندگی در مقیاس فصلی و سالانه

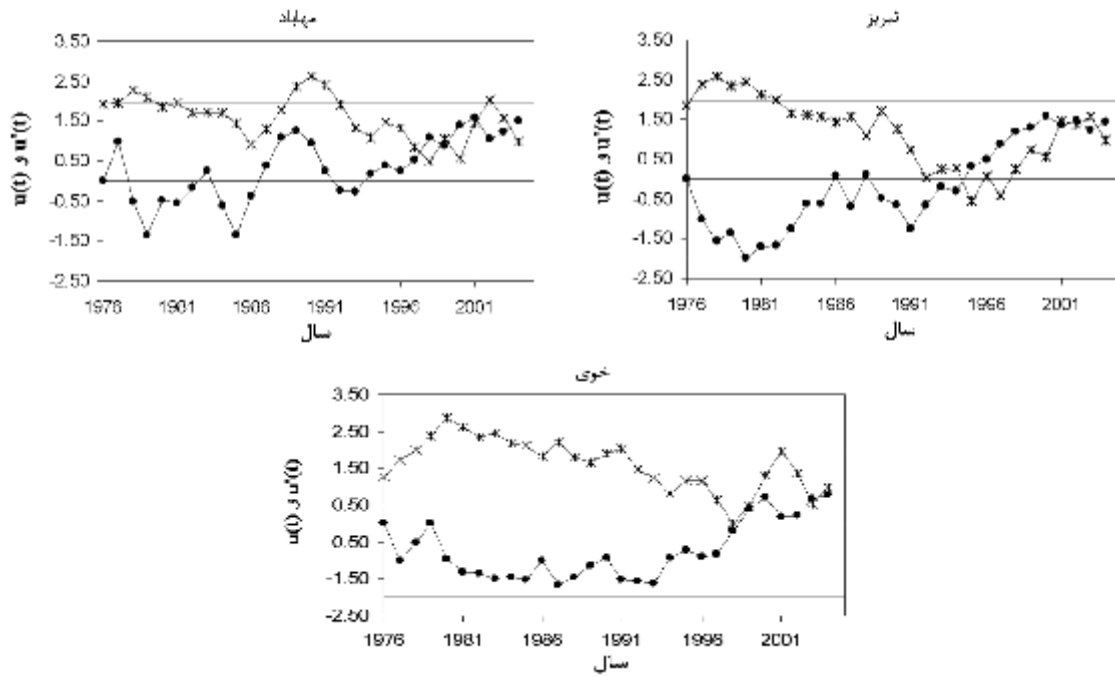
ایستگاه	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	سالانه
ارومیه	-۰/۵	۰/۳	-۱/۶	-۰/۵	-۱/۵
تبریز	-۰/۸	۰/۷	-۰/۸	<sup>b*</sup> -۲/۱	-۱/۸
خوی	-۱/۳	۰/۵	-۱/۰	<sup>b</sup> -۲/۴	<sup>b</sup> -۲/۳
سقز	-۰/۹	<sup>a</sup> ۲/۰	-۰/۴	-۰/۸	-۱/۶
مهاباد	-۰/۱	-۱/۸	۰/۷	<sup>a</sup> ۲/۵	۰/۴

\* a معنی‌داری روند افزایشی و b معنی‌داری روند کاهشی در سطح معنی‌داری ۵ درصد

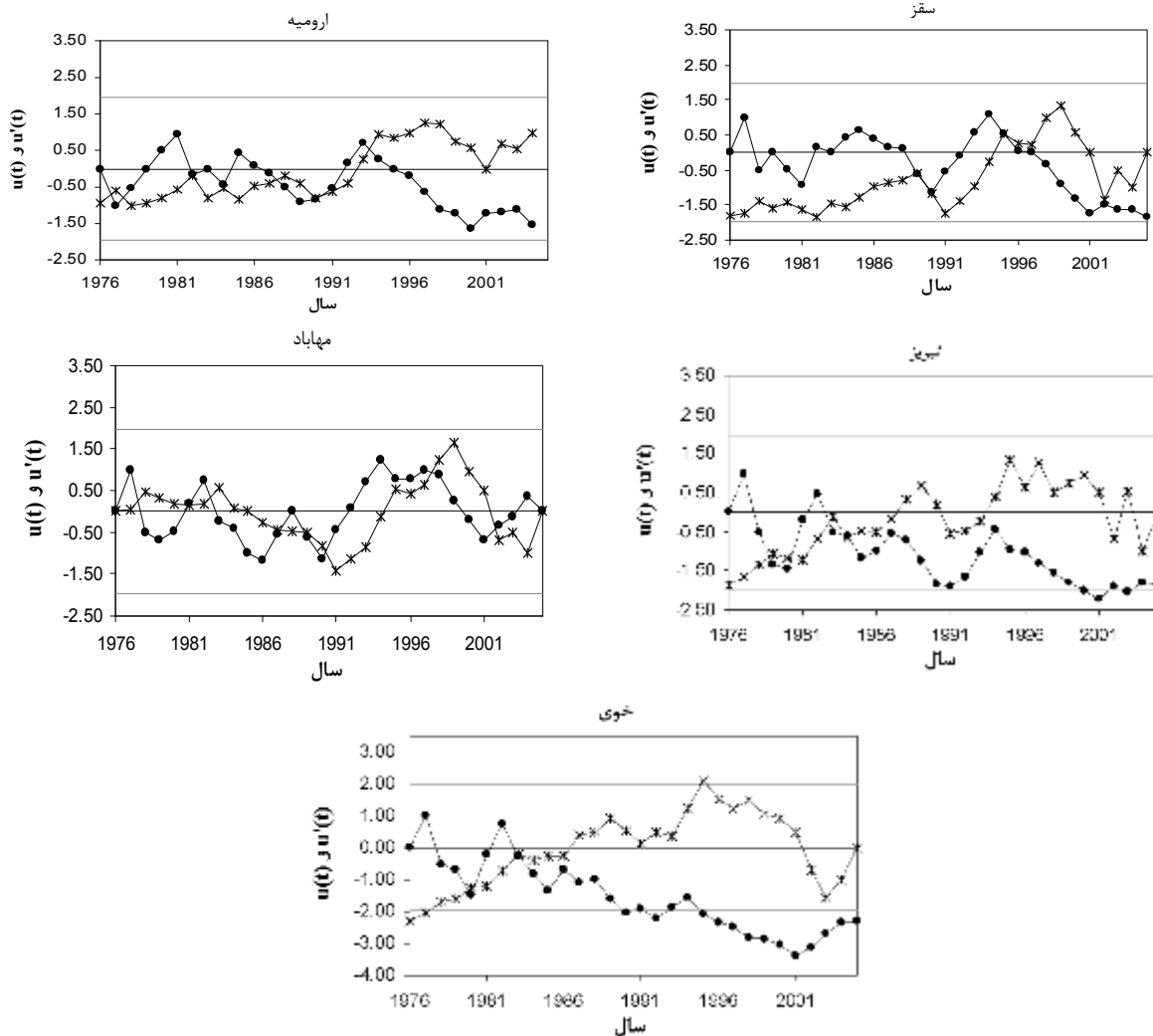
و  $1/96 +$  خارج نشده است. ضمناً در نمودارهای  $u(t)$  و  $u'(t)$  پس از برخورد، تغییر زیادی در جهت نمودارها رخ نداده است. بنابراین نقطه جهشی خاصی در روند این سری مشاهده نمی‌شود (شکل ۲). در مورد سری بارندگی سالانه نیز معلوم شد در ایستگاه خوی یک جهش معنی‌دار نزولی در سال ۱۹۸۳ رخ داده است (شکل ۳). نقطه جهش در ایستگاه تبریز نیز همانند ایستگاه خوی مربوط به سال ۱۹۸۳ است و در سایر ایستگاه‌ها جهش مشخصی دیده نمی‌شود.

در این پژوهش برای کاهش تأثیر طول دوره آماری (۱۹۷۶-۲۰۰۵) روی نتایج تحلیل روند در روش ناپارامتری و متداول من- کندال و تشخیص زمان جهش ناگهانی سری داده‌های تبخیر و تعرق مرجع و بارندگی (تشخیص سال شروع روند نزولی یا صعودی)، از آزمون من- کندال دنباله‌ای است. بررسی رفتار تغییرات مؤلفه‌های  $u(t)$  و  $u'(t)$  مربوط به سری زمانی تبخیر و تعرق مرجع سالانه نشان داد وجود روند افزایشی در هیچ یک از ایستگاه‌های مورد بررسی نمودار  $u(t)$  از خط  $-1/96$

شکل ۲- نمودارهای  $u(t)$  (خط دایره‌ای) و  $u'(t)$  (خط ستاره‌دار) برای سری زمانی تبخیر و تعرق و مرجع سالانه



ادامه شکل ۲-



شکل ۳- نمودارهای  $u(t)$  (خط دایره‌ای) و  $u'(t)$  (خط ستاره‌دار) برای سری زمانی بارندگی سالانه



## نتیجه‌گیری

به‌دلیل نبود داده‌های تابش در بیشتر ایستگاه‌های سینوپتیک، برآورد نرخ تبخیر و تعرق با استفاده از مدل PMF56 با مشکلاتی روبروست که می‌تواند دقت برآوردها را تحت تأثیر قرار دهد. در این پژوهش مدل هیبرید به عنوان یک مدل فیزیکی تخمین تابش با مدل پنمن-مونتیث فائو ترکیب و مدل PMF56-Hybrid توسعه یافت. سپس تبخیر و تعرق مرجع برای ایستگاه‌های دارای آمار ۳۰ ساله در دوره ۲۰۰۵-۱۹۷۶ محاسبه و پس از حذف خودهمبستگی‌های معنی‌دار، روند تغییرات آن با آزمون من-کندال بررسی شد. نتایج نشان دهنده وجود یک روند افزایشی غیرمعنی‌دار در سری زمانی تبخیر و تعرق سالانه در تمامی ایستگاه‌ها است. در مقیاس فصلی تمام ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی هستند که فقط دو ایستگاه تبریز و سقز به ترتیب با  $Z=2.2$  و  $Z=2.3$  در فصل پاییز روند معنی‌دار دارند. نتایج حاصل از اعمال آزمون من-کندال بر بارندگی سالانه نشان از وجود یک روند کاهشی در این سری زمانی است که تنها در ایستگاه خوی معنی‌دار ( $Z=-2.3$ ) است. تمامی ایستگاه‌ها بجز مهاباد در فصل تابستان دارای روند افزایش هستند که این روند در ایستگاه سقز معنی‌دار است. بارندگی در سایر فصل‌ها به طور معمول با یک روند کاهشی همراه است که بر اساس آماره من-کندال در ایستگاه تبریز و خوی معنی‌داری محسوب می‌شود. آزمون سیل-سن میزان افزایش و کاهش بارندگی و تبخیر و تعرق را در فصل‌های مختلف برای هر یک از ایستگاه‌ها مشخص کرد. تبخیر و تعرق سالانه در ایستگاه سقز دارای بیشترین افزایش (معادل  $3/44$  میلی‌متر در سال) می‌باشد. برای تعیین نقاط شروع روند (نقاط جهش) در سری‌های زمانی از آزمون من-کندال دنباله‌ای، استفاده شد. این آزمون برای اولین بار در منطقه شمال‌غرب کشور استفاده شد. در سری زمانی بارندگی، ایستگاه‌های خوی و تبریز در سال ۱۹۸۳ دارای نقطه جهش با روند نزولی هستند که این روند در ایستگاه خوی معنی‌دار است. نقطه جهش در هیچیک از نمودارهای تبخیر و تعرق معنی‌دار نیست.

## منابع

۱. بابایی س. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل هیبرید در برآورد تابش خورشیدی در شرایط مختلف اقلیمی ایران، پایان‌نامه

- کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه. ۹۳ ص.
۲. دودانگه ا. سلطانی س. و سرحدی ع. ۱۳۹۰. بررسی روند مقادیر حدی جریان (جریان حداقل و سیل) در حوضه آبخیز سد سفید رود. نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۵(۵۸): ۲۱۵-۲۲۹
۳. سبزی‌پرور ع. و شادمانی م. ۱۳۹۰. تحلیل روند تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از آزمون من-کندال و اسپیرمن در مناطق خشک ایران. نشریه آب و خاک. ۴(۲۵): ۸۳۴-۸۲۳.
۴. سیفی ا. میرلطفی م. و ریاحی ح. ۱۳۸۹. توسعه مدل ترکیبی رگرسیونی چند گانه- تحلیل مولفه‌ها و عامل‌های اصلی (PCA - MLR) در پیش‌بینی تبخیر و تعرق مرجع. آب و خاک. ۶(۲۴): ۱۱۸۶-۱۱۹۶.
۵. شیر محمدی ز. انصاری ح. و علیزاده ا. ۱۳۸۹. مقایسه تبخیر و تعرق مرجع پنمن مانتیث ASCE و پنمن-مونتیث فائو ۵۶ در بازه زمانی ساعتی در ایستگاه هواشناسی فریمان. آب و خاک. ۲: ۲۷۵-۲۸۶.
۶. عرفانیان م. و بابایی س. ۱۳۹۰. ارزیابی مدل هیبرید در تخمین تابش روزانه خورشیدی در ایستگاه سینوپتیک تبریز. چکیده مقالات نخستین کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب، دانشگاه تهران.
۷. عرفانیان م. و بابایی س. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل هیبرید در تخمین تابش خورشیدی و تهیه نقشه‌های فصلی تابش برای حوضه دریاچه ارومیه، چکیده مقالات پنجمین کنگره بین‌المللی جغرافیدانان جهان اسلام، دانشگاه تبریز.
۸. عرفانیان م. و بابایی س. ۱۳۹۲. ارزیابی مدل هیبرید در تخمین تابش خورشیدی روزانه در تعدادی از ایستگاه‌های تابش‌سنجی ایران. مجله علوم آب و خاک. ۱(۲۷): ۱۵۸-۱۶۸.
۹. عرفانیان م. و بابایی س. ۱۳۹۳. توسعه و کاربرد مدل PMF56-Hybrid برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع در حوزه آبریز دریاچه ارومیه. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۸(۷۰): ۱۹۳-۲۰۵.
۱۰. قنبرلو ز. ۱۳۹۱. تحلیل روند و پیش‌بینی بارندگی و دبی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه با استفاده از تئوری موجک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه. ۱۳۸ ص.

- hydrological studies, Water Resources Research. 41(10).
26. Von Storch H. 1995. Misuses of statistical analysis in climate research. In: Storch HV, Navarra A (eds) Analysis of climate variability: applications of statistical techniques. Springer, Berlin. 11-26.
  11. Allen R. G. 2006. FAO Irrigation and Drainage Paper. Utah State University. P. 7.
  12. Daneshyar. M. 1978. Solar radiation statistics for Iran. Solar Energy. 21(4): 345-349.
  13. Dinpashoh Y. Jhajharia D. Fakheri-Fard A. Singh V and Kahya E. 2011. Trends in reference crop Evapotranspiration over Iran. Journal of Hydrology. 399(3): 422-433.
  14. Kousari M. and Ahani H. 2011. An investigation on reference crop Evapotranspiration trend from 1975 to 2005 in Iran. International Journal of Climatology. 32(15): 2387-2402
  15. Sabbagh A. Sayigh M. and El-Salam A. 1977. Estimation of the total solar radiation from meteorological data. Solar Energy. 19(3): 307-311.
  16. Sabziparvar A. 2007. General formula for estimation of monthly mean global solar radiation in different climates on the South and North coasts of Iran. International Journal of Photoenergy. 1-7
  17. Sabziparvar A. and Shetaee H. 2007. Estimation of global solar radiation in arid and semi-arid climates of East and West Iran. Energy. 32(5): 649-655
  18. Sabziparvar A. 2008. A simple formula for estimating global solar radiation in central arid deserts of Iran, Renewable Energy. 33(5): 1002-1010.
  19. Sabziparvar A. Mousavi R. Marofi S. Ebrahimi Pak N. and Heidari M. 2013. An Improved Estimation of the Angstrom-Prescott Radiation coefficients for the PMF56 Evapotranspiration Method. Water Resources Management. 27(8): 2839-2854.
  20. Sen P. K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association. 63(324): 1379-1389.
  21. Tabari T. Aeini A. Hosseinzadeh Talae P. and Some'e SH. 2011. Spatial distribution and temporal variation of reference evapotranspiration in arid and semi-arid regions of Iran. Hydrological Processes. 26(4): 500-512.
  22. Tabari H. Nikbakht J. and Hosseinzadeh Talae P. 2012. Spatial distribution and temporal variation of reference evapotranspiration in arid and semi-arid regions of Iran. Water Resource Management. 26(4): 2219-2232.
  23. Theil H. 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis: Part 3. Proceedings of Nederlandse Akademie van Wetenschappen A. 53(1397-1412).
  24. Yang K. Huang W. G. and Tamai N. 2001. A Hybrid model for estimating global solar radiation. Solar Energy. 70(1): 13-22.
  25. Yang K. and Toshio K. 2005. A general model to estimate hourly and daily solar radiation for