

مقاله علمی-پژوهشی

## بررسی اثر فرارفت گرما و تابع باد در برآورد تبخیرتعرق مرجع در کرمان

بهرام بختیاری<sup>۱\*</sup>، علی خلیلی<sup>۲</sup>، عبدالمجید لیاقت<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۶

### چکیده

در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک ایران، بارندگی سالانه اندک، فصل بارندگی متمرکز بر ماه‌های سرد سال و فصل گرم و خشک متمرکز بر تابستان است. تحت این شرایط، محصولات کشاورزی اغلب در معرض تنش آبی قرار می‌گیرند و برآورد تلفات آبی ناشی از تبخیرتعرق نیازمند دقت بیشتری است. در اینگونه مناطق، پدیده محلی فرارفت گرما در تخمین تبخیرتعرق مرجع ( $ET_0$ ) در اکثر روش‌های تجربی و ترکیبی، منبع اصلی خطا محسوب می‌گردد و لازم است متناسب با شرایط محلی، اصلاحات لازم در پارامترهایی نظیر تابع باد که در برآورد  $ET_0$  موثر هستند، اعمال گردد. در این مطالعه، دو سال داده تاریخی در مقیاس زمانی ساعتی دیدبانی شده در ایستگاه هواشناسی - لایسیمتری مستقر در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و تأثیر فرارفت گرما بر روی مقادیر  $ET_0$  بررسی و نهایتاً توابع باد به تفکیک شب و روز، برای اقلیم نیمه خشک کرمان پیشنهاد گردید. نتایج نشان داد که با افزایش شاخص فرارفت، بیش‌برآوردی تا حدود ۵۰٪ در مقدار  $ET_0$  مشاهده می‌شود. تابع باد پیشنهادی برای منطقه کرمان در روز شکل نمایی و در شب صورت توانی دارد. این توابع به طور متوسط برای این دو مقیاس زمانی به ترتیب ۲۶ و ۸ درصد به دقت برآورد  $ET_0$  افزوده‌اند.

### واژه‌های کلیدی: فرارفت، تابع باد، تبخیرتعرق، گرمای محسوس، معادله پنمن

### مقدمه

منطقه استفاده شود، ممکن است برای برآورد  $ET_0$  در نقاط دیگر نیاز به درون‌یابی باشد. در این حالت، برآوردهای  $ET_0$  نسبت به مقدار واقعی دارای خطای نسبی می‌باشند. این حالت به خصوص تحت شرایط همرفت یا فرارفت گرما قابل مشاهده است. همچنین هنگامی که تنوع پوشش گیاهی در کل منطقه وجود داشته باشد، این خطا حائز اهمیت است. شواهدی وجود دارد که میانگین مقادیر روزانه شار گرمای محسوس<sup>۵</sup> ( $H$ ) در سطح، منفی و به سمت پایین است (Berengena and Gavilan, 2005). رزنبرگ و همکاران وجود فرارفت گرما، هنگامی که گرمای نهان تبخیر و همچنین مقدار  $ET_0$  بیش از انرژی قابل دسترس و یا بیش از تفاوت چگالی شار گرمای خاک از تابش خالص ( $R_n-G$ ) باشد، را مورد ارزیابی قرار دادند (Rosenberg et al., 1983). به منظور بررسی اثر فرارفت گرما بر تبخیرتعرق، در مناطق مختلف از جمله مناطقی از هلند و اسپانیا، از شاخص فرارفت گرمای محسوس استفاده گردید (de Bruin and Trigo, 2019; Berengena, and Gavilan, 2005). رانا و کاترجی حساسیت مدل پنمن - موتیث را به متغیرهای اقلیمی (انرژی قابل دسترس و کمبود فشار بخار) و مقاومت‌های گیاهی و

فرارفت گرمای محسوس<sup>۴</sup> در مناطق کشاورزی و تحت آبیاری، انرژی قابل توجهی برای فرآیند تبخیرتعرق فراهم می‌کند. این پدیده اقلیمی که بیشتر در مناطق خشک و نیمه خشک اثرگذار است، ممکن است عمده‌ترین منبع خطا در تبخیرتعرق مرجع ( $ET_0$ ) برآورد شده توسط بیشتر روش‌های تجربی و ترکیبی محسوب شود. هنگام کاربرد مدل تبخیرتعرق در یک منطقه ممکن است اندازه‌گیری‌های هواشناسی تنها در یک ایستگاه انجام پذیرد (که آن نیز شاید خارج از محدوده مورد نظر باشد). هنگامی که از تعداد بیشتری ایستگاه در یک

۱ - دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲ - استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳ - استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران، کرج، ایران

\* نویسنده مسئول: (Email: [Drbakhtiari@uk.ac.ir](mailto:Drbakhtiari@uk.ac.ir))

DOR: 20.1001.1.20087942.1402.17.4.12.2

4 - Advection

5 - Sensible heat flux

پنمن استاندارد، مشخص گردید که معادله تعدیل یافته برای استفاده در عراق مقدار تبخیرتغرق حداکثر را در ماه‌های گرم سال در حدود ۱۵ میلی‌متر بر روز به دست می‌دهد. این در حالی است که  $ET_0$  حاصل از معادله استاندارد در همان ماه‌ها به طور میانگین، ۱۰ میلی‌متر بر روز به دست آمد (Al-Nakshabandi and Kijne, 1974). در مطالعه دیگری، توابع باد در برخی از معادلات ترکیبی دخالته داده شد و مشخص گردید که بسته به نوع شرایط آب و هوایی، تابع باد در یکسری از مناطق دارای شکل خطی و در برخی دیگر به صورت توانی است (Rana and Katerji, 2000). از آنجایی که تابع باد در بسیاری از معادلات برآورد تبخیر از سطح آزاد آب نیز نقش اساسی ایفا می‌نماید، مطالعاتی نیز در زمینه اصلاح تابع باد در این گونه معادلات انجام گرفته است. در برخی از آنها ضرایب تابع در فرم خطی پیشنهاد شده و در برخی دیگر، شکل کلی تابع باد به غیرخطی تغییر یافته است (Mcjannet et al., 2012). پرز و همکاران فرم کلی تابع باد را در بخش جنوبی شیلی برای سه دسته از معادلات ترکیبی پیشنهاد کردند که البته در هر سه معادله، نوع خطی تابع باد با ضرایب تعدیل شده به دست آمد (Perez et al., 2020). در کشور مجارستان، امکان استفاده از معادلات اصلاح شده برآورد  $ET_0$  با تأکید بر وجود یا عدم وجود داده‌های سرعت باد در چهارده ایستگاه سینوپتیک بررسی شد. نتایج مقایسه‌ها نشان داد، برای مناطقی که داده‌های سرعت باد در دسترس نبوده و یا دارای خلا آماری می‌باشند، می‌توان از معادلات اصلاح شده پیشنهادی با دقت قابل قبولی استفاده کرد (Varga-Haszonits et al., 2022). سید عزیززی نیز لزوم اصلاح و برآورد ضرایب معادلات ترکیبی جهت محاسبات محلی را تأیید می‌نماید. وی مقدار ضریب اصلاحی تابع باد را برای برخی از مناطق ایران محاسبه نمود و نشان داد که این تابع برای مناطق مختلف به خصوص مناطق ساحلی باید اصلاح شود. مقدار نسبت باد روز به شب در برخی مناطق بیش از ۳ و گاهی تا ۴ گزارش شد (Seyyed Azizy, 1999).

از آنجایی که مدل ترکیبی برآورد  $ET_0$  پایه تئوریک داشته و از پارامترهای فیزیکی بیشتری در آن استفاده شده است، لذا انتظار می‌رود با مطالعه روی جزئیات این روش و مقایسه آن با مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌های کوتاه مدت منغیرهای هواشناسی و لایسیمتری در یک ایستگاه پوشیده از گیاه مرجع بتوان به صورت مطمئن‌تری از آن استفاده نمود. از طرفی سوابق تحقیقات در ایران نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات انجام یافته در زمینه  $ET_0$  در یک منطقه، محدود به برآورد آن توسط روش‌های تجربی و مقایسه آن‌ها با مدل‌های ترکیبی (به ویژه معادله استاندارد پنمن - مانتیث)، آن هم با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک (غیر مرجع) بوده و در نهایت اولویت‌بندی هر یک از روش‌ها ارائه شده است. عدم دسترسی به

آئرودینامیک در یک اقلیم نیمه خشک در جنوب ایتالیا مطالعه نمودند. خطاهای نسبی تبخیرتغرق برای مقاومت گیاهی و مقاومت آئرودینامیکی محاسبه شد. نتایج نشان داد که برای گیاه مرجع چمن، انرژی قابل دسترس و مقاومت آئرودینامیکی نقش عمده‌ای را ایفا می‌نمایند (Rana and Katerji, 1998). اثر فرارفت گرما بر روی ضریب گیاهی ( $K_c$ ) برنج در یک اقلیم مرطوب در کشور چین مطالعه شد. نتایج نشان داد که فرارفت گرما در شالیزارهای برنج نیز تأثیرگذار بوده و این پدیده اثرات قابل توجهی بر مقدار  $K_c$  می‌گذارد به طوری که تأثیر فرارفت گرما در اواخر فصل رشد بیش از اوایل فصل است (Liu et al., 2022). در سال‌های اخیر، با استفاده از فناوری‌های سنجش از دور مدل‌های جدیدی برای محاسبه و کمی کردن فرارفت گرما به منظور برآورد تبخیرتغرق پیشنهاد شده است. به طور مثال در ایالت آیوا آمریکا برای شش سایت تحقیقاتی ذرت و شش سایت تحقیقاتی سویا و با استفاده از داده‌های حاصل از سنجنده  $ETM+$  ماهواره لندست ۷، مدل کمی‌سازی فرارفت گرما به صورت منطقه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج، قابلیت مدل جدید توسعه یافته را برای برآورد فرارفت گرما در سطح اعتماد معنی‌داری نشان داد (Yang et al., 2013). به طور کلی در بیشتر این نوع از مطالعات از داده‌های ایستگاه سینوپتیک (به منظور واسنجی و یا صحت‌سنجی) استفاده شده است، اما مطالعات نشان داده است که استفاده از ایستگاه‌های غیرمرجع مانند ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی موجب بیش برآورد  $ET_0$  تا مقدار ۲۵ درصد می‌شود. لذا ایستگاه هواشناسی مرجع که در استفاده از روش پنمن - مونتیت باید از داده‌های آن استفاده شود، ایستگاهی است که با پوشش گیاه مرجع فرضی تطابق داشته باشد (Temesgen et al., 2005).

بررسی مطالعات نشان داد که در برخی مناطق یک روش و در منطقه دیگر روش دیگر بیشترین برآورد  $ET_0$  را از خود نشان داده است، در حالی که در اکثر مناطق ایران روش ترکیبی پنمن - مونتیت کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. لذا اگر این روش ملاک طراحی سیستم‌های آبیاری قرار گیرد، نیاز آبی به شدت کاهش یافته و در نتیجه ظرفیت سیستم انتقال و توزیع، کاهش می‌یابد. از سوی دیگر باید توجه نمود که برای استفاده از روش‌های ترکیبی پنمن لازم است اصلاحات مورد نیاز در مورد برخی از پارامترها نظیر تابع باد متناسب با شرایط محلی انجام پذیرد. نکش‌بندی و کیچنه در بخش مرکزی عراق، تابع تابش را بر اساس تعداد ساعات آفتابی تصحیح نمودند. در این بررسی معادلات رگرسیون به دست آمده که تطابق مناسبی با معادلات رگرسیون به دست آمده در اقلیم‌های مشابه داشته‌اند، جهت برآورد  $ET_0$  در معادله ترکیبی پنمن استفاده گردید. همچنین تابع باد برای استفاده در معادله پنمن در قسمت‌های مرکزی عراق به دست آمد. با مقایسه  $ET_0$  حاصل از تصحیح تابع باد و مدل

سطح دریا)، اندازه‌گیری و برداشت شد. اطراف سایت را زمین‌های کشاورزی و تحت آبیاری در بر گرفته بود. پارامترهای اقلیمی منطقه بر اساس داده‌های دوره آماری ۵۰ ساله (۱۹۷۱-۲۰۲۱) ایستگاه سینوپتیک کرمان به شرح زیر است. میانگین بارندگی سالانه: میلی‌متر  $P=154/1$ ، میانگین سالانه دما  $T=16/2$  درجه سلسیوس، میانگین دمای کمینه و بیشینه روزانه در سردترین و گرمترین ماه سال به ترتیب  $m=-3/1$  و  $M=+35/6$  درجه سلسیوس می‌باشد. بر اساس این داده‌ها ضریب خشکی دمارتن  $5/9$  میلی‌متر بر درجه سلسیوس و اقلیم آن نیمه خشک می‌باشد. این اقلیم در طبقه‌بندی دمارتن گسترش داده شده توسط خلیلی، نیمه خشک سرد با نماد A1.2m2 ارزیابی می‌شود (Rahimi et al., 2013؛ خلیلی و همکاران، ۱۴۰۱). بر اساس همین داده‌ها، آب و هوای منطقه مطالعاتی در طبقه‌بندی آمبرژه با اصلاحاتی که ثابتی اعمال نموده، خشک سرد با ضریب بارندگی  $12/2$  می‌باشد (Sabeti, 1969).

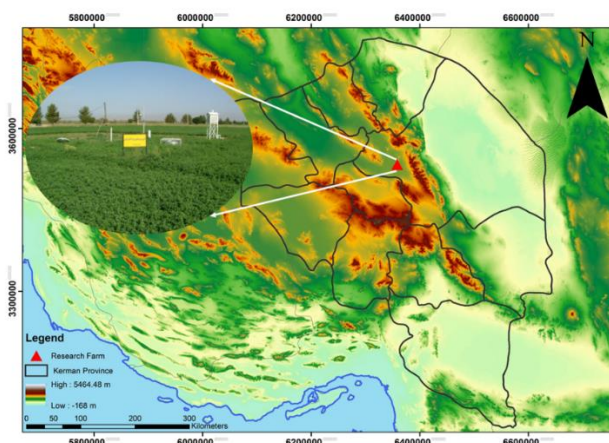
نوع بافت خاک مزرعه، لوم رسی شنی متشکل از ۵۵٪ شن، ۲۳٪ رس و ۲۴٪ سیلت بوده و از لحاظ مواد آلی و نیتروژن، خاک فقیری محسوب می‌شود. جهت ایجاد شرایط مرجع در سایت مطالعاتی، در سطح ایستگاه به مساحت  $26 \times 26$  متر گیاه چمن (گونه *Lullium perenne*) کشت گردید. آبیاری چمن محوطه سایت به صورت بارانی و آبیاری چمن سطح لایسیمتر به میزان مشخص توسط آبیاش انجام گرفت. مشخصات محل استقرار لایسیمتر و ایستگاه هواشناسی خودکار در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات لایسیمتر الکترونیکی و حسگرهای هواشناسی مورد استفاده به طور کامل در مطالعات قبلی جهت سهولت دسترسی موجود است (بختیاری و همکاران، ۱۳۸۸؛ بختیاری و همکاران، ۱۳۸۹؛ Bakhtiari et al., 2006).

برخی از داده‌های اقلیمی و لایسیمتری و عدم استفاده از ایستگاه‌های هواشناسی مرجع در اقلیم‌های مختلف ایران و تفاوت در انتخاب روش‌های محاسبه تبخیر تعرق مرجع، موجب گردیده است تا نتایج حاصل از محاسبات با یکدیگر مغایرت داشته باشند (محمدیان و همکاران، ۱۳۸۴). به نظر می‌رسد که این مطالعات کافی نبوده و نیاز به تحقیقات جامع‌تری به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک با تأکید بر اثرات واحه و فرارفت است. همچنین نتایج تحقیقات انجام شده در سایر نقاط دنیا نشان داده که هرچه فاصله زمانی ثبت اطلاعات هواشناسی کمتر شود یا به عبارت دیگر فراوانی داده‌ها بیشتر گردد، دقت تخمین افزایش می‌یابد (Hupet and Vanclooster, 2001). جنبه نوآورانه این پژوهش امکان تدقیق برآورد تبخیر تعرق مرجع با در نظر گرفتن اثر فرارفت و اصلاح تابع باد است. از این رو در این تحقیق تلاش گردید تا با اندازه‌گیری متغیرهای هواشناسی و لایسیمتری در مقیاس زمانی ساعتی و در یک سطح مرجع، به بررسی تأثیر فرارفت گرما بر روی مقادیر  $ET_0$  پرداخته و تابع باد تجربی به تفکیک دو بازه زمانی شب و روز، به منظور افزایش دقت برآورد  $ET_0$  در اقلیم نیمه خشک کرمان پیشنهاد شود.

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه، از مجموعه داده‌های تاریخی برداشت شده توسط پژوهشگر طی دو سال ۱۳۸۴ و ۱۳۸۶ استفاده گردید (بختیاری، ۱۳۸۸). این داده‌ها از سایت لایسیمتر وزنی الکترونیکی و ایستگاه هواشناسی خودکار مجاور آن، مستقر در مزرعه دانشگاه شهید باهنر کرمان (عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۴ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۰۷ دقیقه شرقی و ارتفاع متوسط ۱۷۷۰ متر از



شکل ۱- محل قرارگیری سایت لایسیمتری و توپوگرافی منطقه مورد مطالعه

پنمن یا روش ترکیبی معروف گردید (Monteith, 1986). معادله پنمن در ابتدا برای محاسبه تبخیر از سطح آزاد آب ارائه شد و سپس جهت برآورد مقدار تبخیرتغرق از یک سطح کامل پوشیده از گیاه مرجع مورد استفاده قرار گرفت. برای استفاده از این روش فرضیات بسیاری مورد نیاز است. لذا ضروری است تا این فرضیات هنگام استفاده از معادله پنمن و همچنین دسته معادلات گسترش یافته آن توسط افراد مختلف، مورد توجه قرار گیرد.

در ابتدا برای استخراج جزء شار تابش خالص معادله پنمن از معادله توازن انرژی (متشکل از پنج شار گرمایی) در یک سطح ایده‌آل استفاده شد (McGuffie and Henderson-Sellers, 2003). از آنجایی که در عمل سطوح موجود در طبیعت، ناهمگن می‌باشند، به منظور مقاصد کاربردی، تراز انرژی در یک لایه کوچک، با جرم و ظرفیت گرمایی مشخص مورد استفاده قرار گرفت و معادله تراز انرژی برای یک لایه با دو سطح بالایی و پایینی بیان شد. در حقیقت انرژی ذخیره شده در لایه، تفاوت بین اشکال مختلف انرژی ورودی و خروجی است. در این حالت از خواص همگرایی<sup>۶</sup> و واگرایی<sup>۷</sup> لایه استفاده می‌شود. در حالت همگرایی مقادیر شارهای ورودی بیش از خروجی بوده و لایه به سمت گرم شدن پیش می‌رود. برعکس در حالت واگرایی مقادیر شارهای خروجی بیش از ورودی بوده و لایه به سمت خنک شدن پیش می‌رود. با ترکیب روش توازن انرژی و روش آئرودینامیک یا شارگردیان و با در نظر گرفتن تئوری مربوط به چگونگی تبادل بخار آب، روش ترکیبی برآورد تبخیر، موسوم به مدل اصلی پنمن به دست آمد. معادلات حاکم بر توازن شارهای گرمایی و بخار آب در یک لایه مشخص، در منابع ذکر شده است (Rosenberg et al., 1983). با ترکیب این معادلات، معادله اصلی پنمن (معادله ۱) با دو جزء شامل، جزء اول مربوط به انرژی تابشی در دسترس و جزء دوم مربوط به توان تبخیری جو (جزء تجربی تابع باد) به دست آمد (پنمن، ۱۹۴۸). سپس معادله اصلی پنمن - ۱۹۴۸ با لحاظ نمودن اجزای مختلف آن به شکل کلی معادله ۲ ارائه گردید (Allen et al., 1998).

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{A}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot E_a \quad (1)$$

$$\lambda \cdot ET_o = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + K_w \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (a_w + b_w u_2) (e_s(T_a) - e_a) \quad (2)$$

که در آنها  $A$  انرژی در دسترس،  $E_a$  توان تبخیری جو یا جزء تجربی تابع باد،  $ET_o$  تبخیرتغرق گیاه مرجع ( $\text{mm day}^{-1}$  یا  $\text{mm hr}^{-1}$ )،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر ( $\text{MJ kg}^{-1}$ )،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار-دما ( $\text{Kpa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )،  $\gamma$  ثابت سایکرومتری ( $\text{Kpa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )،  $G$

نمونه‌ای از اطلاعات ثبت شده ایستگاه هواشناسی خودکار و دستگاه لایسیمتر وزنی در جدول ۱ ارائه شده است. در این تحقیق از دو سری داده ساعتی مربوط به سال‌های ۱۳۸۴ (تعداد ۲۸۳۵ داده ساعتی مربوط به هر کدام از متغیرهای هواشناسی و ۳۳۷۷ داده مربوط به اندازه گیری لایسیمتری) و ۱۳۸۶ (تعداد ۲۷۴۸ داده ساعتی مربوط به هر کدام از متغیرهای هواشناسی و ۳۱۸۲ داده مربوط به اندازه گیری لایسیمتری) استفاده شد.

با توجه به حجم بسیار زیاد داده‌ها در بازه زمانی ساعتی طی دو سال، قبل از انجام هرگونه تحلیلی، ابتدا یک بانک اطلاعاتی از داده‌های این دو سال در محیط نرم‌افزاری اکسس تهیه و اقدام به کنترل کیفیت داده‌ها و حذف نقاط پرت گردید. برای کنترل کیفیت داده‌ها، از سیستم آماری کنترل کیفیت شوهارت<sup>۱</sup> استفاده شد (Montgomery, 2000). در سیستم کنترل شوهارت اگر تغییرات یک پدیده در مقابل زمان بر روی یک نمودار ترسیم شود، دارای الگوی کاملاً تصادفی خواهند بود. هنگامی که مقیاس متغیر کیفیت، کیفی باشد، این تغییرات تشکیل یک توزیع دو جمله‌ای داده که به جای آن در محاسبات از توزیع تقریب شده پواسون استفاده می‌شود. از طرفی چنانچه مقیاس متغیر کیفیت، کمی باشد، پراکنندگی کیفیت تابع توزیع نرمال خواهد بود. نمودارهای سیستم کنترل شوهارت دارای حدودی هستند که ناحیه قابل قبول و غیر قابل قبول را از یکدیگر جدا می‌کنند. این حدود به شیوه‌ای انتخاب می‌شوند تا اگر تنها عامل شانس و احتمال در فرآیند مورد نظر دخالت داشته باشد (فرآیند تحت کنترل آماری باشد) آنگاه احتمال آن که پارامتری از نمونه‌های برداشت شده، در خارج از این محدوده قرار گیرد، بسیار کوچک باشد. در این مطالعه از روش کنترل شوهارت، پیشنهادش شده توسط سیستم اطلاعات مدیریت آبیاری کالیفرنیا (CIMIS)<sup>۲</sup>، جهت ارزیابی کیفی داده‌های ساعتی متغیرهای هواشناسی استفاده شد (Eching and Snyder, 2003).

### معادلات ترکیبی

هاوارد پنمن<sup>۳</sup>، دانشمند انگلیسی اهل شهر کوچک دانستون-آن-تاین<sup>۴</sup> از نواحی دورهام<sup>۵</sup> انگلستان و تنها فرزند ایزابل و روبرت پنمن، در سال ۱۹۴۸ با استفاده از ترکیب روش‌های آئرودینامیکی و توازن انرژی، مدلی را به منظور محاسبه تبخیرتغرق ارائه نمود که به معادله

- 1- Shewhart
- 2 - California Irrigation Management Information system
- 3 -Howard Penman
- 4 -Dunston-on-Tyne
- 5 -Durham

6 - Convergence

7 - Divergence

نهایی مورد نظر برای تبخیر تعرق دارد. مقدار  $6/43$  برای واحد میلی‌متر بر روز و  $0/268$  برای واحد میلی‌متر بر ساعت در نظر گرفته می‌شود. در سال ۱۹۴۸ تابع باد به صورت معادله ۳ به صورت یک معادله خطی ارائه شد.

$$f(u) = 0.40(1 + 0.17u_2) \quad (3)$$

چگالی شار گرمایی خاک ( $\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$  یا  $\text{MJ m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ )،  $R_n$  تابش خالص ( $\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$  یا  $\text{MJ m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ )،  $u_2$  سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ( $\text{m s}^{-1}$ )،  $a_w$  و  $b_w$  ثابت‌های تابع باد،  $e_s(T_a)$  فشار بخار اشباع در دمای هوا (Kpa)،  $e_a$  فشار بخار واقعی هوا (Kpa) و  $K_w$  مقدار عددی است که بستگی به واحد

جدول ۱- نمونه‌ای از اطلاعات خام هواشناسی و لایسیمتری ثبت شده در بازه زمانی ساعتی (تاریخ ۱۳۸۶/۰۳/۰۵) در سایت لایسیمتری مستقر در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان

| وزن لایسیمتر (کیلوگرم) | شدت تابش (مگاژول بر مترمربع بر ساعت) | جهت باد (درجه) | سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه) | رطوبت نسبی (درصد) | دما (درجه سلسیوس) | زمان (ساعت) |
|------------------------|--------------------------------------|----------------|---|-------------------|-------------------|-------------|
| ۱۹۴۴۲/۰                | -۰/۳                                 | ۵۵/۱           | ۱/۱                                       | ۷۷/۲              | ۹/۱               | ۶:۰۰        |
| ۱۹۴۴۱/۸                | ۱/۱                                  | ۵۰/۲           | ۰/۷                                       | ۷۰/۸              | ۹/۱               | ۷:۰۰        |
| ۱۹۴۳۹/۸                | ۲/۰                                  | ۸۳/۳           | ۰/۴                                       | ۵۰/۵              | ۱۷/۶              | ۸:۰۰        |
| ۱۹۴۳۸/۶                | ۲/۷                                  | ۸۰/۵           | ۱/۲                                       | ۳۹/۸              | ۲۶/۳              | ۹:۰۰        |
| ۱۹۴۳۷/۸                | ۳/۴                                  | ۵۰/۸           | ۲/۵                                       | ۳۶/۵              | ۲۶/۴              | ۱۰:۰۰       |
| ۱۹۴۳۳/۸                | ۳/۸                                  | ۹۴/۶           | ۲/۹                                       | ۳۴/۲              | ۲۵/۰              | ۱۱:۰۰       |
| ۱۹۴۲۸/۸                | ۴/۰                                  | ۹/۹            | ۳/۰                                       | ۳۰/۹              | ۲۵/۷              | ۱۲:۰۰       |
| ۱۹۴۲۲/۸                | ۴/۰                                  | ۴۲/۴           | ۳/۳                                       | ۳۰/۰              | ۲۴/۹              | ۱۳:۰۰       |
| ۱۹۴۱۷/۸                | ۳/۶                                  | ۵/۶            | ۳/۵                                       | ۲۸/۲              | ۲۹/۱              | ۱۴:۰۰       |
| ۱۹۴۱۳/۸                | ۳/۱                                  | ۳۶/۷           | ۳/۳                                       | ۲۷/۲              | ۲۷/۴              | ۱۵:۰۰       |
| ۱۹۴۱۳/۸                | ۲/۵                                  | ۹/۹            | ۳/۱                                       | ۲۶/۶              | ۲۸/۹              | ۱۶:۰۰       |
| ۱۹۴۰۹/۸                | ۱/۶                                  | ۸۳/۳           | ۳/۱                                       | ۲۶/۹              | ۲۷/۰              | ۱۷:۰۰       |
| ۱۹۴۰۸/۸                | -۰/۸                                 | ۹۱/۶           | ۳/۲                                       | ۲۶/۹              | ۲۵/۴              | ۱۸:۰۰       |
| ۱۹۴۰۸/۵                | -۰/۱                                 | ۳۶/۷           | ۲/۱                                       | ۲۸/۶              | ۲۴/۹              | ۱۹:۰۰       |
| ۱۹۴۰۸/۵                | -۰/۰                                 | ۴۰/۹           | ۱/۵                                       | ۳۵/۴              | ۲۴/۸              | ۲۰:۰۰       |
| ۱۹۴۰۸/۵                | -۰/۰                                 | ۴/۲            | ۱/۵                                       | ۴۹/۱              | ۱۷/۴              | ۲۱:۰۰       |
| ۱۹۴۰۸/۳                | -۰/۰                                 | ۹۰/۴           | ۱/۲                                       | ۴۹/۱              | ۱۶/۱              | ۲۲:۰۰       |
| ۱۹۴۰۸/۵                | -۰/۰                                 | ۵۰/۸           | -۰/۲                                      | ۵۳/۷              | ۱۴/۳              | ۲۳:۰۰       |
| ۱۹۴۰۸/۶                | -۰/۰                                 | ۴۳/۸           | -۰/۱                                      | ۴۲/۸              | ۱۷/۰              | ۲۴:۰۰       |
| ۱۹۴۰۸/۶                | -۰/۰                                 | ۴۲/۴           | -۰/۶                                      | ۵۲/۸              | ۱۷/۴              | ۱:۰۰        |
| ۱۹۴۰۸/۴                | -۰/۰                                 | ۵۰/۸           | -۰/۵                                      | ۶۰/۲              | ۱۱/۶              | ۲:۰۰        |
| ۱۹۴۰۸/۶                | -۰/۰                                 | ۴۸/۲           | ۱/۰                                       | ۶۵/۳              | ۸/۶               | ۳:۰۰        |
| ۱۹۴۰۸/۷                | -۰/۰                                 | ۵۱/۳           | ۱/۴                                       | ۷۱/۱              | ۹/۵               | ۴:۰۰        |
| ۱۹۴۰۸/۷                | -۰/۰                                 | ۸۰/۵           | ۱/۲                                       | ۷۶/۵              | ۷/۷               | ۵:۰۰        |

(Allen et al., 1998). وی فرض نمود که مسیر حرکت بخار آب از گیاه به جو از دو قسمت تشکیل شده است. در قسمت اول، بخار آب از داخل حفره روزنه به سطح برگ منتقل می‌شود. عامل انتقال در این مرحله اختلاف فشار بخار اشباع در دمای برگ و فشار بخار واقعی روی سطح برگ است. مقاومت گیاه در مسیر انتقال در این حالت مقاومت روزنه است. مقاومت روزنه متأثر از ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه بوده و توسط آن گیاه در مقابل شرایط اقلیمی و محیطی عکس‌العمل نشان می‌دهد. قسمت دوم فرآیند تعرق از انتقال بخار آب از سطح برگ به جو تشکیل شده است. عامل انتقال، اختلاف فشار بخار واقعی در سطح برگ و در ارتفاعی در لایه هوای فوقانی پوشش گیاهی بوده و مقاومت در این مسیر مقاومت آئرو‌دینامیک می‌باشد. مونیتینگ با فرض این که شدت انتقال بخار در دو قسمت ذکر شده

در معادله اصلی پنمن-۱۹۴۸ فرض بر این است که در مسیر انتقال بخار آب هیچ گونه مقاومت فیزیولوژیکی اعمال نمی‌شود، بنابراین گیاهان حتی در شرایط تبخیر تعرق پتانسیل در مسیر انتقال بخار آب از حفره روزنه به سطح خارجی برگ مقداری مقاومت اعمال می‌نمایند که این مقدار در گیاهان مختلف متفاوت است. پس از انتقال بخار آب به سطح خارجی برگ، بخار آب همراه با جریان‌های چرخشی شکل گرفته بر روی پوشش گیاهی، به لایه‌های فوقانی هوا منتقل می‌شود. شدت انتقال در این مرحله متناسب با شدت آشفستگی ایجاد شده روی پوشش گیاهی است. همچنین ناهم‌واری‌های سطح و افزایش سرعت باد سبب می‌شود تا قدرت اختلاط هوا افزایش یافته و انتقال بخار از سطوح گیاهی با سهولت بیشتری انجام گیرد. مونیتینگ در سال ۱۹۶۵ روش پنمن را به طور قابل ملاحظه‌ای تعمیم داد

یکسان می‌باشد، دو معادله مشابه معادله اهم برای تعیین و محاسبه شدت انتقال بخار از حفره روزنه به سطح برگ و از سطح برگ به هوای اطراف گیاه ارائه نمود. وی با تلفیق دو معادله مذکور توانست نیاز به اندازه‌گیری متغیرهایی مانند دمای برگ و فشار بخار واقعی روی سطح برگ را حذف نموده و کاربرد وسیع‌تری برای معادله پنمن ایجاد نماید. معادلات نام برده شده و چگونگی استخراج معادله پنمن-مونتیث (معادله ۴) در منابع به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است (Allen et al., 1998).

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p (e_s(T_a) - e_a) r_a^{-1}}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (4)$$

که در آن  $r_c$  مقاومت پوشش گیاهی در برابر انتقال بخار آب،  $r_a$  مقاومت آئرودینامیک لایه هوای چسبیده به پوشش گیاهی در انتقال بخار آب به جو،  $\rho$  چگالی هوا،  $C_p$  گرمای ویژه هوا،  $e_s(T_a)$  فشار بخار اشباع به ازای دمای هوای بالای پوشش گیاهی،  $e_a$  فشار بخار واقعی،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار اشباع نسبت به دما،  $R_n$  تابش خالص ورودی به سطح پوشش گیاهی،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر آب و  $E$  مقدار تبخیر است. در این مطالعه عامل وزنی در معادله اصلی پنمن-۱۹۴۸ به صورت  $W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$  و در معادله پنمن-مونتیث به صورت  $W' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})}$  نشان داده می‌شود.

کاربرد روش تشابه مقاومت در برآورد هر دو عامل شار گرمای محسوس و گرمای نهان مورد انتقاد چند قرار گرفته است. ورما (۱۹۷۶) عنوان کرده است که منابع ایجاد و مصرف گرمای محسوس و گرمای نهان در یک پوشش گیاهی متفاوت‌تر از آن هستند که بتوان آن‌ها را مشابه دانست و بنابراین مقدار مقاومت واحدی را نمی‌توان در محاسبات مورد استفاده قرار داد (Verma et al., 1976). آنچه در عمل کاربرد معادله پنمن-مونتیث را با مشکل مواجه می‌سازد برآورد مقادیر مقاومت روزنه‌ای، مقاومت پوشش گیاهی و مقاومت آئرودینامیک است. کارشناسان فائو برای حل این مشکل راه کارهای عملی پیشنهاد نمودند که منجر به معادله اصلاح شده ۵، به نام پنمن-مونتیث فائو ۵۶ گردید (Allen et al., 1998).

$$ET_o = \frac{0.408 \times \Delta(R_n - G) + (\frac{890 \times \gamma}{T_a + 273})(e_s(T_a) - e_a) u_2}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (5)$$

### شاخص فرارفت گرمای محسوس

در معادلات ۲ و ۴، از آنجایی که که میانگین مقادیر روزانه چگالی شار گرمایی خاک (G) معمولاً نزدیک به صفر در نظر گرفته می‌شود، می‌توان شدت فرارفت گرما را با کسری از تبخیر یا شاخص فرارفت گرما<sup>۱</sup> کمی نمود (معادله ۶). با توجه به اینکه که میانگین

### استخراج تابع باد

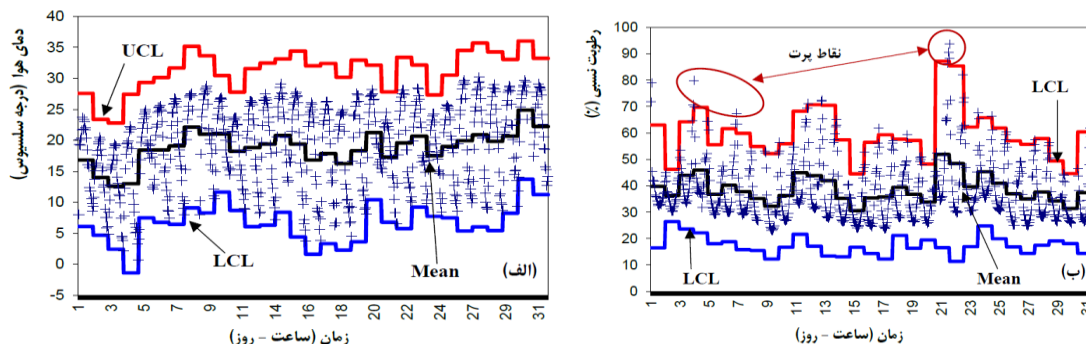
جهت استخراج تابع باد ( $f(u_2)$ ) در مدل اصلی پنمن (معادله ۲)، با توجه به مقدار  $ET_o$  اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و معلوم بودن آن، مطابق معادله ۷، تابع باد را به یک طرف معادله منتقل نموده تا جزء مجهول محسوب گردد. از آنجایی که رژیم جریان باد طی شب و روز متفاوت می‌باشد، از این رو برای هر یک از روزهای ماه، تابع باد تجربی به تفکیک شب و روز استخراج گردید.

$$f(u_2) = \frac{ET_o - W(R_n - G)/\lambda}{(1 - W)(e_s(T_a) - e_a)} \quad (7)$$

که در آن  $W$  عامل وزنی معادله پنمن-۱۹۴۸ که در معادله ۴ قبلاً معرفی شد،  $f(u_2)$  تابع باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین (-)  $(\text{mm Kpa}^{-1} \text{ h}^{-1})$  و سایر متغیرها که قبلاً در مدل پنمن-۱۹۴۸ معرفی گردیدند.

### نتایج و بحث

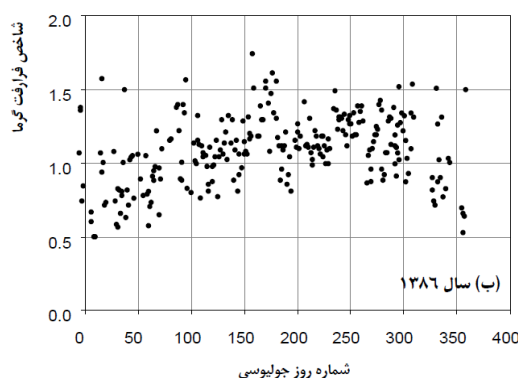
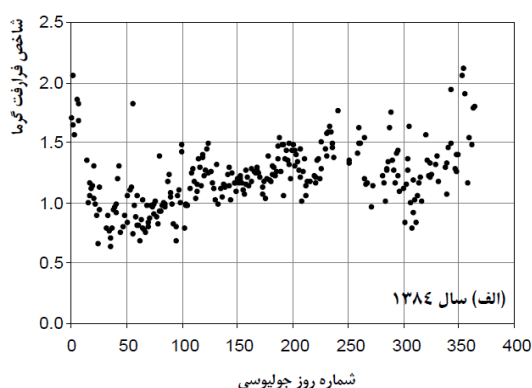
در ابتدا نمونه ای از نتایج کنترل کیفیت آماری داده های ساعتی مورد استفاده در شکل ۱ ارائه شده است. با توجه به کاربرد روش شوهارت، ابتدا نرمال بودن تابع چگالی احتمال مورد آزمون قرار گرفت. از آنجایی که در این مطالعه از داده‌هایی با مقیاس زمانی کوتاه (ساعتی) استفاده شد، فرض قضیه حد مرکزی (نرمال بودن توزیع میانگین نمونه‌ها در صورت حجیم بودن نمونه‌ها) برقرار بود. همانند اکثر تحلیل‌های آماری که مشاهده کل جامعه غیر عملی است، در بحث کنترل کیفیت نیز از مفهوم استنتاج آماری بر اساس توزیع نمونه استفاده شد. حدود بالا (UCL) و پایین (LCL) نقاط کنترل پس از محاسبه بر روی شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین نقاط پرت خارج از محدوده کنترل تعیین و از داده‌ها حذف گردیدند. پس از حذف نقاط پرت و روزهایی که به هر دلیل (از جمله قطع برق، کابل برگردان مزرعه و غیره) اطلاعات آن ثبت نگردید، تعداد روزهای دارای آمار قابل اطمینان در هر یک از ماه‌های مورد مطالعه مشخص گردید. جمعاً تعداد ۵۷۹۷۶ داده برای یک متغیر هواشناسی در بازه زمانی ساعتی برداشت شد که با توجه به تعداد متغیرهای هواشناسی مورد استفاده شامل دما، رطوبت نسبی، سمت و سرعت باد و تشعشع، تعداد کل داده‌های مورد استفاده پس از حذف نقاط پرت، ۳۳۱۹۰۴ عدد شدند.



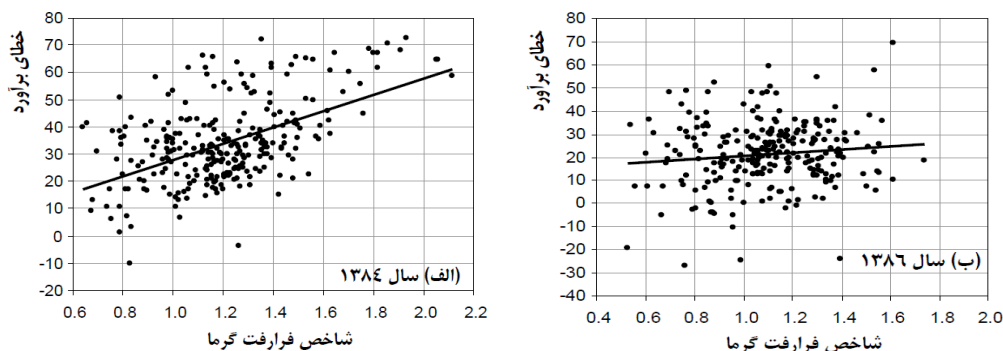
شکل ۲- کنترل کیفیت داده‌های ساعتی (الف- دمای هوا، ب- رطوبت نسبی) در اردیبهشت سال ۱۳۸۴ در ایستگاه مطالعاتی

دمای هوا بستگی دارد، اما در مدل پنمن- مونتیت پارامتر تصحیح شده  $W'$  توسط مونتیت به دما و سرعت باد بستگی داشته به طوری که مقدار آن با افزایش دما، افزایش و با افزایش سرعت باد کاهش می‌یابد. با ترسیم مقادیر  $W'$  و  $W$  در مقابل  $I_a$  مشخص می‌شود که در منطقه مطالعاتی با افزایش شدت فرارفت گرما، هر دو وزن  $W$  و  $W'$  افزایش و مقدار افزایش فاکتور  $W$  بیش از  $W'$  است (شکل ۵). افزایش مقدار  $W'$  از حدود  $0.45$  برای  $0.6$  تا  $0.61$  برای  $2.1$  در سال  $1384$  و از حدود  $0.48$  برای  $0.55$  تا  $0.71$  برای  $1.75$  در سال  $1386$  می‌باشد. بنابراین وزن جزء تجربی تابع باد با افزایش شدت فرارفت گرما افزایش یافته است. نتیجه گرفته می‌شود که تابع باد تجربی در مدل اصلی پنمن، به پدیده فرارفت گرما بسیار حساس است و باید با توجه به شرایط منطقه در معادلات ترکیبی مورد تصحیح قرار گیرد.

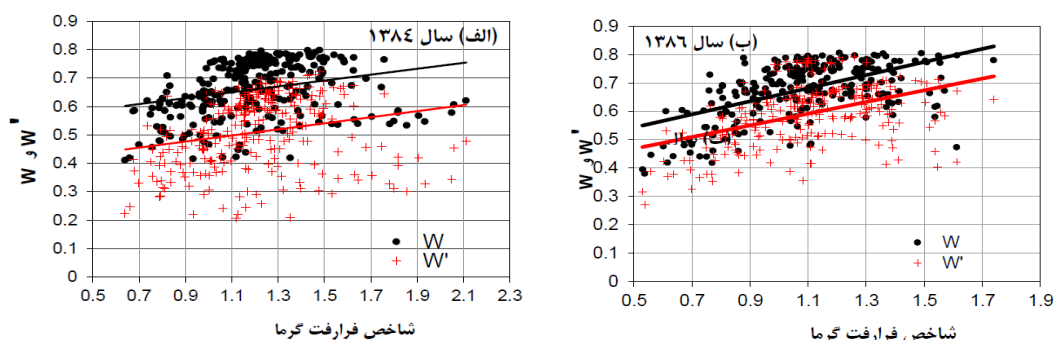
شکل ۳ شاخص فرارفت گرما را به صورت تابعی از زمان (شماره روز) طی دو سال مطالعاتی نشان می‌دهد. همچنین ارتباط بین خطای برآورد  $ET_o$  با استفاده از مدل پنمن- مونتیت استاندارد روزانه و شاخص فرارفت گرما مورد تحلیل قرار گرفت (شکل ۴). به طور کلی، با افزایش شاخص فرارفت گرما، تمایل به بیش‌برآورد توسط مدل مشاهده شد. شیب خط برازش یافته در این حالت در سال  $1384$  بیش از سال  $1386$  بود. می‌توان گفت که در سال  $1384$  خطای برآورد توسط مدل در تمامی مقادیر نمونه‌گیری  $I_a$  تقریباً ثابت بود. در هر حال تغییر شیب خطوط در سال‌های مختلف نمایانگر حساسیت زیاد مدل به تغییرات شدت فرارفت گرما است. بنابراین در صورت زیاد بودن پدیده فرارفت گرما در منطقه (سال  $1384$ )، حداکثر میزان بیش‌برآورد  $ET_o$  توسط مدل به حدود  $50\%$  تا  $60\%$  نیز می‌رسد. در سال  $1386$  این بیش‌برآورد به حدود  $30\%$  رسید. این اختلاف به تغییرات دما و سرعت باد در جزء وزنی مدل در اثر پدیده فرارفت گرما مرتبط است. می‌توان گفت در مدل اصلی پنمن- $1948$ ، پارامتر  $W$  تنها به



شکل ۳- تغییرات فصلی شدت فرارفت گرمای محسوس، کمی شده با استفاده از شاخص فرارفت گرما ( $I_a = ET_o / R_n$ )



شکل ۴- خطای برآورد  $ET_0$  توسط مدل پنمن-مونتیث استاندارد به عنوان تابعی از فرارفت گرمای محسوس در دو سال مورد مطالعه



شکل ۵- پاسخ فاکتورهای وزنی در مدل پنمن ( $W$ ) و پنمن-مونتیث ( $W'$ ) به تغییرات شدت فرارفت گرما ( $I_a$ )

شکل ۶ چگونگی تغییرات تابع تابع باد تصحیح شده در مدل پنمن برای منطقه کرمان را در سرعت‌های مختلف طی بازه‌های زمانی شب و روز نشان می‌دهد. آزمون معنی‌داری ضریب همبستگی نشان داد که با در نظر گرفتن درجه‌های آزادی ۶۶ و ۶۳ به ترتیب برای بازه‌های زمانی روز و شب، ضرایب همبستگی به دست آمده در سطح یک درصد معنی‌دار است. اعمال توابع پیشنهادی در معادله پنمن نشان داد که در مقیاس زمانی روز، به طور متوسط ۲۶ درصد اختلاف در برآورد  $ET_0$  نسبت به معادله اصلی وجود دارد. همچنین این درصد اختلاف با اعمال تابع باد شبانه، به طور متوسط به ۸ درصد می‌رسد. مقدار مثبت آماره آزمون بایاس (اریبی) نشان داد که این درصد اختلاف با اعمال تابع باد پیشنهادی به صورت بیش‌برآوردی است.

با توجه به شکل‌های مذکور، می‌توان نتیجه گرفت که بسته به مقیاس زمانی مورد استفاده در اندازه‌گیری متغیرهای هواشناسی و برآورد  $ET_0$ ، فرم ریاضی تابع تابع باد در معادلات ترکیبی ممکن است تغییر نماید. به نظر می‌رسد عوامل دیگری از جمله افزایش تعداد سال‌های آماری بر فرم ریاضی تابع تأثیرگذار باشد. این مسأله به ویژه در اقلیم‌های فراخشک به سمت خشک با در نظر گرفتن اثر فرارفت و تغییر ضرایب تابع خطی باد و یا فرم تابع از حالت خطی در معادله اصلی به فرم‌های نمایی، توانی و لگاریتمی بسیار در خور توجه است.

جهت استخراج تابع باد  $f(u_2)$  از معادله ۷ استفاده شد. با استفاده از تعداد ۳۳۷۷ داده ساعتی سرعت باد و اندازه‌گیری‌های  $ET_0$  توسط لایسیمتر طی دو بازه زمانی روز و شب در سال ۱۳۸۴ و تعداد ۳۱۸۲ داده ساعتی در سال ۱۳۸۶، مقدار  $f(u_2)$  به تفکیک شب و روز برای هر ساعت و در هر یک از سال‌های مطالعاتی محاسبه و سپس میانگین آنها در هر یک از سرعت‌های معین باد به دست آمده و بر این اساس با برازش مدل رگرسیون بین  $u_2$  و  $f(u_2)$ ، تابع باد تجربی در منطقه تعیین شد. البته به منظور ارائه یک تابع باد متشکل از کلیه داده‌ها، میانگین اطلاعات هر دو سال به صورت یکپارچه مورد توجه قرار گرفته و تابع باد بر این مبنای محاسبه گردید. پس از محاسبه تابع باد در هر یک از سرعت‌های معین، جزء تجربی تابع باد معادله اصلی پنمن به تفکیک روز (تابش خالص بزرگتر از صفر) و شب (تابش خالص کوچکتر از صفر) در منطقه مطالعاتی به صورت معادلات ۷ و ۸ پیشنهاد گردید.

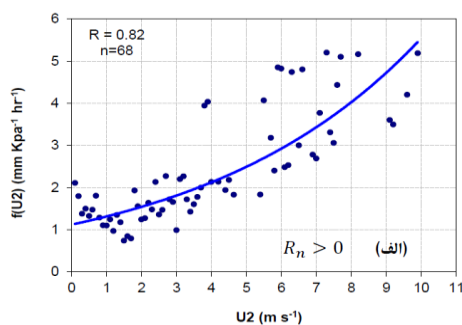
$$f(u_2) = 1.122 \times e^{0.1597 u_2} \quad R_n > 0 \quad (7)$$

$$f(u_2) = 1.0277 \times u_2^{-0.3177} \quad R_n \leq 0 \quad (8)$$

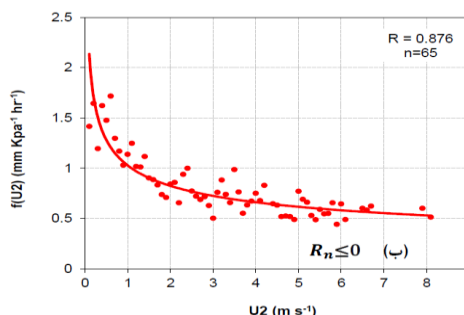
که در آن  $f(u_2)$  تابع باد حسب  $(\text{mm Kpa}^{-1} \text{ h}^{-1})$  و  $u_2$  سرعت باد در ارتفاع دو متری ( $\text{m s}^{-1}$ ) در ایستگاه مرجع است.



این در حالی است که بر مبنای مطالعه لوساویو، فرم کلی تابع به صورت توانی و به شکل کلی  $f(u_2) = a \times (u_2)^b$  در یک اقلیم مدیترانه‌ای به دست آمد (Losavio et al., 1992).



این مسأله همچنین در تحقیقات دیگر مورد توجه قرار گرفته است به طوری که مالک برای منطقه نیمه خشک یوتا فرم خطی  $f(u_2) = a_w + b_w u_2$  را پیشنهاد داده که البته ضرایب واسنجی بسته به مقیاس زمانی ساعتی ( $a_w = ۲/۶۸$  و  $b_w = ۰/۱۳$ ) و مقیاس روزانه ( $a_w = ۱/۰۰$  و  $b_w = ۰/۰۱۴$ ) به دست آمد (Malek, 1994).



شکل ۶- تابع باد محاسبه شده  $f(u_2)$  به تفکیک روز ( $R_n > 0$ ) و شب ( $R_n < 0$ ) در ایستگاه مرجع لایسیمتری کرمان

الکترونیکی مستقر در مزرعه دانشگاه شهید باهنر کرمان که به همت استاد فقید، شادروان دکتر محمد جواد خانجانی، طراحی و راه‌اندازی گردید، میسر نبود. نگارندگان، این مقاله را با ارج‌گذاری از زحمات ایشان، به روان پاک و بلندش تقدیم می‌دارند.

## نتیجه‌گیری

تحلیل مقادیر باد در ایستگاه لایسیمتری مستقر در مزرعه دانشگاه شهید باهنر کرمان نشان داد که پدیده فرارفت گرما مهمترین عامل در خطای برآورد مقادیر تبخیرتعرق مرجع در این منطقه محسوب می‌شود. بنابراین شدت فرارفت گرما با کسری از تبخیر یا شاخص فرارفت گرما کمی شد. شاخص محاسبه شده نشان داد که، مدل‌های پنمن و پنمن-مونتیث به شدت به پدیده فرارفت حساس می‌باشند. همچنین وزن جزء تجربی تابع باد با افزایش شدت فرارفت افزایش می‌یابد. از این رو به نظر می‌رسد که تابع باد در معادله اصلی پنمن شکل کاملاً خطی نداشته و با توجه به نوع بادناکی منطقه نیاز به تصحیح دارد. از طرفی با توجه به اینکه مقادیر مقاومت سطحی در طول شب و روز با یکدیگر متفاوت است بنابراین به نظر می‌رسد که الگوی تابع باد نیز در این دو بازه شبانه روز متفاوت باشد. این موضوع بررسی و مشخص شد که تابع باد تصحیح شده در مدل پنمن برای منطقه کرمان در طول روز از تابع نمایی و طی شب از تابع توانی تبعیت می‌کند. پیشنهاد می‌شود با نصب چند عدد حسگر آنومومتر در فواصل مختلف از ایستگاه هواشناسی مرجع، تأثیر پدیده فرارفت گرما بر تبخیرتعرق و همچنین اثر آن بر جزء تجربی تابع باد معادلات ترکیبی، در مناطقی مرکب از اقلیم فراخشک تا بسیار مرطوب به صورت دقیق‌تر مطالعه گردد.

## منابع

بختیاری، ب. ۱۳۸۸. برآورد تبخیرتعرق مرجع چمن در مقیاس‌های زمانی کوتاه و به تفکیک شب و روز (مطالعه موردی در اقلیم کرمان). رساله دکتری در رشته هواشناسی کشاورزی، دانشکده مهندسی آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران.

بختیاری، ب.، خلیلی، ع.، لیاقت، ع. م. و خانجانی، م. ج. ۱۳۸۸. مقایسه تبخیرتعرق روزانه با مجموع ساعتی در ایستگاه هواشناسی مرجع کرمان. مجله آب و خاک، ۲۳(۱): ۴۵-۵۶.

بختیاری، ب.، لیاقت، ع. م. و خلیلی، ع. ۱۳۸۹. تأثیر بازه زمانی اندازه‌گیری متغیرهای هواشناسی در برآورد نیاز آبی گیاه مرجع. آبیاری و زهکشی ایران، ۴(۱): ۸۳-۸۹.

خلیلی، ع.، بذرافشان، ج.، چراغعلی‌زاده، م. ۱۴۰۱. بررسی تطبیقی نقشه‌های اقلیمی ایران در طبقه‌بندی دمارتن گسترش داده شده و کاربست روش برای پهنه‌بندی اقلیم جهان. هواشناسی کشاورزی، ۱۰(۱): ۱۶-۳.

محمدیان ا.، علیزاده، ا. و جوانمرد، س. ۱۳۸۴. محاسبه میزان فراربرآورد تبخیرتعرق مرجع با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های

## سپاسگزاری

انجام این پژوهش در قالب بخشی از رساله دوره دکتری در دانشگاه تهران، بدون بهره‌مندی از داده‌های لایسیمتر وزنی

- Montgomery, D. C. 2000. Introduction to Statistical Quality Control. Fourth Edition. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Monteith, J. L. 1986. Howard Latimer Penman, 10 April 1909-13 October 1984. Biographical memoirs of fellows of the royal society. pp. 378-404.
- Perez, A., Lagos, O., Lillo-Saavedra, M., Souto, C., Paredes, J. and Arumí, J. L. 2020. Mountain Lake Evaporation: A Comparative Study between Hourly Estimations Models and In Situ Measurements. *Water*. 12(9): 2648.
- Rahimi, J., Ebrahimpour, M. and Khalili, A. 2013. Spatial changes of extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran. *Theoretical and applied climatology*. 112(3): 409-418.
- Rana, G. and Katerji, N. 1998. A measurement-based sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration model for crops of different height and in contrasting water status. *Theoretical and Applied Climatology*. 60:141-149.
- Rana, G. and Katerji, N. 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy* 13 (2-3): 125-153.
- Rosenberg, N. J., Blad, B. L. and Verma, S. B. 1983. *Microclimate: the biological Environment* John Wiley and Sons Inc., New York. 495 p.
- Sabeti, H. 1969. *Bioclimatic studies of Iran*. University of Tehran Press, Tehran, 1231, 266 pp (In Farsi).
- Seyyed Azizy, A. 1999. Estimation of Reference Crop Potential Evapotranspiration and ISO-ET<sub>o</sub> Maps for Iran. M. Sc. Thesis, Shiraz university, Shiraz, Iran.
- Temesgen, B., Eching, S., Davidoff, B. and Frame, K. 2005. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 131(1): 73-84.
- Varga-Haszonits, Z., Szalka, E. and Szakal, T. 2022. Determination of reference evapotranspiration using Penman-Monteith method in case of missing wind speed data under subhumid climatic condition in Hungary. *Atmospheric and Climatic Sciences*. 12(2):235-245.
- Verma, S. B., Rosenberg, N. J., Blad, B. L. and Barabas, M. U. 1976. Resistance energy balance method for predicting evapotranspiration determination of boundary layer resistance and evaluation of error effects. *Agronomy Journal*. 68: 776-782.
- Yang, Y., Su, H., Zhang, R., Wu, J. and Qi, J. 2013. A new evapotranspiration model accounting for advection and its validation during SMEX02. *Advances in Meteorology*. 389563, 1-13.
- هواشناسی غیر مرجع در ایران. *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۶ (۲۳): ۸۴-۶۷.
- Allen, R. G., Raes, L. S. and Smith, M. 1998. *Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage, Paper No. 56, FAO, Rome, Italy, 301 p.
- Al-Nakshabandi, G. A., and Kijne, J. W. 1974. Potential evapotranspiration in central Iraq using the Penman method with modified wind function. *Journal of Hydrology*. 23(3-4):319-328.
- Bakhtiari, B., Kamyab Moghadas, R., Khanjani, M. J. and Taraz, H. 2006. Kerman weighing electronic lysimeter error analysis. *International conference on Sustainable Irrigation Management, Technologies and Policies*. WIT Transactions on Ecology and the Environment. 96:137-147, Bologna, Italy.
- Berengena, J. and Gavilan, P. 2005. Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 131(2): 147-163.
- de Bruin, H. A. R. and Trigi, I. F. 2019. A New Method to Estimate Reference Crop Evapotranspiration from Geostationary Satellite Imagery: Practical Considerations. *Water*. 11(2):382.
- Eching, S. O. and Snyder, R. L. 2003. *Statistical Control Charts for Quality Control of Weather Data for Reference Evapotranspiration Estimation*. CIMIS, Department of Water Resources Office of Water Use Efficiency.
- Hupet, F. and Vanclooster, M. 2001. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration. *Journal of Hydrology*. 243(3-4):192-204.
- Liu, B., Han, H., Liu, X., Li, C., Chen, X., Wu, H., Luo, Y. and Cui, Y. 2022. Quantifying the effects of advection on single crop coefficients over a humid paddy field for sustainable irrigation. *Journal of Hydrology*. 614, part B, 128552.
- Losavio, N., Mastroilli, N. and Rana, G. 1992. Review of the convective term in the Penman formula. *Proceedings of the Second ESA Congress*, Norwick University. 184-185
- Malek, E. 1994. Calibration of the Penman wind function using the Bowen ratio energy balance method. *Journal of Hydrology*. 163:289-298.
- McGuffie, K., and Henderson-Sellers, A. 2003. *A Climate Modelling Primer*. Third Edition, John Wiley & Sons, INC, USA.
- Mcjannet, D. L., Webster, I. T. and Cook, F. J., 2012. An area-dependent wind function for estimating open water evaporation using land-based meteorological data. *Environmental Modeling & software*. 31: 76-83.

## Investigating the Effect of Advection and Wind Function in Estimating Reference Evapotranspiration in Kerman

B. Bakhtiari<sup>\*1</sup>, A. Khalili<sup>2</sup>, A. M. Liaghat<sup>3</sup>

Received: Jan.15, 2023

Accepted: Jan.16, 2023

### Abstract

Iran's arid and semi-arid climates are characterized by a hot, dry summer and a pleasant, annual temperature and precipitation pattern in the winter. In these conditions, agricultural crops are often submitted to water stress, and the estimation of water losses is more challenging because of evapotranspiration. According to most empirical and combined methods, the local advection is the most important source of errors in estimating Of reference evapotranspiration ( $ET_o$ ). In light of this, it is necessary to correct some parameters, such as the wind function, according to the local conditions. In this study, two years of historical observed data were used on an hourly time scale. These data were gathered and examined at the meteorological-lysimeter station at the Shahid Bahonar University of Kerman's research farm. After looking at how advection affected  $ET_o$  values, two wind functions for daytime and nighttime in Kerman's semi-arid climate were proposed. The findings demonstrated that as the advection index rises, the model has the propensity to overstate  $ET_o$  by roughly 50%. The proposed wind function for the Kerman region features a power form at night and an exponential form during the day. For these two time scales, respectively, these functions have increased the accuracy of  $ET_o$  estimation by 26 and 8% on average.

**Keywords:** Advection, Evapotranspiration, Penman equation, Sensible heat, Wind function

1- Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

2- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(\*- Corresponding Author Email: Drbakhtiari@uk.ac.ir)