

مقایسه گام‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه در مدل‌های هارگریوز-سامانی و پنمن-مانتیث-فائو برای تخمین تبخیر تعرق مرجع در حوضه آبریز زاینده رود

اسماعیل ادیب مجد^{۱*}، رسول میرعباسی^۲، مهدی اسدی^۳، سید حسن طباطبائی^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۷

DOI: 10.22103/nrswe.2023.21236.1034

چکیده

تبخیر تعرق مرجع (ET_0)، حداکثر مقدار آب خروجی برای یک پوشش گیاهی به‌خصوص (مثل چمن، یونجه یا یک سطح کشت استاندارد) است. تاکید فائو ۵۶ بر اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی در ارتفاع دو متری بالای چمن سبزی است که در سطح وسیع کشت شده، زمین را به طور کامل پوشانده و فاقد کمبود آب باشد. رابطه پنمن-مانتیث فائو (PMFAO) برای محاسبه ET_0 پیشنهاد شد. در ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی که محصور در مناطق تحت کشت ساخته می‌شوند، دستگاه‌های اندازه‌گیری برخلاف ایستگاه‌های سینوپتیک شرایط هواشناسی مشابه با گیاهان پیرامون ایستگاه را ثبت می‌کنند. از این رو در گزارش فائو، روش جایگزین برای محاسبه ET_0 توصیه نمی‌شود. در پژوهش حاضر روش هارگریوز-سامانی (HS) و روش PMFAO، در دوره زمانی ۲۵ ساله از ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۹ به صورت روزانه در حوضه زاینده‌رود (۲۹ ایستگاه) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد در گام زمانی روزانه اختلاف دو روش زیاد (ضریب نش از ۰/۶۳ تا ۰/۸۷) است. در گام ماهیانه، اختلاف دو روش به‌طور کلی قابل اغماض است (ضریب نش از ۰/۸ تا ۰/۹۶). در گام‌های سالانه (ضریب نش بالای ۰/۸) نتایج دو روش بسیار نزدیک به هم هستند. ولی در ایستگاه‌های مختلف رفتار مشابهی دیده نشد. به‌عنوان مثال در ایستگاه کبوترآباد برعکس ایستگاه شرق اصفهان همواره ET_0 به روش HS از PMFAO بیشتر است. بنابراین در عمل برای تخمین ET_0 به روش HS توصیه می‌شود حداقل با نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک و با روش PMFAO صحت سنجی شده و پس از ارزیابی به کار گرفته شود.

واژگان کلیدی: تبخیر تعرق مرجع، حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود، روش پنمن-مانتیث-فائو، روش هارگریوز-سامانی، ضریب تشت تبخیر، نقشه هم تبخیر تعرق مرجع.

Email: e.adibmajd@stu.sku.ac.ir

*^۱ - نویسنده مسئول و دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

^۲ - دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

^۳ - دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

^۴ - دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

مقدمه

به طور کلی مهم ترین عامل در فرآیند آب، خاک، گیاه و اتمسفر را می توان تبخیر و تعرق ذکر کرد. بخار آب وقتی از روزنه های گیاه خارج می شود، تعرق و بخار شدن آب از خاک، تبخیر نامیده می شود (Penman 1948). با فرض عدم محدودیت برای تعرق گیاه و همچنین تبخیر از سطح، حداکثر مقدار تبخیر و تعرق را تبخیر تعرق پتانسیل (ET_p) می نامند. بنابراین در تعریف ET_p میزان تبخیر و تعرق به محصول خاصی مربوط نمی شود (Allen 1996). در سال های میانی دهه ۱۹۴۰ میلادی دو روش موسوم به روش آیرودینامیک و روش توازن انرژی برای محاسبه تبخیر تعرق ابداع شد. بعد به تدریج روش های ترکیبی، روش های تجربی و دیگر روش ها توسعه پیدا کرد. در ابتدا سطح تبخیر، یک سطح گسترده از آب فرض شده بود (Penman 1948). پس از آن محققین ارزشمندی همچون (Blaney and Criddle 1950; Jensen and Haise 1963; Thornthwaite 1948; Priestley and Taylor 1972) و دیگران سعی در اصلاح، ساده سازی یا توسعه رابطه پنمن داشتند. (Hargreaves 1975) رابطه ساده ای را با استفاده از دمای متوسط برحسب درجه سانتی گراد و تشعشع فرا زمینی پیشنهاد کرد که بر اساس آن تبخیر تعرق مرجع (ET_0) برای سطح چمن قابل محاسبه بود. (Monteith 1981) نسبت به اصلاح معادله پنمن اقدام کرد، به این صورت که معادله ای برای تبخیر از سطح آب و بعد از مدتی برای محاسبه شدت ET_0 از سطح کاملاً پوشیده از چمن با مبنای فیزیکی ارائه نمود. وی نقش خود گیاه و همچنین نقش کامل آب و هوا را در رابطه تصحیح کرد و کل سطح پوشش گیاهی را به عنوان یک برگ بزرگ^۱ با روزنه های موجود در آن فرض کرد. به تدریج روابط و معادلات ET_0 توسعه یافت تا (Allen et al. 1998) روش پنمن مانیتیت فائو ($PMFAO^2$) را که می توان گفت معتبرترین روش تخمین ET_0 است، معرفی کردند. در این روش یک گیاه فرضی با ارتفاع ۱۲ سانتیمتر و ضریب بازتاب تابش ۰/۲۳ فرض شد و موجبات اصلاح مقاومت آیرودینامیک و

همچنین تابع باد فراهم آمد. با فرض یاد شده ET_0 که معرف سطح کشت تعریف شده بود استاندارد سازی شد (Walter et al. 2005). روش $PMFAO$ توسط مؤسسات و محققین زیادی در سراسر دنیا و برای اقلیم های مختلف مورد تأیید قرار گرفته است. محققین سعی کرده اند روش های تجربی محاسبه ET_0 را با روابطی ساده و یا با استفاده از کمترین پارامترهای اقلیمی ارائه دهند. روش های دیگری نیز مثل روش هارگریوز سامانی (HS^3) در ایران و دنیا مورد توجه قرار گرفته اند. این روش به ویژه در مناطق خشک و گرم، ضمن این که داده های هواشناسی کمتری نسبت به $PMFAO$ نیاز دارد، تطابق بسیار خوبی را با این روش نشان داد. فائو ۵۶ معادله HS را زمانی که ممکن است داده های آب و هوایی کافی برای تخمین ET_0 توسط $PMFAO$ در دسترس نباشد توصیه کرد (Allen et al. 1998). نتایج برخی از تحقیقات از قبیل (Almorox et al. 2015) حاکی از این است که روش HS دقیق ترین عملکرد را در اقلیم های خشک، نیمه خشک، معتدل، سرد و قطبی ارائه می دهد. روش HS برای پاکستان نتایج قابل اعتماد و دقیقی از ET_0 ارائه داد (Shah 2022). در بخش مرکزی چین با بررسی ۶۴۷ ایستگاه اندازه گیری، رابطه HS ، همبستگی خوبی در بازه زمانی ماهیانه با $PMFAO$ برقرار کرد (Xia et al. 2020). اقدام برای بهبود ضرایب در روش HS در هند و مقایسه آن با روش $PMFAO$ ، منجر به تأیید روش HS گردید و استفاده از این روش پیشنهاد شد (Niranjan and Nandagiri, 2021). مجموعه داده روزانه ۴۹ ایستگاه پراکنده در حوضه Duero (اسپانیا)، برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸، به منظور تخمین ET_0 با دیدگاه زمانی (سالانه یا فصلی) و مکانی استفاده شد. نتایج نشان داد عملکرد مدل های به کار گرفته شده، بسته به سالانه یا فصلی بودن مقیاس به طور قابل توجهی تغییر می کند ولی در مقیاس فصلی مدل HS در بعضی فصول، نتیجه مثبتی نشان داد (Moratiet et al. 2020). در ایران هم تحقیقات کم و بیش جامعی انجام شده است. تخمین (ET_0) با استفاده

۳-Hargreaves-Samani method

۱- Big leaf method

۲-Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 Penman Monteith Method

چهار میلیون نفر است که به عنوان یک حوضه شناخته شده در مجامع بین‌المللی با تنوع اقلیمی است که برای اهداف این پژوهش انتخاب شد. ارتفاعات حوضه در غرب و جنوب و دشت‌ها در شرق حوضه عمدتاً نواحی کشاورزی را تشکیل می‌دهند. داده‌های مورد استفاده در هر ایستگاه شامل مقدار بارش روزانه (میلی‌متر)، حداقل و حداکثر درجه حرارت روزانه (درجه سانتی‌گراد)، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی در هر روز، سرعت باد در ارتفاع ده متر که به سرعت باد در دو متری تبدیل شد و در نهایت ساعات آفتابی واقعی (ساعت) می‌باشد. همچنین محاسبات ET_0 به روش HS و تحلیل توزیع مکانی آن در حوضه، با استفاده از کل ایستگاه‌هایی که حداقل و حداکثر درجه حرارت روزانه را ثبت می‌کنند صورت پذیرفت.

جدول (۱): مشخصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری درجه حرارت در حوضه زاینده‌رود

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	مشخصات جغرافیایی (UTM)		
		طول	عرض	ارتفاع
قلعه شاهرخ	تبخیرسنجی	۳۶۱۴۰۶۰	۴۴۸۷۰۸	۲۰۸۵
سد زاینده رود	تبخیرسنجی	۳۶۲۱۹۳۹	۴۷۵۸۱۲۷	۲۱۴۰
پل زمانخان	تبخیرسنجی	۳۵۹۵۷۵۳	۴۹۰۱۳۶	۱۸۶۴
زفره فلاورجان	تبخیرسنجی	۳۵۹۶۱۹۰	۵۴۶۸۷۵	۱۶۲۴
وزوان میمه	تبخیرسنجی	۳۶۹۷۶۴۴	۵۱۷۵۷۲	۱۹۸۲
مورچه خورت	تبخیرسنجی	۳۶۶۰۰۳۷	۵۴۴۸۹۴	۱۶۷۰
کوهپایه	تبخیرسنجی	۳۶۴۴۵۹۹	۶۳۴۸۰۸	۱۸۷۸
مهیار	تبخیرسنجی	۳۵۷۰۵۴۰	۵۷۶۱۹۲	۱۶۶۳
ایزدخواست	تبخیرسنجی	۳۴۸۷۷۸۹	۶۰۷۵۷۵	۲۱۸۸
سد خمیران	تبخیرسنجی	۳۶۲۵۹۰۰	۵۰۰۹۳۷	۱۹۹۶
حسن آباد	تبخیرسنجی	۳۵۵۶۹۸۱	۶۵۲۰۴۱	۱۴۹۸
خوندآب	تبخیرسنجی	۳۶۶۶۴۸۰	۴۸۹۸۱۳۳	۱۹۹۷
محمدآباد جرقوبه	تبخیرسنجی	۳۵۷۶۳۱۸	۶۰۳۶۹۵	۱۶۰۳
هونجان	سنیوتیک	۳۴۹۸۵۳۷	۵۱۲۸۹۵	۲۳۶۳
اصفهان (جنوب)	سنیوتیک	۳۵۹۸۰۶۵	۵۶۶۳۷۳	۱۵۴۹
داران فریدن	سنیوتیک	۳۶۵۰۰۸۳	۴۴۴۵۵۱	۲۳۲۳
بروجن	سنیوتیک	۳۵۳۶۴۸۰	۵۲۷۶۴۴	۲۳۳۵
زرین شهر	سنیوتیک	۳۵۸۴۷۴۰	۵۳۵۵۰۰	۱۷۱۷
سامان	سنیوتیک	۳۵۹۰۵۰۰	۴۹۱۶۰۰	۱۹۶۷
شرق اصفهان	سنیوتیک	۳۶۳۳۲۲۲	۵۸۰۸۴۵	۱۵۴۱
شهرضا	سنیوتیک	۳۵۳۸۶۷۹	۵۷۶۵۱۷	۱۸۵۶
فریدون شهر	سنیوتیک	۳۶۴۵۰۰۱	۴۱۸۴۵۳	۲۵۴۷
کبوترآباد	سنیوتیک	۳۵۹۷۷۸۹	۵۷۸۳۱۰	۱۵۴۱
کوه رنگ	سنیوتیک	۳۵۹۱۴۱۹	۴۱۷۷۸۶	۲۳۲۹
مبارکه	سنیوتیک	۳۵۸۰۳۵۳	۵۴۴۴۵۱	۱۶۷۸
مورچه خورت	سنیوتیک	۳۶۶۰۱۳۹	۵۴۴۹۱۰	۱۶۶۹
میمه	سنیوتیک	۳۷۰۱۴۱۱	۵۱۶۲۹۷	۲۰۱۲
نجف آباد	سنیوتیک	۳۶۰۷۴۸۷	۵۳۶۴۶۸	۱۶۳۴
ورزنه	سنیوتیک	۳۵۸۹۶۵۰	۶۵۵۵۷۲	۱۴۸۳

از داده‌های ماهانه در ۴۰ ایستگاه پراکنده در سراسر کشور نشان داد که روش‌های HS و PMFAO در صورت استفاده از kRs مناسب، ET_0 را برای تمام مناطق آب و هوایی ایران قابل قبول، پیش‌بینی می‌کنند (Raziei and Pereira 2013). تلاش در محاسبات نیاز آبی آبیاری در حوضه آبریز زاینده رود و دیگر مناطق خشک و نیمه‌خشک با داده‌های آب و هوایی محدود، ضرورت بررسی روش‌هایی را که از داده‌های کمتر استفاده می‌کنند آشکار می‌نماید (Talebmorad et al. 2020). در این حوضه بجز چند نقطه و محدود به دوره زمانی کوتاه با اطلاعات ناقص برای اندازه‌گیری توسط لایسیمتر، داده‌ای در دسترس نیست. از طرفی تعداد ایستگاه‌های هواشناسی که بتوانند داده‌های مطلوب برای روش PMFAO را در یک دوره آماری درازمدت در اختیار قرار دهند، محدود به چند ایستگاه سینیوتیک می‌باشند. بر خلاف توصیه فائو ۵۶ مبنی بر عدم استفاده از روش‌های دیگر برای محاسبه ET_0 ، در تحقیقات و مطالعات مختلف از روش‌هایی همچون HS استفاده شده است. با توجه به این که روش HS تنها به داده‌های دمایی اندازه‌گیری شده نیاز دارد، می‌توان گفت این روش ساده است و به نظر می‌رسد که وقتی که داده‌ها از مناطق خشک یا نیمه‌خشک و بدون آبیاری جمع‌آوری می‌شوند، کم‌تر از روش‌های دیگر تحت‌تاثیر قرار می‌گیرد (Majidi et al. 2015). در حوضه زاینده رود که تعداد ایستگاه‌ها و پارامترهای اندازه‌گیری با محدودیت شدید روبروست، لازم بود که ملاحظات استفاده از روش با داده‌های کمتر نسبت به PMFAO که از داده‌های وسیع‌تری استفاده می‌نماید مورد بررسی قرار گیرد. از آن جایی که لازم بود در این پژوهش گام زمانی روزانه نیز در کنار گام‌های ماهیانه و سالانه تجزیه و تحلیل شود، تولید داده روزانه از نظر زمانی و برای نقاط مختلف در سطح حوضه و همچنین به تولید ET_0 به صورت نیمه توزیعی در کل حوضه در مقیاس‌های مختلف زمانی پرداخته نشده است.

مواد و روش‌ها

منابع داده و تحلیل‌ها

مساحت حوضه آبریز زاینده‌رود واقع در فلات مرکزی ایران بیش از ۲۶ هزار کیلومترمربع و دارای جمعیتی بیش از

دو متری (متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_a فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس) و γ ضریب سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس) است. یکی دیگر از پارامترهای اندازه‌گیری شده تبخیر از سطح آزاد آب ET_0 است. تبخیر از تشت با یک ضریب تجربی می‌تواند با ET_0 در ارتباط باشد.

$$ET_0 = K_p \times E_{pan} \quad (5)$$

که در آن ET_0 تبخیر-تعرق مرجع، E_{pan} تبخیر تشت و K_p ضریب تشت نامیده می‌شوند. درحالتی که ضریب تشت مشخص نیست، رابطه تبخیر از تشت با روش پنمن مانیتث واسنجی گردید.

روش‌ها

در این پژوهش، برای محاسبه ET_0 از روش PMFAO و همچنین روش HS استفاده شد. محاسبات مربوط به ET_0 به روش فائو با یک کد به زبان پایتون انجام شد. در کد مزبور پس از ورود داده‌ها و صحت سنجی آن‌ها، برای هر روز در سال میلادی ابتدا محاسبات مربوط به کمبود فشار بخار و همچنین فشار بخار واقعی انجام شد. در ادامه تابش خورشیدی در آسمان صاف^۲ محاسبه گردید. سپس با اعمال اثر ابرناکی و همچنین اصلاح ناشی از رطوبت هوا، مقدار خالص تابش طول‌موج بلند خروجی حساب شد. در نهایت با داشتن رابطه گرمای نهان تبخیر و دخالت اثر سرعت باد در ارتفاع دو متری، مقدار ET_0 به صورت روزانه استخراج گردید. جزئیات مربوط به این روش در نشریه ۵۶ فائو موجود است. ابتدا برای ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه زاینده‌رود که داده‌های مورد نیاز این روش را اندازه‌گیری می‌نمایند، ET_0 روزانه محاسبه شد. روش HS برای محاسبات ET_0 در ایران و بسیاری از کشورهای جهان به‌ویژه مناطق گرم و خشک مورد تأیید قرار گرفته است. به‌منظور محاسبه روزانه ET_0 به روش HS از یک کد به زبان VBA بهره گرفته شد. الگوریتم به کار گرفته شده در این کد به نحوی برنامه‌نویسی شد که تابش فرازمینی را از روابط مشابه روش قبلی محاسبه و در اختیار قرار دهد. با ورود

است که در محاسبات ET_0 هم کاربرد دارد. این پارامتر طبق تعریف، مقدار گرمایی است که یک گرم آب نیاز دارد تا بدون تغییر درجه حرارت به بخار تبدیل شود. مقدار آن از روابط محاسبه می‌شود.

$$H_v = 597.3 - 0.56 t \quad (1)$$

$$\lambda = 2.501 - 0.002361 t \quad (2)$$

در روابط بالا، t درجه حرارت برحسب درجه سانتی‌گراد، H_v گرمای نهان تبخیر برحسب کالری و λ گرمای نهان تبخیر برحسب $\frac{mJ}{kg}$ می‌باشد. به‌طور عمومی گرمای نهان تبخیر برای درجه حرارت ۲۰ درجه سانتی‌گراد $\frac{mJ}{kg}$ ۲/۴۵ می‌باشد. در محاسبه ET_0 از ضرب مقدار $0.408 = \frac{1}{\lambda}$ برای بیان انرژی ورودی هوا در واحد زمان و تبدیل مگا ژول بر مترمربع در روز به میلی‌متر بر روز استفاده می‌شود. روش HS در ابتدا توسط (Hargreaves 1975) برای هشت سال در فصل سرد در ایالت کالیفرنیا استخراج شد. پس از توسعه و بهبود این روش، در نهایت (Hargreaves and Samani 1985) معادله زیر را ارائه کردند.

$$ET_0 = 0.0023 \frac{1}{\lambda} R_a (\bar{T}_{avg} + 17.8) (T_{Max} - T_{Min})^{0.5} \quad (3)$$

که در آن، λ گرمای نهان تبخیر (مگاژول بر کیلوگرم)، ET_0 تبخیر تعرق مرجع (میلی‌متر بر روز)، T_{Max} حداکثر دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)، T_{Min} حداقل دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)، \bar{T}_{avg} میانگین دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد) و R_a تابش فرازمینی (مگاژول بر مترمربع در روز) است. ET_0 با روش PMFAO، برای یک گیاه فرضی با ارتفاع ۰/۱۲ متر، مقاومت سطحی ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب بازتابش (آلبیدو) ۰/۲۳ (که تبخیر از آن بسیار به تبخیر از سطح وسیع چمن سبز با ارتفاع یکنواخت شباهت دارد) از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$ET_0 = \frac{\frac{1}{\lambda} \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (4)$$

که در آن ET_0 تبخیر-تعرق مرجع (میلی‌متر بر روز)، R_n تابش خالص ورودی به سطح گیاه مرجع (مگا ژول بر مترمربع بر روز)، G شار گرمای خاک (مگا ژول بر مترمربع بر روز)، T میانگین روزانه درجه حرارت در ارتفاع دو متری (درجه سانتی‌گراد)، u_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع

^۲- Clear-Sky Radiation (RSO)

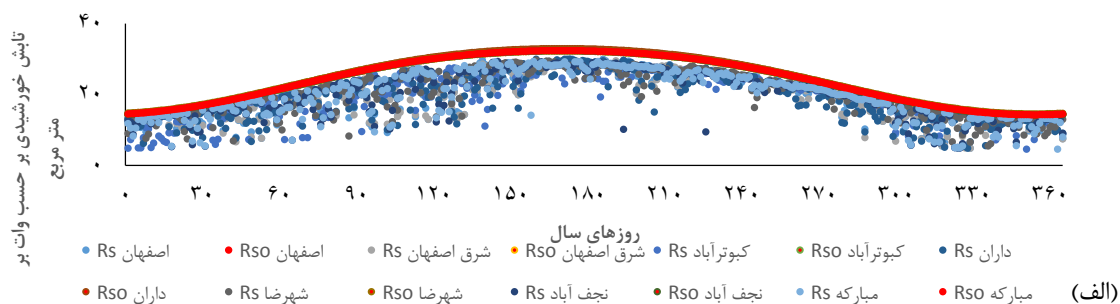
روش میان یابی کریجینگ، مقدار تبخیر تعرق HS برای کل حوضه محاسبه شد. به این ترتیب، امکان مقایسه ET_0 به روش HS با مقادیر ET_0 به روش PMFAO، در ایستگاه های سینوپتیک و با استفاده از دسته داده های مرتبط با همه ایستگاه ها فراهم شد. مقایسه دو مدل با گام های زمانی روزانه، ماهیانه و سالانه و همچنین مقایسه مکانی دو مدل می تواند به صورت کیفی عدم قطعیت هر روش را تا حدی نمایش دهد. از این رو مقایسه ها با ضریب نش ساتکلیف انجام شد. به طور کلی هر چه مقدار معیار نش ساتکلیف به عدد یک نزدیک تر باشد، نشان دهنده کارایی بیشتر است.

نتایج و بحث

با رسم میانگین قرائت های روزانه تابش خورشیدی (R_s) در مقابل تابش طول موج کوتاه محاسبه شده در آسمان صاف (R_{SO})، عملکرد پیرانومتر و دقت واسنجی آن برای هفت ایستگاه سینوپتیک حوضه زاینده رود و برای ۲۵ سال آماری ارزیابی شد. شکل (۲-الف)، به عنوان نمونه سال ۲۰۱۸ را به تصویر کشیده است و نشان داده شد مقادیر R_s مشاهده شده با R_{SO} محاسبه شده هم خوانی دارد و واسنجی پیرانومترهای مورد استفاده مناسب بوده است. منحنی رطوبت نسبی در مقابل بارش نشان داد ثبت رطوبت نسبی حداکثر به طور قابل قبولی با بارندگی همخوانی دارد. به عبارتی هنگام بارش رطوبت نسبی ثبت شده افزایش چشمگیری دارد. به عنوان نمونه شکل (۲-ب)، بارندگی و رطوبت نسبی را در ایستگاه سینوپتیک اصفهان نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود شماره روزهای ۱۶۰ لغایت ۲۸۰ مربوط به ماه های خرداد تا مهر می شود که به علت عدم بارش و گرمای هوا، حداکثر رطوبت نسبی نیز با نوسان کمتر و در حدود ۲۰ الی ۵۰ درصد تغییر داشته است. در این زمان ها، عدم وقوع بارش و کاهش چشمگیر رطوبت نسبی مشهود است.

مقادیر حداقل و حداکثر درجه حرارت روزانه، مقادیر ET_0 برای هرروز محاسبه می شود. به این ترتیب برای همه ۲۹ ایستگاه در حوضه این مقادیر در اختیار قرار گرفت. در گام بعدی، ضرایب تشت تبخیر با مقایسه میزان تبخیر تشت با مقادیر ET_0 به روش PMFAO به صورت ماهیانه محاسبه و پیشنهاد گردید. بالاخره در گام نهایی با استفاده از داده های کل ایستگاه های حوضه زاینده رود اعم از ایستگاه های سینوپتیک، ایستگاه های کلیماتولوژی و ایستگاه های تبخیر سنجی وزارت نیرو که همگی درجه حرارت های حداقل و حداکثر را ثبت می کنند اقدام به محاسبه ET_0 به روش HS شد. نحوه انجام کار به این صورت بود که کلیه ایستگاه های دارای آمار مورد بررسی قرار گرفت و با هدف داشتن یک دوره مشترک درازمدت، ایستگاه های مناسب انتخاب شدند. به منظور تکمیل کمبود داده ها و رفع نواقص آماری از مدل شبیه ساز اقلیمی WXGEN^۲ استفاده شد. مدل شبیه ساز یاد شده، یکی از مدول های نرم افزار SWAT قادر است داده های اقلیمی گم شده را شبیه سازی نماید. به این منظور تعداد ۲۴۲ زیرحوضه یا واحد هیدرولوژیکی، برای پوشش دادن کل محدوده حوضه آبریز رودخانه زاینده رود در نظر گرفته شد و برای هر یک از ۲۴۲ زیرحوضه، مقادیر متوسط حداکثر و حداقل درجه حرارت برحسب درجه سانتی گراد در هر کدام از ماه های میلادی دوره آماری ۲۴ ساله ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۸ تولید شد. پس از آن مدل شبیه ساز اقلیمی، داده های اقلیمی را از نزدیک ترین ایستگاه هواشناسی برای تک تک زیرحوضه ها از پرونده های ورودی اخذ و با استفاده از متوسط درازمدت ماهانه پارامتر، توزیع آماری و مشخصات هر پارامتر، نسبت به برآورد پارامتر مربوطه در ۲۴۲ نقطه حوضه اقدام کرد. در نهایت پارامترهای حداکثر و حداقل درجه حرارت ماهیانه برای ۲۴۲ نقطه از حوضه زاینده رود از ژانویه ۱۹۹۵ تا دسامبر ۲۰۱۸ محاسبه شد. با نوشتن یک کد VBA، مقدار ET_0 در هر یک از ۲۴۲ زیرحوضه محاسبه شد. با محاسبه این ارقام و به کار بردن

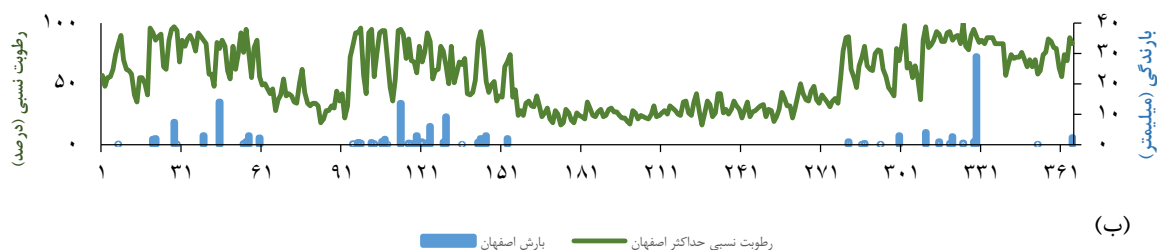
^۲-The Weather Generator for Soil and Water Assessment Tool (SWAT)



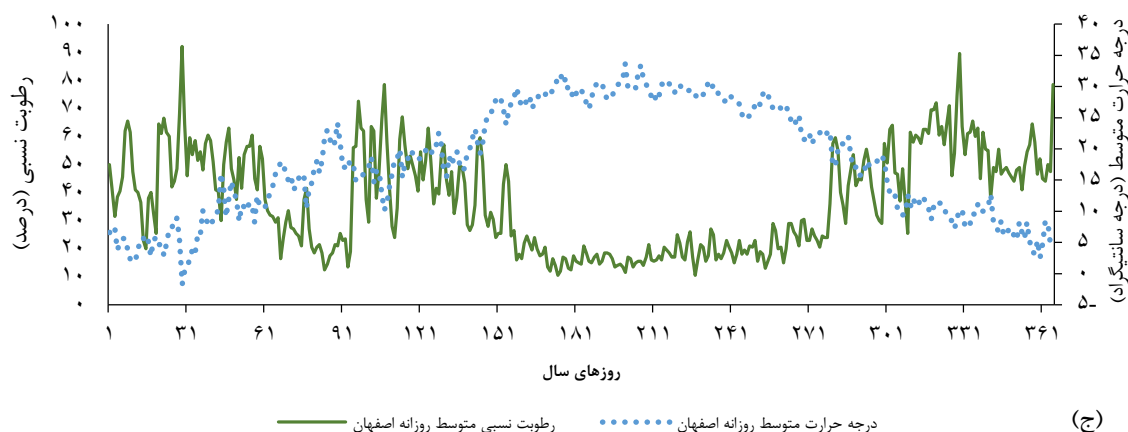
شکل (۲): الف- هم پوشانی متوسط RS و RSO برآورد شده - سال ۲۰۱۸

تغییرات ترسیم شده است. کنترل و ارزیابی‌های دیگر بر روی مقادیر محاسباتی و مشاهداتی در هر یک از هفت ایستگاه سینوپتیک مورد بررسی و برای هر سال نشان دهنده داده‌های مناسب از این نظر می‌باشد.

در فصول دیگر به علت وقوع بارندگی رطوبت نسبی حداکثر نیز افزایش داشته و نوسانات آن قابل توجه است. شکل (۲-ج)، به خوبی نشان می‌دهد مقادیر درجه حرارت و رطوبت نسبی رابطه عکس دارند. در این نمودار مقادیر میانگین متحرک هفت روزه هر دو متغیر نیز برای درک بهتر



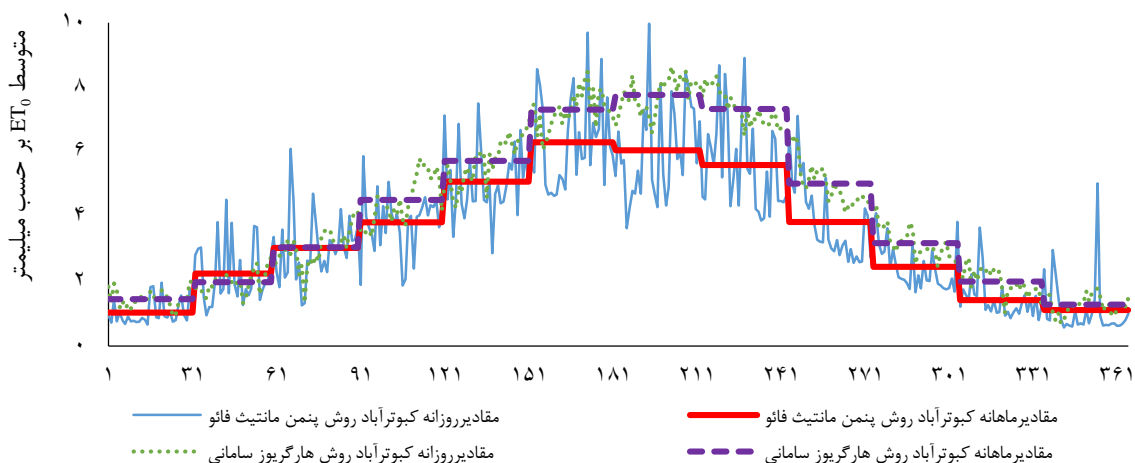
ادامه شکل (۲): ب- نمایش مقادیر رطوبت نسبی و بارش در ایستگاه سینوپتیک اصفهان و محور افقی روزهای سال است



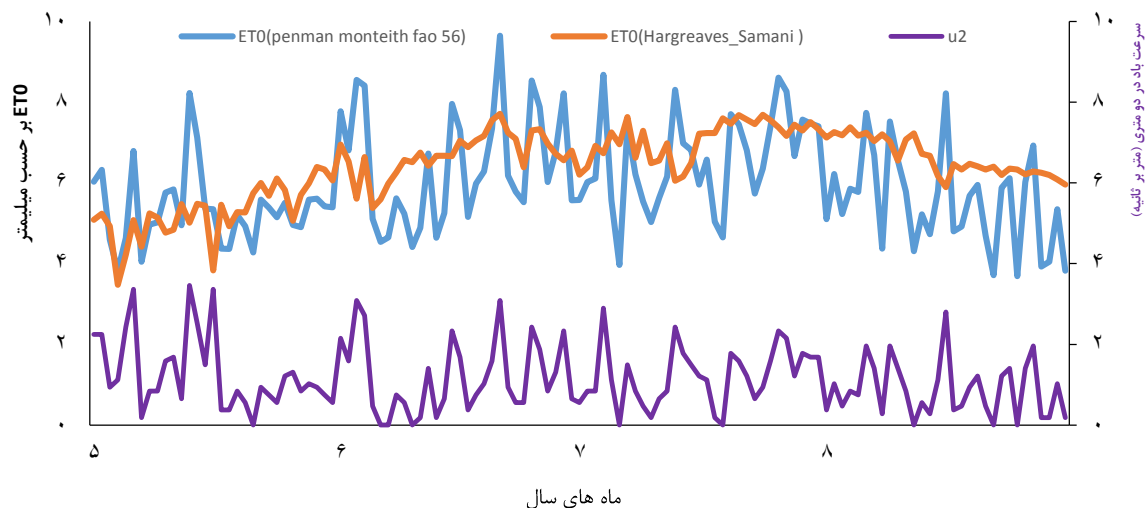
ادامه شکل (۲): ج- نمایش رابطه عکس رطوبت نسبی و درجه حرارت، در ایستگاه سینوپتیک اصفهان و محور افقی روزهای سال است

به دو روش برای کل روزهای سال تطابق کلی را نشان می‌دهد. هر چند نوسانات روزانه دو روش با یکدیگر همخوانی ندارد. همچنین خطوط ضخیم، متوسط ماهیانه را نشان می‌دهد که تطابق بهتر را در ماه‌های ابتدا و انتهای سال می‌توان به خوبی مشاهده کرد. در شکل (۴)، برای ایستگاه اصفهان، منحنی سرعت باد همزمان با ET_0 در گام روزانه ترسیم شد. در این شکل بخاطر درک بهتر، فقط ماه‌های پنجم تا هشتم نمایش داده شد.

نمونه این آنالیز برای پارمای آیداهو در سال ۱۹۹۸ منتشر شد (Walter et al. 2005). همچنین (Moreno-Tejera et al. 2015) این روش را تأیید کردند. در ادامه، (گام اول) مقادیر ET_0 به روش‌های PMFAO و HS به صورت روزانه در هفت ایستگاه سینوپتیک حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود و برای بازه زمانی ۲۵ ساله از ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۹ محاسبه شد. به عنوان نمونه مقادیر روزانه دو روش بالا، برای سال ۱۹۹۴ ایستگاه کیوتراآباد در شکل (۳) ارائه شد. در این شکل، ET_0



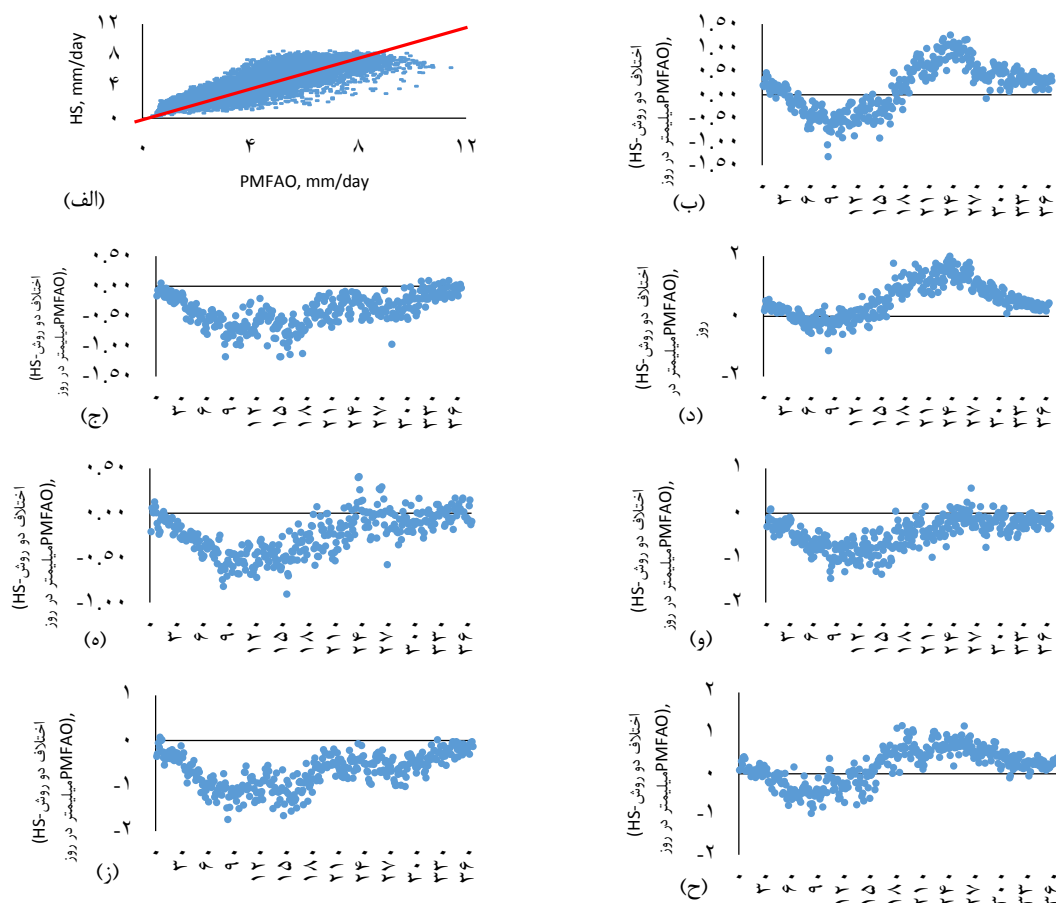
شکل (۳): مقادیر تبخیر-تعرق مرجع پنمن مانتیث و هارگریوز-سامانی در ایستگاه سینوپتیک کیوتراآباد-سال ۱۹۹۴



شکل (۴): مقادیر تبخیر-تعرق مرجع پنمن مانتیث و هارگریوز-سامانی به همراه سرعت باد در بعضی ماه‌ها در ایستگاه سینوپتیک اصفهان-سال ۱۹۹۴

(۵-ح) به ترتیب برای ایستگاه‌های شرق اصفهان، کبوترآباد، داران، شهرضا، نجف آباد و مبارکه است. در جدول (۲) دامنه عدم قطعیت داده‌های روزانه درج شد. در مقایسه دو روش در گام زمانی روزانه، ضریب نش ساتکلیف، اعداد قابل قبولی در همه سال‌ها و برای همه ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. مقادیر ضریب کارایی مدل نش ساتکلیف برای متوسط درازمدت ET_0 بین دو روش مورد پژوهش در جدول (۲) آورده شد. (Hargreaves and Allen 2003) نیز برای ۳۰۰۰ ایستگاه در سراسر دنیا رابطه مستقیمی در گام زمانی روزانه بین روش PMFAO با دیگر روش‌ها نیافت و حداقل دوره زمانی با رابطه مناسب را گام زمانی پنج روزه اعلام نمود. در گام دوم، مقادیر ET_0 ماهیانه و سالانه به روش PMFAO و HS با همدیگر مقایسه شدند.

به طور کلی نتایج مقایسه دو روش نشان داد ET_0 به روش PMFAO با استفاده از داده‌های تابش، فشار بخار و سرعت باد، نوسانات روزانه شدیدی را نسبت به روش HS نشان می‌دهد. در شکل (۵-الف)، مقادیر روزانه ET_0 در ایستگاه اصفهان برای دو روش PMFAO و HS در طول دوره بیش از ۲۵ سال و با تعداد ۹۵۸۸ روز در مقابل هم ترسیم شد. پراکنش نقاط نشان دهنده رابطه مناسب دو روش است. ولی برای دریافتن تحلیل درون‌سالی شکل (۵-ب) که اختلاف دو روش را در متوسط کل دوره نشان می‌دهد ترسیم شد. در این شکل محور افقی روز است که با تقسیمات ۳۰ روزه معرف ماه‌های میلادی ترسیم شده است. از این شکل دریافت می‌شود اختلاف دو روش در مقیاس روزانه حداکثر $\pm 1/5$ میلی‌متر در روز است که در ماه‌های سوم، چهارم و هشتم به اوج می‌رسد. شکل‌های (۵-ج) تا



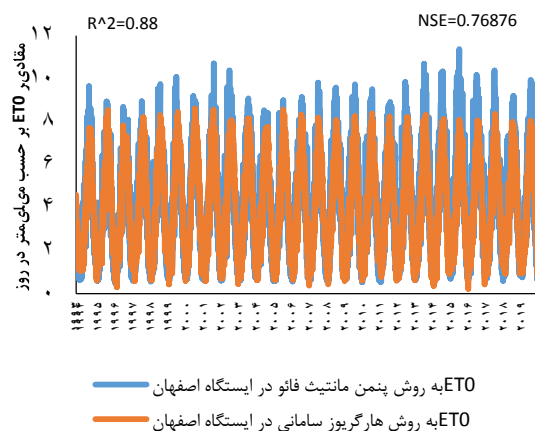
شکل (۵): الف: مقادیر ET_0 برای دو روش PMFAO و HS. ب: اختلاف دو روش برای متوسط یک دوره ۲۵ ساله در ایستگاه سینوپتیک اصفهان ج: شرق اصفهان د: کبوتر آباد ه: داران و: شهرضا ز: نجف آباد ح: مبارکه

جدول (۲): مقایسه دو روش تبخیر-تعرق مرجع به روش پنمن-مانتیث-فائو و روش هارگریوز-سامانی با ضریب نش ساتکلیف

ایستگاه	ضریب نش ساتکلیف		متوسط درازمدت اختلاف دو روش (میلیمتر در روز)	
	روزانه	ماهانه	حداقل	حداکثر
اصفهان	۰/۷۷	۰/۹۱	-۱/۳۲	+۱/۲۷
شرق اصفهان	۰/۸۷	۰/۹۵	-۱/۱۴	+۰/۱۰
کیوتر آباد	۰/۶۳	۰/۸۰	-۱/۱۴	+۲/۰۰
داران	۰/۸۷	۰/۹۶	-۰/۹۰	+۰/۴۱
شهرضا	۰/۷۴	۰/۹۱	-۱/۴۵	+۰/۵۶
نجف آباد	۰/۷۸	۰/۸۸	-۱/۷۴	+۰/۰۸
مبارکه	۰/۸۵	۰/۹۴	-۰/۹۷	+۱/۱۹

سری های زمانی محاسبه شده از دو روش، به ترتیب مربوط به ایستگاه های داران، شرق اصفهان، مبارکه، اصفهان و شهرضا با ضرایب نش ساتکلیف بالای ۹۰ درصد است. آنچه تاکنون مشخص است این که در مقایسه بین دو روش در ایستگاه های مختلف، تفاوت های یکسانی وجود ندارد. به عنوان مثال در ایستگاه کیوترآباد تقریباً هر ساله، مقادیر ET_0 به روش HS از PMFAO بیشتر است. در ایستگاه اصفهان در بعضی از سال ها مقادیر HS بیشتر از PMFAO هستند و در بعضی سال ها برعکس می باشد. مقادیر تفاوت دو روش به صورت درصد در جدول (۳) گزارش شد. تا این بخش از پژوهش تفاوت دو روش در ایستگاه های سینوپتیک به صورت نقطه ای و برای مقاطع زمانی روزانه، ماهیانه و سالانه مشخص شد. گام بعدی پژوهش، بررسی تفاوت دو روش با استفاده از کلیه ایستگاه های ثبت داده های درجه حرارت بود. برای این کار از مدل SWAT بهره گرفته شد. مقادیر ماهیانه ET_0 به روش HS از ژانویه ۱۹۹۵ تا دسامبر ۲۰۱۸، برای ۲۴۲ زیرحوضه محاسبه و مقادیر درازمدت آن با روش کریجینگ به صورت یک نقشه هم تبخیر-تعرق مرجع، در کل حوضه آبریز زاینده رود ترسیم شد که نشان دهنده مقدار متوسط درازمدت ET_0 در حوضه زاینده رود است (شکل ۷).

شکل (۶)، انطباق نسبتاً مناسب دو روش را برای ایستگاه سینوپتیک اصفهان به عنوان نمونه نشان می دهد.



شکل (۶): مقادیر ماهیانه تبخیر-تعرق مرجع پنمن مانتیث و هارگریوز در ایستگاه سینوپتیک اصفهان

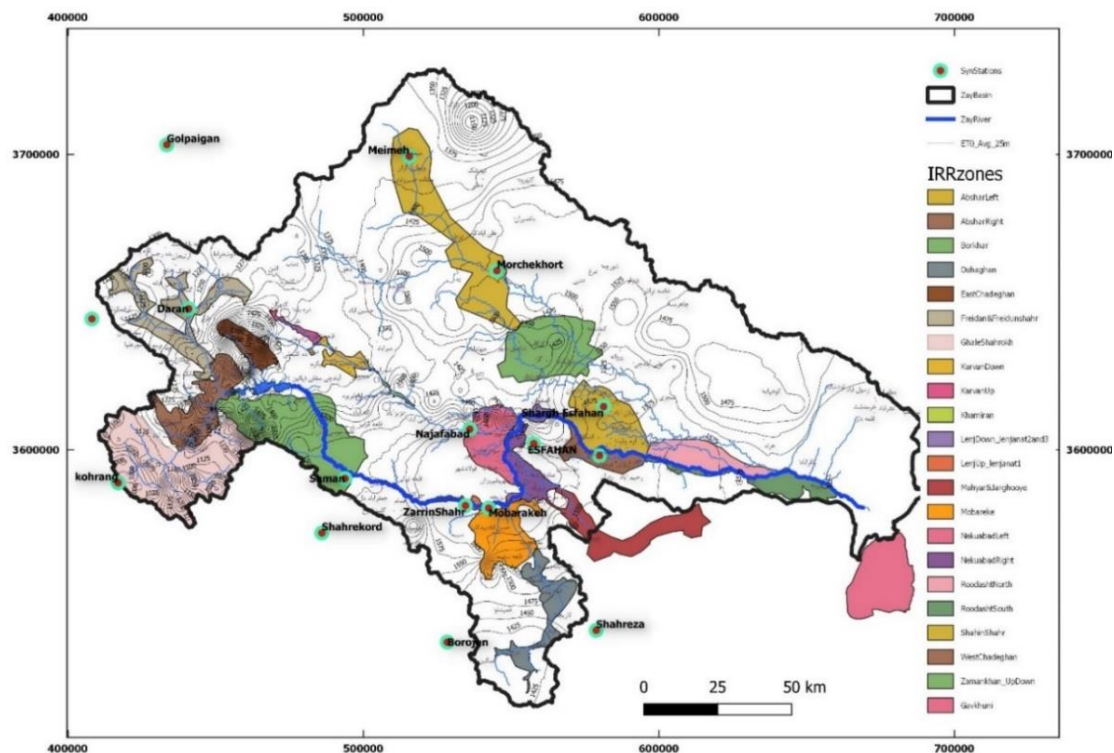
مقادیر ضریب نش ساتکلیف دو روش در جدول (۲) نشان دهنده انطباق نسبتاً خوب دو روش PMFAO با HS در گام ماهیانه است. بنابراین در صورتی که گام زمانی ماهیانه مد نظر باشد و فقط مقدار ET_0 هدف باشد، می توان توصیه نمود از روش HS به جای PMFAO استفاده کرد. نتایج بدست آمده در این پژوهش نشان داد که بیشترین انطباق

جدول (۳): درصد اختلاف دو روش PMFAO و HS در سال‌های مختلف به صورت متوسط سالانه

سال	اصفهان	شرق اصفهان	کبوتر آباد	داران	شهرضا	نجف آباد	مبارکه
۱۹۹۴	۶	-۴	۲۱	-۴	۱	-۱۷	۵
۱۹۹۵	۱۴	-۴	۲۶	-۲	-۴	-۱۱	۸
۱۹۹۶	۱۳	-۸	۲۵	-۷	-۱۰	-۱۱	۸
۱۹۹۷	۷	-۸	۲۱	-۷	-۱۱	-۱۳	۶
۱۹۹۸	۷	-۵	۳۱	-۷	-۸	-۱۳	۷
۱۹۹۹	۱۰	-۵	۲۴	-۶	-۹	-۱۳	۸
۲۰۰۰	۸	-۹	۲۱	-۹	-۳	-۱۴	۹
۲۰۰۱	۶	-۱۰	-۵	-۵	-۱۱	-۱۵	۷
۲۰۰۲	۲	-۸	۸	-۸	-۶	-۱۷	۵
۲۰۰۳	۷	-۶	۱۶	-۶	-۵	-۲۰	۹
۲۰۰۴	۱۱	-۷	۲۸	-۵	-۴	-۱۹	۹
۲۰۰۵	۱۰	-۷	۳۰	-۱	-۵	-۱۷	۶
۲۰۰۶	۳	-۹	۱۴	-۱	-۶	-۱۵	۶
۲۰۰۷	۳	-۱۰	۲۱	۶	-۳	-۱۳	۸
۲۰۰۸	۱	-۱۲	۱۶	-۳	-۱۴	-۱۸	-۲
۲۰۰۹	۵	-۱۴	۱۴	-۱۱	-۱۷	-۱۰	۰
۲۰۱۰	۹	-۱۰	۱۸	-۹	-۱۷	-۱۱	۱۳
۲۰۱۱	۴	-۷	۱۱	-۱۲	-۱۶	-۱۵	۰
۲۰۱۲	-۲	-۹	۸	-۱۱	-۱۵	-۱۶	۰
۲۰۱۳	-۵	-۱۲	۶	-۱۲	-۱۳	-۱۶	۷
۲۰۱۴	-۴	-۱۰	۹	-۸	-۱۲	-۱۳	۶
۲۰۱۵	-۸	-۱۳	۷	-۸	-۱۵	-۱۶	۰
۲۰۱۶	-۵	-۱۲	۴	-۹	-۱۵	-۱۵	-۴
۲۰۱۷	۱	-۸	۸	-۸	-۱۵	-۵	-۲
۲۰۱۸	-۱	-۷	۳	-۸	-۱۳	-۵	-۲
۲۰۱۹	۳	-۷	۷	-۵	-۵	-۱۳	۸
میانگین	۴/۰۴	-۸/۵	۱۵/۰۸	-۶/۳۸	-۹/۶۵	-۱۳/۸۸	۴/۸۱

تطابق خوب این دو روش است. در شکل (۸) مقادیر متوسط سالانه ET_0 برای حوضه زاینده‌رود طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۸ محاسبه و درج گردید.

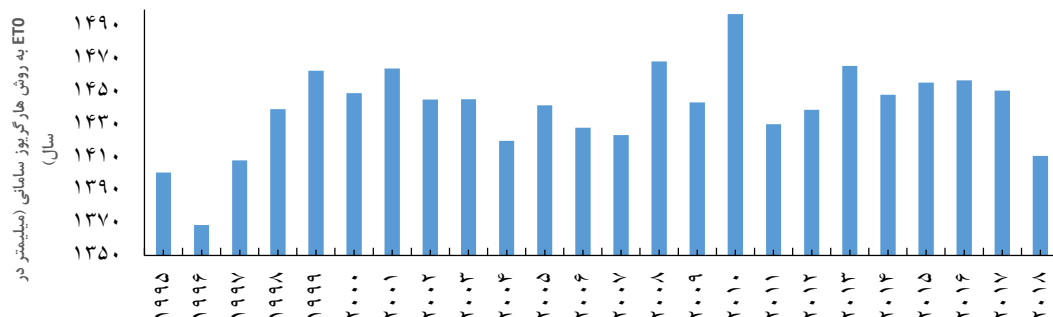
چنانچه مشاهده می‌شود مکان ایستگاه‌های سینوپتیک نیز روی شکل مشخص شد. در همه ایستگاه‌ها تفاوت بین روش PMFAO و HS کمتر از ۹/۵ درصد می‌باشد که نشان از



شکل (۷): ترسیم خطوط هم تبخیر تعرق مرجع به روش هارگریوز-سامانی در حوضه زاینده رود و جانمایی ایستگاه های سینوپتیک

داده های موجود تبخیر از تشت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نمایش تبخیر از تشت و مقادیر ET_0 به دو روش PMFAO و HS نشان دهنده انطباق بیشتر روش PMFAO با تشت تبخیر است. با داشتن مقادیر روزانه تبخیر از تشت، اقدام به برآورد متوسط ماهیانه این متغیر گردید. به این ترتیب محاسبه ضریب تشت، با برقراری نسبت تبخیر تعرق PMFAO و تبخیر از تشت در هر ماه میسر شد. جدول (۴) مقادیر ضریب تشت ماهیانه را نشان می دهد.

این مقادیر از حداقل ۱۳۶۹ میلی متر در سال ۱۹۹۶ تا حداکثر ۱۴۹۷ میلی متر در سال ۲۰۱۰ تغییر می کند. طبق شکل ۸، متوسط ET_0 حوضه ۱۴۴۰ میلی متر محاسبه شد. (Moratiet et al. 2020) در تحقیقات خود در حوضه دوترای اسپانیا برای دوره زمانی ۲۰۱۸-۲۰۰۰ و تعداد ۴۹ ایستگاه اندازه گیری نشان دادند عملکرد مدل HS، بسته به سالیانه یا فصلی بودن مقیاس زمانی، به طور قابل توجهی تغییر می کند و در مقیاس زمانی سالانه تطابق مناسب دو روش HS و PMFAO را تأیید کردند. در آخرین بخش پژوهش،



شکل (۸): مقادیر متوسط سالانه تبخیر تعرق مرجع به روش هارگریوز-سامانی در حوضه زاینده رود

جدول (۴): تبخیر از تشت، ضریب تشت و تبخیر-تعرق مرجع PMFAO و HS در بعضی ایستگاه‌های حوضه زاینده‌رود

ایستگاه	روش	ژانویه	فوریه	مارس	اپریل	می	جون	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
کبوترآباد	PMFAO	۲۸/۷۰	۸۹/۵۲	۱۱۳/۹۱	۱۳۵/۳۹	۱۷۸/۹۶	۱۹۰/۶۰	۱۹۷/۷۲	۱۶۸/۰۴	۱۲۶/۰۵	۸۸/۸۸	۴۸/۸۰	۳۳/۶۰
	HS	۴۵/۹۴	۵۶/۷۹	۱۰۴/۵۷	۱۳۶/۴۴	۱۸۶/۳۵	۲۲۱/۹۱	۲۳۸/۲۴	۲۱۷/۲۲	۱۶۵/۱۰	۱۱۳/۲۹	۶۴/۰۷	۴۷/۱۶
	تبخیر از تشت	۱۲۷/۱۰	۱۰۱/۵۰	۱۶۵/۱۰	۲۰۸/۴۴	۲۸۱/۵۰	۳۴۲/۲۳	۳۷۳/۸۸	۳۳۸/۲۲	۲۳۹/۳۵	۱۵۰/۷۳	۶۸/۲۳	۶۱/۲۸
	ضریب تشت(Kp)	-/۲۳	-/۸۸	-/۶۹	-/۶۵	-/۶۴	-/۵۶	-/۵۳	-/۵۱	-/۵۳	-/۵۹	-/۷۲	-/۵۵
داران	PMFAO	۳۸/۹۲	*	۹۸/۹۱	۱۱۴/۸۳	۱۵۵/۵۰	۱۸۲/۹۴	۱۹۷/۸۲	۱۷۴/۷۹	۱۳۳/۳۵	۸۹/۴۱	۵۳/۳۵	۲۷/۰۰
	HS	۳۵/۱۱	*	۸۱/۰۳	۹۹/۳۳	۱۳۹/۰۹	۱۷۳/۳۴	۱۸۹/۶۷	۱۷۴/۰۵	۱۳۲/۳۴	۸۶/۹۵	۵۰/۸۴	۳۳/۲۷
	تبخیر از تشت	۵۲/۷۰	*	۱۳۶/۵۱	۱۶۲/۷۰	۲۳۰/۴۱	۲۹۴/۵۵	۳۴۳/۵۸	۳۳۰/۱۴	۲۴۱/۸۹	۱۵۳/۷۹	۷۷/۸۰	۱۳۸/۷۳
	ضریب تشت(Kp)	-/۷۴	*	-/۷۲	-/۷۱	-/۶۷	-/۶۲	-/۵۸	-/۵۵	-/۵۵	-/۵۸	-/۶۹	-/۱۹
شهرضا	PMFAO	*	*	۱۲۵/۳۷	۱۴۷/۴۲	۱۹۴/۵۰	۲۱۷/۷۲	۲۲۶/۷۳	۲۰۲/۲۷	۱۵۶/۴۰	۱۱۰/۰۹	۶۸/۸۸	۵۶/۲۸
	HS	*	*	۹۷/۶۲	۱۲۲/۱۳	۱۶۹/۲۱	۲۰۳/۱۵	۲۱۵/۲۷	۱۹۷/۳۳	۱۵۲/۳۱	۱۰۴/۳۶	۶۰/۴۲	۴۱/۹۶
	تبخیر از تشت	*	*	۲۱۳/۳۲	۲۴۴/۵۷	۳۴۴/۳۷	۴۱۸/۴۲	۴۵۵/۱۳	۴۰۶/۰۲	۳۱۷/۵۷	۲۱۸/۲۷	۱۲۰/۳۴	۹۲/۹۵
	ضریب تشت(Kp)	*	*	-/۵۹	-/۶۰	-/۵۶	-/۵۲	-/۵۰	-/۵۰	-/۴۹	-/۵۰	-/۵۷	-/۶۱
نجف آباد	PMFAO	*	*	۱۲۸/۸۹	۱۵۶/۷۴	۲۱۱/۲۳	۲۴۰/۱۷	۲۴۳/۰۸	۲۲۴/۰۱	۱۷۵/۱۴	۱۲۶/۶۱	۶۶/۸۷	۵۱/۰۹
	HS	*	*	۱۰۰/۶۸	۱۲۷/۳۸	۱۷۴/۷۸	۲۰۸/۹۰	۲۳۳/۹۹	۲۰۱/۲۲	۱۵۳/۵۸	۱۰۶/۶۸	۵۸/۴۴	۴۷/۰۲
	تبخیر از تشت	*	*	۱۶۸/۸۷	۱۹۵/۰۵	۲۸۳/۹۵	۳۵۲/۳۰	۳۸۰/۸۰	۳۴۰/۴۲	۲۴۹/۶۴	۱۷۹/۹۸	۷۴/۷۰	۵۱/۹۵
	ضریب تشت(Kp)	*	*	-/۸۲	-/۸۰	-/۷۴	-/۶۸	-/۶۴	-/۶۶	-/۷۰	-/۷۰	-/۹۰	-/۹۸
مبارکه	PMFAO			۱۲۴/۸۷	۱۴۱/۳۱	۱۸۷/۷۴	۲۰۴/۱۷	۲۱۳/۴۶	۱۸۶/۳۹	۱۴۳/۲۵	۱۰۰/۶۳	۵۶/۵۶	۴۴/۳۹
	HS			۱۰۳/۴۴	۱۳۲/۱۳	۱۸۲/۶۴	۲۱۷/۱۲	۲۳۰/۰۴	۲۰۷/۰۶	۱۶۰/۲۳	۱۱۱/۹۱	۵۹/۷۵	۴۳/۳۲
	تبخیر از تشت			۱۵۲/۰۷	۱۷۹/۷۸	۲۵۶/۵۹	۳۳۹/۹۷	۳۷۰/۷۴	۳۲۵/۳۳	۲۴۱/۱۸	۱۵۷/۱۵	۷۰/۷۳	۵۹/۲۹
	ضریب تشت(Kp)			-/۸۲	-/۷۹	-/۷۳	-/۶۰	-/۵۸	-/۵۷	-/۵۹	-/۶۴	-/۸۰	-/۷۵

نتیجه گیری

روش برنامه‌ریزی مبتنی بر ET_0 رایج‌ترین روش برای برنامه‌ریزی آبیاری در کشاورزی و مدیریت منابع آب است و معادله PMFAO به عنوان دقیق‌ترین معادله برای تخمین ET_0 در نظر گرفته می‌شود (Rodrigues and Braga 2021). با این که تخمین ET_0 با استفاده از درجه حرارت (HS)، در مکان‌هایی که داده‌های سرعت باد، تابش خورشیدی و رطوبت هوا به راحتی در دسترس نیستند جذابیت خاصی دارد، نتایج نشان داد که عملکرد این روش بسته به مقیاس زمانی آن به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. پژوهش حاضر نشان داد استفاده از روش HS با لحاظ کردن عدم قطعیت در مقیاس زمانی و مکانی،

قابل استفاده است. ، این مساله به ویژه در فصول باد خیز به مراتب اهمیت بیشتری می‌یابد. برای مقیاس زمانی ماهیانه و سالیانه، خطای استفاده از روش HS کاهش می‌یابد. بررسی تبخیر از تشت نیز نشان داد تبخیر تعرق PMFAO، سازگاری بیشتری با تبخیر از تشت دارد. ضرایب تشت در ایستگاه‌های مورد بررسی تغییراتی از ۰/۲۳ تا ۰/۸۸ را نشان داد. با توجه به نتایج بالا، یک نقشه هم ET_0 برای حوضه آبریز رودخانه زاینده رود (شکل ۷) با کمک مدل نیمه توزیعی SWAT و استفاده از کلیه ایستگاه‌های ثبت درجه حرارت، استخراج شد و مقدار متوسط درازمدت ET_0 در حوضه ۱۴۴۰ میلی‌متر محاسبه گردید.

منابع

1. Allen R.G. 1996. Assessing integrity of data for reference evapotranspiration estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122(2):97-106. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1996\)122:2\(97\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1996)122:2(97))
2. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. and Smith M. 1998. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 56(97).
3. Almorox J., Quej V., and Marti P. 2015. Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Koppen climate classes. *Journal of Hydrology*, 528:514-522. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.057>
4. Blaney H.F., and Criddle W.D. 1950. Determining Water Requirements in Irrigated area from climatological irrigation data. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington.
5. Hargreaves G.H., and Samani Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1:96-99. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>
6. Hargreaves G.H. 1975. Moisture availability and crop production. *Transactions of the ASAE*, 18(5):980-994. doi: 10.13031/2013.36722
7. Hargreaves G.H., and Allen R.G. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 129(1):53-63. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53))
8. Jensen M.E., and Haise H.R. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 89:15-41. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000287>
9. Majidi M., Alizadeh A., Vazifiedoust M., Farid A., and Ahmadi T. 2015. Analysis of the effect of missing weather data on estimating daily reference evapotranspiration under different climatic conditions. *Water Resources Management*, 29:2107-2124. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0782-0>
10. Monteith J.L. 1981. Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107(451):1-27. <https://doi.org/10.1002/qj.49710745102>
11. Moratiel R., Bravo R., Saa A., Tarquis A. M., and Almorox J. 2020. Estimation of evapotranspiration by the Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) Penman–Monteith temperature (PMT) and Hargreaves–Samani (HS) models under temporal and spatial criteria—a case study in Duero basin (Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(3):859-875. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-859-2020>, 2020
12. Moreno-Tejera S., Ramirez-Santigosa L. and Silva-Perez M.A. 2015. A proposed methodology for quick assessment of timestamp and quality control results of solar radiation data. *Renewable Energy*, 78:531-537. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.031>

13. Niranjani S., and Nandagiri L. 2021. Effect of local calibration on the performance of the Hargreaves reference crop evapotranspiration equation. *Journal of Water and Climate Change*, 12(6):2654-2673. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.360>
14. Penman H.L. 1948. Natural evaporation from open water bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032):120-145. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
15. Priestley C.H.B. and Taylor R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, 100(2):81-92.
16. Razieli T. and Pereira L.S. 2013. Estimation of ETo with Hargreaves–Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agricultural water management*, 121:1-18. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.12.019>
17. Rodrigues G.C., and Braga R.P. 2021. Estimation of reference evapotranspiration during the irrigation season using nine temperature-based methods in a hot-summer Mediterranean climate. *Agriculture*, 11(2):124-150. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020124>
18. Shah S. A. 2022. Hargreaves-Samani method: Estimation of historical annual, seasonal, and monthly Reference Evapotranspiration (ETo) in Dadu District Pakistan. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 9(1):30-39. https://arww.razi.ac.ir/article_2173.html#:~:text=10.22126/arww.2022.7533.1237
19. Talebmorad H., Ahmadnejad A., Eslamian S., Ostad-Ali-Askari K., and Singh V. P. 2020. Evaluation of uncertainty in evapotranspiration values by FAO56-Penman-Monteith and Hargreaves-Samani methods. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 10(2):135-147. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2020.106481>
20. Thornthwaite C.W. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38:55-94. <https://doi.org/10.2307/210739>
21. Walter I.A., Allen R.G., Elliott R., Itenfisu D., Brown P., Jensen M.E., Mecham B., Howell T.A., Snyder R., Eching S., and Spofford T. 2005. Task committee on standardization of reference evapotranspiration. ASCE Reston, USA. https://www.academia.edu/download/40733466/ASCE_method.pdf
22. Xia X., Zhu X., Pan Y., and Zhang J. 2020. A monthly regression correction model for the Hargreaves–Samani method in Mainland China. *Irrigation and Drainage*, 69(4):880-890. <https://doi.org/10.1002/ird.2445>

Comparison of the Daily, Monthly and Annual Time Steps in Hargreaves-Samani and Penman-Monteith-FAO Models to Estimate Reference Evapotranspiration in the ZayandehRud Basin

Esmail Adib Majd*¹, Rasoul Mirabbasi², Mahdi Asadi³, Sayed Hassan Tabatabaei⁴

DOI: 10.22103/nrswe.2023.21236.1034

Abstract

Reference evapotranspiration (ET_0) is the maximum amount of water transpiration for a particular vegetation cover (such as grass, alfalfa, or a standard crop area). FAO 56 report emphasis, is on measuring meteorological parameters at a height of two meters above green grass. Cultivation around the station should be on a wide area and there is no shortage of water. Agricultural meteorological stations covering a certain territory around them record the same meteorological conditions as the surrounding plants. The Penman-Monteith-FAO (PMFAO) equation was proposed to calculate ET_0 and the use of alternative method was not recommended. In the present research, the Hargreaves-Samani (HS) method and the PMFAO method were evaluated on daily, Monthly and yearly time steps in the ZayandehRud basin over a period of 25 years from 1995 to 2019. The results showed that in the daily time step, the difference between the two methods is large (Nash coefficient from 0.63 to 0.87). In the monthly time step, the difference is generally negligible (Nash coefficient from 0.8 to 0.96). In annual time step (Nash coefficient above 0.8), the results are very close to each other. But in different stations, the same behavior was not seen, for example, in Kabutrabad station, in contrast to East Isfahan station, almost always, ET_0 by HS method is higher than PMFAO. Therefore, in practice, to use ET_0 by HS method, it is recommended to verify and evaluate at least with the nearest synoptic station and PMFAO method and then use it.

Keywords: Reference evapotranspiration, Zayandehrud Basin, Penman- Monteith FAO method, Hargreaves Samani method, Evaporation pan coefficient, Reference evapotranspiration iso map.

¹*- Corresponding Author and Ph.D. Candidate in Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Shahrekord university, Shahrekord, Iran. Email: e.adibmajd@stu.sku.ac.ir

² - Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

³ - Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

⁴ - Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.