

جنگل و فرآورده‌های چوب، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۶۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۱۶

ص ۳۵۹-۳۶۹

مقایسه روش‌های دمایی و تشعشعی برآورد تبخیر تعرق

مرجع با روش استاندارد FAO Penman-Monteith در گرگان

- ❖ **پدرام عطارد***: دانشیار گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ❖ **سید محمد معین صادقی**: دانشجوی دکتری جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ❖ **امید فتحی‌زاده**: دانشجوی دکتری جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران
- ❖ **مریم‌السادات مطهری**: کارشناس ارشد جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ❖ **سعید راهبری سی‌سخت**: دانشجوی دکتری دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
- ❖ **محمد تقی احمدی**: دانشجوی دکتری جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ❖ **ویلما بایرام‌زاده**: استادیار گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج، ایران

چکیده

برای برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع (ET_0) روش ترکیبی فائو- پنمن- مانیتث (F-P-M)، به منزله روشی استاندارد، جهت ارزیابی نتایج سایر روش‌های تجربی در دو گروه دمایی [بلانی- کریدل (B-C) و هارگریوز- سامانی (H-S)] و تشعشعی [جنسن- هیز (J-H) و تورک (Tc)] استفاده می‌شود. در این تحقیق، با استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی کشاورزی هاشم‌آباد گرگان، واقع در اقلیمی نیمه‌خشک، مقادیر ET_0 برآوردی با مقادیر روش استاندارد مقایسه شد. میانگین ET_0 روزانه برآوردی با روش F-P-M حدود ۳/۱۳ میلی‌متر در روز به دست آمد. در مقیاس روزانه، روش Tc کمترین میانگین ریشه مربع خطا (RMSE) (۰/۹۸ میلی‌متر در روز) را نسبت به سه روش دیگر داشت و نزدیک‌ترین برآورد را با روش استاندارد نشان داد. در مقیاس ماهیانه، RMSE حاصل از روش Tc در ماه‌های فروردین و نیمه دوم سال در کمترین مقدار و به طور متوسط حدود ۰/۰۶ میلی‌متر در روز با خطای ۳ درصد بود. در فصل تابستان برآورد روش B-C نسبت به روش‌های دیگر بهتر و به طور میانگین ۰/۳۲ میلی‌متر (با خطای ۶ درصد) محاسبه شد؛ در حالی که در ماه‌های اردیبهشت و خرداد روش H-S، با متوسط ۰/۴۲ میلی‌متر در روز و ۱۱ درصد خطا، بهترین برآورد را نشان داد. با توجه به کمبود داده‌های هواشناسی استفاده‌شده در روش F-P-M و نیاز روزافزون به برآورد ET_0 با روش‌های ساده‌تر، لازم است قبل از به‌کارگیری این روش‌ها به سازگاری آن‌ها با اقلیم مورد نظر و نیز تطابق آن‌ها با روش F-P-M توجه شود.

واژگان کلیدی: اقلیم نیمه‌خشک، بلانی- کریدل، تورک، جنسن- هیز، سامانی- هارگریوز، هاشم‌آباد گرگان.

مقدمه

بهترین روش برآورد ET_0 در منطقه با شرایط اقلیمی خاص مشخص شود.

کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی (ICID)^۴ و سازمان خواروبار جهانی (FAO)، در سال ۱۹۹۰، از بین روش‌های تجربی متعدد ارائه‌شده برای محاسبه ET_0 ، روش فائو-پنمن-مانتیث (F-P-M)^۵ را یگانه روش استاندارد برآورد ET_0 از روی داده‌های اقلیمی و نیز برای ارزیابی سایر روش‌ها پیشنهاد کردند [۳]. نتایج تحقیقات انجام‌گرفته در نقاط مختلف جهان نشان می‌دهد دقت مقادیر ET_0 برآوردشده به کمک رابطه F-P-M در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری‌شده از طریق لایسیمتر از دیگر روابط برآورد ET_0 مناسب‌تر است [۴-۱۰]. بنابراین FAO در مناطق فاقد لایسیمتر رابطه F-P-M را به منزله رابطه استاندارد توصیه کرده است.

برخی داده‌های استفاده‌شده در رابطه F-P-M (مانند سرعت باد و ساعات آفتابی) فقط در ایستگاه‌های مجهز هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود. عمده ایستگاه‌های هواشناسی موجود در ایران از نوع باران‌سنجی است و فقط داده‌های دما و میزان ریزش‌های آسمانی در این ایستگاه‌ها اندازه‌گیری می‌شود و در این مناطق نمی‌توان از روش F-P-M برای برآورد ET_0 استفاده کرد. در این نواحی باید برای برآورد ET_0 از روابطی استفاده کرد که نیاز به داده‌های هواشناسی کمتری دارند. این روابط در دو گروه اصلی دمایی^۶ و تشعشعی^۷ طبقه‌بندی می‌شوند. در گروه دمایی پارامتر اصلی محاسبه ET_0 ، دمای

تبخیرتعرق^۱ (ET) یکی از پارامترهای بسیار مهم است که دانستن آن برای برآورد آب مصرفی گیاه و طراحی سیستم‌های آبیاری و مطالعات هیدرولوژیک ضرورت دارد. تعیین دقیق مقدار آبی که برای ET مصرف می‌شود از عوامل اساسی در برنامه‌ریزی برای رسیدن به محصول بیشتر است. ET فراسنجی است که یا به روش مستقیم (لایسیمتری) یا به طور غیر مستقیم با استفاده از داده‌های هواشناسی و ارائه معادلات تجربی برآورد می‌شود. به دلیل عدم امکان نصب لایسیمتر در همه مناطق و قابل‌دسترس بودن داده‌های هواشناسی در مناطق مختلف، عموماً روش غیر مستقیم برای برآورد ET استفاده می‌شود. بنابراین، نیاز به داده‌های ET سبب پیدایش روش‌های متعدد برای برآورد آن شده است [۱]. مقدار ET برآوردشده به کمک اغلب این روابط تبخیرتعرق مرجع (ET_0)^۲ است. ET_0 عبارت است از میزان آبی که یک مزرعه پوشیده از گیاه مرجع (نظیر چمن یا یونجه) در یک دوره زمانی مشخص مصرف می‌کند؛ به طوری که گیاهان این مزرعه در طول دوره رشد با کمبود آب مواجه نشوند [۲]. با ضرب ET_0 در ضریب گیاهی (K_c)^۳، ET گیاه مورد نظر حاصل می‌شود. معادلاتی که برای برآورد ET_0 به کار می‌روند از پارامترهای اقلیمی یکسان استفاده نمی‌کنند و به دلیل ماهیت تجربی آن‌ها برای همه شرایط اقلیمی مناسب نیستند. به همین دلیل، لازم است

4. International Commission on Irrigation and Drainage (ICID)

5. FAO Penman-Monteith (F-P-M)

6. Temperature-Based

7. Radiation-Based

1. Evapotranspiration

2. Reference Evapotranspiration (ET_0)

3. Crop Coefficient (K_c)

کاربرد معادله F-P-M را برای محاسبه ET_0 روزانه تأیید می‌کند. سامانی و پسرکلی در آریزونای امریکا روش‌های مختلف برآوردی ET_0 را در مقایسه با لایسیمتر بررسی کردند و نتیجه گرفتند معادله H-S برای اراضی خشک بهترین برآورد را دارد [۱۱]. شریفیان و همکاران روش‌های مختلف برآورد ET_0 مرجع (ترکیبی و دمایی) را با روش استاندارد مقایسه کردند و نتیجه گرفتند بالاترین و پایین‌ترین ضریب تعیین (R^2) را روش‌های پنمن (Pen) $R^2=0/99$ و بلانی-کریدل-فائو (B-C-F) $R^2=0/69$ دارند. به علاوه در ایستگاه‌هایی که در آن‌ها پارامتر دمای هوا ثبت می‌شود، معادله H-S برای برآورد ET_0 مناسب‌تر است [۱۰]. هدف این پژوهش مقایسه مقادیر ET_0 محاسبه‌شده روزانه و ماهیانه از طریق روش‌های دمایی (B-C و H-S) و نیز روش‌های تشعشی (J-H و Tc) با روش استاندارد مرجع (F-P-M) در گرگان است.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

برای این پژوهش، از مقادیر روزانه آمار و اطلاعات هواشناسی- شامل دمای بیشینه و کمینه، ساعات آفتابی، میزان تبخیر، جهت و سرعت باد، بیشینه و کمینه رطوبت نسبی هوا، میزان بارندگی- ایستگاه کشاورزی هواشناسی هاشم‌آباد، واقع در شهر گرگان استان گلستان (طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی، عرض ۳۶ درجه و ۵۱ دقیقه شمالی، ارتفاع از سطح دریا ۱۳٫۳ متر) با دوره آماربرداری هفده‌ساله

هواست؛ مانند روش‌های بلانی-کریدل (B-C)^۱ و هارگریوز-سامانی (H-S)^۲. در گروه تشعشی از انرژی تابشی خورشید به مثابه عامل اصلی محاسبه ET_0 استفاده می‌شود. روش‌های جنسن-هیز (J-H)^۳ و تورک (Tc)^۴ در این دسته قرار می‌گیرند [۷].

تاکنون مطالعات بسیاری برای تعیین بهترین روش محاسبه ET_0 در اقلیم‌های مختلف صورت گرفته است. تورک به ارزیابی چهار مدل ماکینک (Makk)^۵، Tc، پرستلی-تایلر (PT)^۶، و هارگریوز (Har)^۷، که معمولاً برای برآورد مقادیر ET_0 ماهیانه استفاده می‌شوند، پرداخت و این نتیجه به دست آمد که مدل Tc مناسب‌ترین روش برای برآورد ET_0 در اقلیم‌های سرد مرطوب و خشک است؛ در حالی که مدل Har دقیق‌ترین مدل تحت شرایط آب‌وهوایی نیمه‌خشک و گرم و مرطوب شناخته شد و در مقابل، مدل Makk ضعیف‌ترین برآوردها را برای همه شرایط اقلیمی، به استثنای شرایط محیطی سرد مرطوب، داشت. همچنین در آب‌وهوای سرد مرطوب مدل Har حداقل دقت را در برآورد ET_0 نشان داد [۱۱]. همچنین صالح و سندل به ارزیابی بیست و سه روش محاسبه ET_0 در قسمت‌های مرکزی عربستان پرداختند و نتیجه گرفتند روش J-H از گروه روش‌های تشعشی، بهترین برآورد را نشان می‌دهد [۱۲]. جنسن و هیز در پژوهشی در جنوب ایتالیا برخی معادلات تجربی را برای تخمین ET_0 روزانه مقایسه کردند [۱۳]. نتایج آن‌ها به میزان زیادی

1. Blaney-Criddle (B-C)
2. Hargreaves-Samani (H-S)
3. Jensen-Haise (J-H)
4. Turc (Tc)
5. Makkink (Makk)
6. Priestley-Taylor (PT)
7. Hargreaves (Har)

8. Coefficient of Determination (R^2)

9. Penman (Pen)

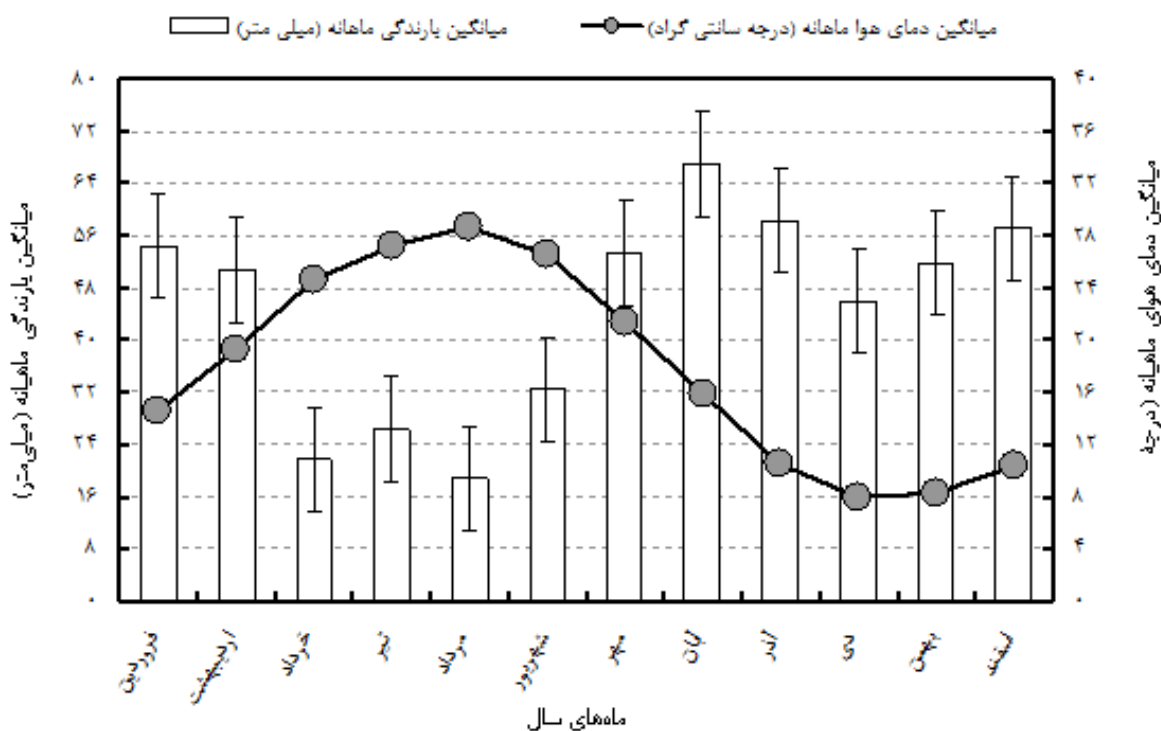
10. Blaney-Criddle-FAO (B-C-F)

متوسط دمای هوای ۲۸٫۶ درجه سانتی‌گراد (خطای معیار $\pm ۰٫۲$ درجه سانتی‌گراد) و دی سردترین ماه سال با متوسط دمای هوای ۸ درجه سانتی‌گراد (خطای معیار $\pm ۰٫۵$ درجه سانتی‌گراد) است (شکل ۱). ضرایب اقلیمی آمبرژه و دومارتن، اقلیم این منطقه را در طبقه نیمه‌خشک قرار دادند (ضریب آمبرژه ۴۷٫۲ و ضریب دومارتن ۱۹٫۲).

مقادیر ET_0 روزانه ایستگاه با روش‌های B-C، H-S، J-H، و Tc محاسبه و برای بررسی صحت آن‌ها این مقادیر با مقادیر برآوردشده از طریق روش F-P-M مقایسه شدند (فرمول‌های ۱ تا ۶).

(۱۳۷۱-۱۳۸۷) استفاده شد. ایستگاه هاشم‌آباد گرگان در فاصله پنج کیلومتری شمال غربی گرگان و در منطقه‌ای کشاورزی واقع است.

با بررسی آمار بلندمدت این ایستگاه، میانگین بارندگی سالانه ۵۳۵٫۱ میلی‌متر (خطای معیار $\pm ۱۹٫۵$ میلی‌متر)، متوسط دمای هوای سالانه ۱۷٫۹ درجه سانتی‌گراد (خطای معیار $\pm ۰٫۲$ درجه سانتی‌گراد)، و میانگین رطوبت نسبی ۷۹٫۶ درصد (خطای معیار $\pm ۰٫۹$ درصد) به دست آمد. آبان و مرداد به ترتیب بیشترین (۶۷ میلی‌متر، خطای معیار $\pm ۸٫۸$ میلی‌متر) و کمترین (۱۸٫۷ میلی‌متر، خطای معیار $\pm ۵٫۹$ میلی‌متر) میزان بارندگی ماهیانه را دارند. مرداد گرم‌ترین ماه با



شکل ۱. میانگین دمای هوا (درجه سانتی‌گراد) و بارندگی ماهیانه (میلی‌متر) بر اساس آمار هفده‌ساله (۱۳۷۱-۱۳۸۷) ایستگاه هواشناسی کشاورزی هاشم‌آباد گرگان (بارها نشان‌دهنده خطای معیار بارندگی ماهیانه است).

دمای هوای روزانه با یکای °C، و T_{min} کمینه دمای هوای روزانه با یکای °C است.

روش J-H [۱۶]

$$ET_0 = C_T(T - T_X)R_S \quad (۴)$$

C_T ضریب تجربی با مقدار ۰٫۰۱۴، R_S تابش خورشیدی در دوره مورد نظر با یکای $Ly.day^{-1}$ و T_X برابر است با:

(۵)

$$T_X = -2.5 - 0.14(e_{s,max} - e_{s,min}) - h / 500$$

$e_{s,max}$ و $e_{s,min}$ به ترتیب فشار بخار اشباع به‌ازای بیشینه و کمینه روزانه دمای هوا در گرم‌ترین ماه سال با یکای mbar و h ارتفاع از سطح دریا با یکای m.

روش Tc [۱۷]

(۶)

$$ET_0 = 0.013\left(\frac{T}{T+15}\right)(0.02388R_S + 50)$$

هرگاه ایستگاهی در شرایط غیر مزرعه و خشک داده‌های هواشناسی را ثبت کند، مقادیر ET_0 به‌دست‌آمده با مقادیر ET_0 مرجع یکسان نخواهد بود. بنابراین، از روش F-P-M باید فقط در شرایط مرجع استفاده کرد؛ یعنی منطقه مرطوب و اطراف ایستگاه پوشیده از گیاه و خوب آبیاری شده باشد. از آنجا که ایستگاه هواشناسی هاشم‌آباد گرگان در منطقه کشاورزی واقع شده است، ایستگاه مرجع محسوب می‌شود و نیازی به اعمال ضرایب اصلاحی ایستگاه غیر مرجع به مرجع نیست. برای هر یک از روش‌های مورد نظر و روش استاندارد، مقادیر ET_0 روزانه و ماهیانه طی دوره آماری موجود محاسبه شد. برای کمی کردن مقایسه ET_0 برآوردشده از روش استاندارد و سایر روش‌های تجربی،

روش‌های محاسبه ET_0

روش F-P-M [۵]

(۱)

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma(900 / (T + 273))u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

ET_0 تبخیرتعرق گیاه مرجع (چمن) با یکای $mm.day^{-1}$ مقدار تابش خالص خورشید با یکای $MJ.m^{-2}.day^{-1}$ انرژی که صرف گرم‌کردن خاک می‌شود (جریان گرمای خاک) با یکای $MJ.m^{-2}.day^{-1}$ ، λ گرمای نهان تبخیر آب با یکای $MJ.Kg^{-1}$ که تابعی از دمای هواست، T میانگین دمای هوای روزانه با یکای °C، u_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین با یکای $m.s^{-1}$ ، e_s فشار بخار اشباع هوا با یکای KPa ، e_a فشار بخار واقعی با یکای KPa ، و Δ شیب منحنی فشار بخار در میانگین دمای هوای روزانه با یکای $KPa.^{\circ}C^{-1}$ است [۱۴].

روش B-C [۱۵]

$$ET_0 = a + b[P(0.46T + 8.13)] \quad (۲)$$

a و b ضرایب اقلیمی خاص هر منطقه و P ضریب طول روز یا درصد سالیانه تابش آفتاب در ماه، که به صورت روزانه توصیف شده است (متوسط ساعات روشنایی هر روز در ماه مورد نظر تقسیم بر کل ساعات روشنایی سال ضرب در ۱۰۰).

روش H-S [۵]

(۳)

$$ET_0 = 0.0135(T + 17.8)K_T \cdot R_a (T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

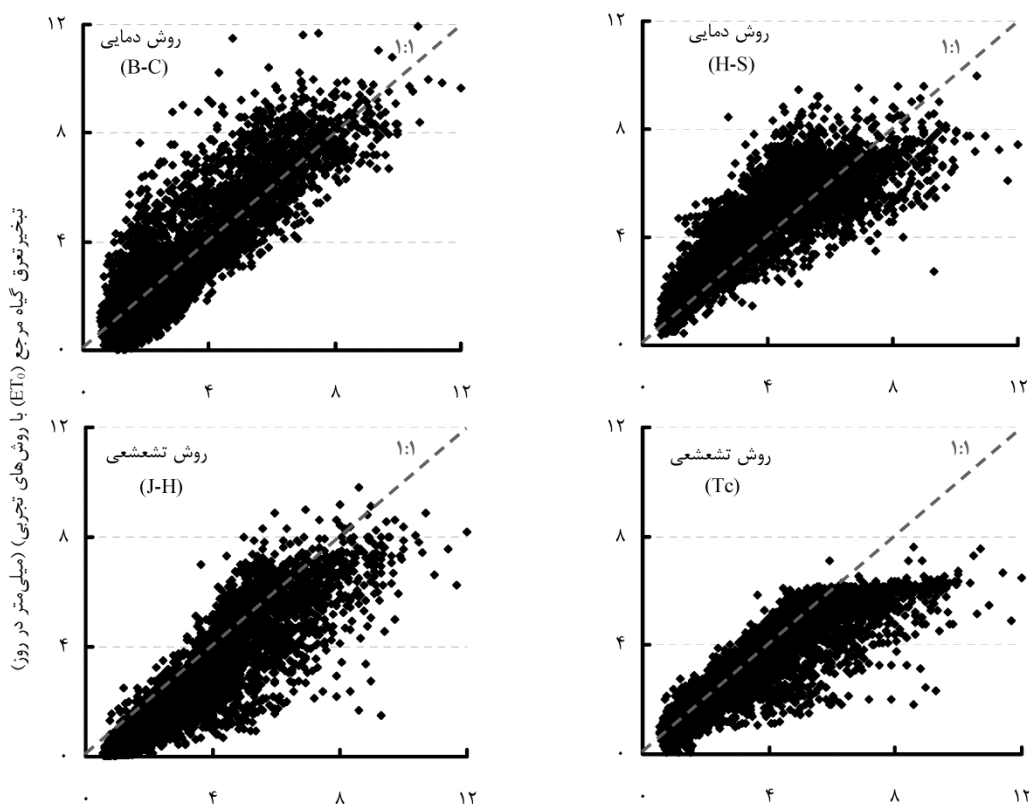
K_T ضریب اقلیمی خاص در هر منطقه، R_a تابش فرازمینی با یکای $MJ.m^{-2}.day^{-1}$ ، T_{max} بیشینه

محاسبه‌شده به کمک روش استاندارد (F-P-M) برای ایستگاه هاشم‌آباد گرگان مقایسه می‌شود. با توجه به شکل ۲، نزدیک‌ترین خط برازش داده‌شده به خط ۱:۱ مربوط به معادله B-C است. برای داده‌های روزانه مقادیر R^2 زیاد و تقریباً برای هر چهار روش دمایی و تشعشعی یکسان بود که کمترین و بیشترین آن به ترتیب با معادله H-S (۰٫۷۶) و J-H (۰٫۸۳) به دست آمد. کمترین و بیشترین مقدار RMSE (میلی‌متر در روز) با معادله Tc (۰٫۹۸) و J-H (۱٫۲۱) حاصل شد (جدول ۱).

آماره‌های ضریب تعیین (R^2) و میزان خطا محاسبه و خط ۱:۱ برای داده‌های روزانه و نیز ماهیانه ترسیم شد. برای نشان دادن بهترین و نزدیک‌ترین روش برآورد ET_0 با روش F-P-M، میانگین ریشه مربع خطا (RMSE) هر یک از روش‌ها نیز محاسبه شد. مقایسه هم‌زمان نتایج بر اساس R^2 و RMSE می‌تواند عملکرد مدل‌ها را بهتر تبیین کند [۱۸].

نتایج

در شکل ۲ نمودار همبستگی بین مقادیر ET_0 روزانه محاسبه‌شده به کمک روش‌های تجربی با مقادیر ET_0



شکل ۲. همبستگی بین مقادیر روزانه تبخیرتغرق گیاه مرجع (ET_0) با روش استاندارد فائو پنمن - مانتیت (F-P-M) (میلی‌متر در روز)

شکل ۲. نمودار همبستگی بین مقادیر روزانه تبخیرتغرق گیاه مرجع (ET_0) محاسبه‌شده به کمک روش‌های تجربی [دمایی شامل بلانی-کریدل (B-C) و هارگریوز-سامانی (H-S) و تشعشعی شامل جنسن-هیز (J-H) و تورک (Tc)] با مقادیر ET_0 روزانه روش استاندارد فائو-پنمن-مانتیت (F-P-M) بر اساس آمار هفده‌ساله (۱۳۷۱-۱۳۸۷) ایستگاه هواشناسی کشاورزی هاشم‌آباد گرگان. خط چین بیان‌کننده خط تطابق ایده‌آل (۱:۱) است.

جدول ۱. مقایسه پارامترهای رگرسیونی و آماری ناشی از مقایسه مقادیر روزانه تبخیرتغرق (ET_0) محاسبه شده به کمک روش‌های تجربی [دمایی شامل بلانی- کریدل (B-C) و هارگریوز- سامانی (H-S) و تشعشی شامل جنسن- هیز (J-H) و تورک (Tc)] با ET_0 روش استاندارد فائو- پنمن- مانتیث (F-P-M). n بیان کننده تعداد روزهای آماری، a عرض از مبدأ خط رگرسیون، b شیب خط رگرسیون، R^2 ضریب تعیین، و RMSE نشان دهنده ریشه میانگین مربع خطاست.

روش	n	ضرایب		R^2	خطا (درصد)	RMSE (میلی متر در روز)
		a	b			
B-C	۵۱۰۲	۱	۱	۰٫۷۷	۳۶	۱٫۱۳
H-S	۵۷۵۹	۰٫۸۴	۰٫۸۴	۰٫۷۶	۳۷	۱٫۱۵
J-H	۵۷۵۷	۰٫۹۳	۰٫۹۳	۰٫۸۳	۳۹	۱٫۲۱
Tc	۵۷۵۵	۰٫۷۲	۰٫۷۲	۰٫۸۰	۳۱	۰٫۹۸

جدول ۲. مقادیر تبخیرتغرق (ET_0) روزانه در ماه‌های مختلف سال محاسبه شده به کمک روش استاندارد فائو- پنمن- مانتیث (F-P-M) و روش‌های تجربی [دمایی شامل بلانی- کریدل (B-C) و هارگریوز- سامانی (H-S) و تشعشی شامل جنسن- هیز (J-H) و تورک (Tc)] برای آمار هفده ساله (۱۳۷۱-۱۳۸۷) ایستگاه هواشناسی کشاورزی هانشم آباد گرگان

ماهانه	دمایی					تشفشی
	F-P-M	B-C	H-S	J-H	Tc	
فروردین	۱٫۵۸	۲٫۷۱	۱٫۹۱	۰٫۹۶	۱٫۵۵	
اردیبهشت	۲٫۶۲	۳٫۸۹	۲٫۸۴	۱٫۸۴	۱٫۷۹	
خرداد	۴٫۸۷	۶٫۰۴	۴٫۴۸	۳٫۵۱	۳٫۱۰	
تیر	۵٫۲۳	۵٫۹۱	۵٫۱۰	۴٫۰۰	۴٫۱۵	
مرداد	۵٫۸۷	۵٫۷۶	۶٫۰۱	۵٫۰۶	۴٫۸۹	
شهریور	۴٫۷۲	۴٫۴۱	۶٫۰۴	۴٫۴۳	۴٫۵۴	
مهر	۳٫۷۶	۳٫۲۰	۵٫۴۷	۳٫۳۶	۴٫۰۰	
آبان	۲٫۸۸	۱٫۹۹	۴٫۰۹	۱٫۹۶	۳٫۰۳	
آذر	۲٫۰۵	۱٫۱۶	۲٫۶۷	۰٫۸۹	۱٫۹۰	
دی	۱٫۵۵	۱٫۱۴	۱٫۸۹	۰٫۵۶	۱٫۳۵	
بهمن	۱٫۲۳	۱٫۶۱	۱٫۵۰	۰٫۵۲	۱٫۱۸	
اسفند	۱٫۱۷	۱٫۹۴	۱٫۴۳	۰٫۶۱	۱٫۰۸	
میانگین	۳٫۱۳	۳٫۳۱	۳٫۶۲	۲٫۳۱	۲٫۷۱	
(± خطای معیار)	(±۰٫۴۹)	(±۰٫۵۴)	(±۰٫۵۱)	(±۰٫۴۸)	(±۰٫۴۱)	

ماه‌یانه با معادله Tc (۲۷ درصد) و $J-H$ (۳۱ درصد) محاسبه شد (جدول ۳).

مقایسه مقادیر $RMSE$ برآورد شده به کمک چهار روش تجربی در ماه‌های سال نشان می‌دهد $RMSE$ حاصل از روش Tc در ماه‌های فروردین و نیمه دوم سال کمترین مقدار و به طور متوسط حدوداً ۰/۰۶ میلی‌متر در روز است. با توجه به مقدار میانگین ET_0 برآورد شده به کمک روش $F-P-M$ ، خطای برآورد ماه‌یانه از طریق روش Tc حدود ۳ درصد است. این مقدار در فصل تابستان به کمک روش $B-C$ نسبت به روش‌های دیگر کمتر و به طور میانگین ۰/۳۲ میلی‌متر (با خطای ۶ درصد) محاسبه شد. در ماه‌های اردیبهشت و خرداد روش $H-S$ ، با متوسط ۰/۴۲ میلی‌متر در روز و ۱۱ درصد خطا، بهترین برآورد را نشان داد.

در جدول ۲ مقادیر ET_0 محاسبه شده ماه‌یانه به کمک روش‌های تجربی و روش استاندارد می‌آید. میانگین ET_0 روزانه در ماه‌های مختلف سال از طریق روش $F-P-M$ حدود ۳/۱۳ میلی‌متر در روز محاسبه شد. به طور متوسط، نزدیک‌ترین برآورد را به برآورد $F-P-M$ روش $B-C$ (۳/۳۱ میلی‌متر در روز) و دورترین برآورد را روش $J-H$ (۲/۳۱ میلی‌متر در روز) داشتند. روش Tc در ماه‌های فروردین و شهریور و نیز نیمه دوم سال برآوردی نزدیک به مقدار ET_0 محاسبه شده با روش استاندارد نشان داد و این در حالی است که در ماه‌های تیر و مرداد روش $H-S$ برآوردی مناسب از ET_0 داشت.

مقدار $RMSE$ برای برآورد ماه‌یانه در هر سه روش $B-C$ و $H-S$ و Tc تقریباً مشابه و بیشترین مقدار، از آن روش $J-H$ (۰/۹۷ میلی‌متر در روز) بود. همچنین کمترین و بیشترین میزان خطای برآورد

جدول ۳. مقایسه پارامترهای رگرسیونی و آماری ناشی از مقایسه مقادیر ماه‌یانه تبخیر تعرق (ET_0) محاسبه شده به کمک روش‌های تجربی [دمایی شامل بلانی- کریدل ($B-C$) و هارگریوز- سامانی ($H-S$) و تشعشعی شامل جنسن- هیز ($J-H$) و تورک (Tc)] با ET_0 روش استاندارد فائو- پنمن- مانتیت ($F-P-M$). n بیان‌کننده تعداد روزهای آماری، a عرض از مبدأ خط رگرسیون، b شیب خط رگرسیون، R^2 ضریب تعیین، و $RMSE$ نشان‌دهنده ریشه میانگین مربع خطاست.

روش	n	ضرایب		R^2	خطا (درصد)	RMSE (میلی‌متر در روز)
		a	b			
B-C	۲۰۴	۰/۸۲	۰/۴۰	۰/۸۰	۲۸	۰/۸۷
H-S	۲۰۴	۰/۹۱	-۰/۱۷	۰/۸۳	۲۸	۰/۸۸
J-H	۲۰۴	۰/۹۹	۰/۸۴	۰/۹۱	۳۱	۰/۹۷
Tc	۲۰۴	۱/۱۴	۰/۰۳	۰/۸۲	۲۷	۰/۸۶

نتیجه‌گیری

مرور منابع نشان می‌دهد تاکنون پژوهش‌های متعددی در سطح دنیا در زمینه مقایسه روش‌های مختلف برآورد ET_0 با روش استاندارد F-P-M انجام شده است [۷، ۸، ۹، ۱۹، ۲۰]. در ایران نیز شریفیان و همکاران مطالعاتی در این زمینه انجام داده‌اند [۱۰]. در این پژوهش، ET_0 روزانه و ماهیانه برآوردی در دو گروه دمایی (B-C و H-S) و تشعشی (J-H و Tc) با ET_0 برآوردی به روش استاندارد F-P-M مقایسه شدند.

برای داده‌های روزانه روش J-H بیشترین مقدار ضریب R^2 (۰/۸۳) را در مقابل روش F-P-M داشت (جدول ۱). البته روش J-H، علاوه بر داشتن بیشترین ضریب R^2 ، بیشترین RMSE و خطا را هم داشت. روش Tc کمترین RMSE را نسبت به سه روش دیگر داشت و درصد خطای آن نزدیک به سایر روش‌ها بود. برای برآورد روزانه در اقلیم نیمه‌خشک گرگان این روش نسبت به سه روش دیگر برآوردی نزدیک‌تر به روش استاندارد نشان داد. شریفیان و همکاران او روش‌های مختلف برآورد ET_0 (روش‌های H-S، B-C-F، Pen، فائو-پنمن^۱) را با روش F-P-M مقایسه کردند. نتیجه نشان داد در استان گلستان بهترین و نزدیک‌ترین روش برآورد ET_0 روزانه به روش F-P-M روش H-S است [۱۰]. این نتیجه ناشی از تفاوت روش‌های برآورد ET_0 در تحقیق یادشده و این تحقیق است. تحقیق حاضر نیز نشان داد، پس از روش Tc، روش H-S کمترین فاصله را نسبت به روش استاندارد در مقیاس روزانه دارد.

میانگین ET_0 ماهیانه برآوردی به کمک روش F-P-M مقدار ۳/۱۳ میلی‌متر در روز به دست آمد و

روش B-C به طور متوسط نزدیک‌ترین روش به مقادیر روش F-P-M است (۳/۳۱ میلی‌متر در روز). در مقابل، روش J-H بدترین حالت را در برآورد ماهیانه ET_0 در این منطقه دارد و در همه ماه‌های سال ET_0 برآوردی آن کمتر از مقدار برآوردی F-P-M است. همچنین روش J-H در برآورد ماهیانه ET_0 بیشترین RMSE را دارد. روش Tc در ماه فروردین و کلیه ماه‌های فصول پاییز و زمستان نزدیک‌ترین برآورد را به روش F-P-M نشان داد و این در حالی است که روش H-S در ماه‌های اردیبهشت و خرداد دقیق‌ترین برآوردها را به روش F-P-M دارد. روش دمایی B-C در ماه‌های تیر، مرداد، و شهریور نزدیک‌ترین برآورد را به برآورد روش F-P-M دارد. درباره برآورد ماهیانه ET_0 به دلیل نوسانات زیاد روش‌های استفاده شده باید در هر ماه از نزدیک‌ترین روش به روش استاندارد در این منطقه استفاده کرد. نتایج نشان می‌دهد دورترین برآوردها را در همه ماه‌های سال روش J-H دارد و این روش تشعشی برای برآورد مقادیر ET_0 ماهیانه در اقلیم نیمه‌خشک گرگان مناسب نیست.

ET یکی از فاکتورهای مهم در معادلات بودجه آب و انرژی سطح زمین است و دانستن مقدار آن ضرورت دارد. متأسفانه اندازه‌گیری ET به دلیل پرهزینه بودن به ندرت انجام می‌گیرد [۱۴ و ۲۱]. برآورد ET می‌تواند در هیدرولوژی، کشاورزی، جنگل‌داری و مدیریت اراضی کاربرد داشته باشد [۲۲]. گرچه معادلات زیادی برای برآورد ET_0 معرفی شده‌اند، لازم است قبل از به‌کارگیری هر یک از آنها، سازگار بودنشان با اقلیم منطقه ارزیابی شود. در این زمینه توجه به در دسترس بودن و نیز صحت داده‌های هواشناسی مورد استفاده نیز درخور توجه است.

References

- [1]. Kouchakzadeh, M. and Nikbakht, J. (2004). Comparison of different reference evapotranspiration methods for different climates of Iran with FAO-Penamn-Montith standard method. *Agricultural Sciences*, 10(3): 43-57.
- [2]. Lu, J., Sun, G., McNulty, S. G., and Amatya, M. D. (2005). A comparison of six evapotranspiration methods for regional use in the Southeastern United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 621-633.
- [3]. Mousavi-Baygi, M., Erfanian, M., and Sarmad, M. (2009). Estimation of reference crop evapotranspiration using the least meteorological data. *Journal of Water and Soil*, 23(1): 91-99.
- [4]. Allen, R. G. and Pruitt, W. O. (1991). FAO-24 reference evapotranspiration factors. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(5): 758-773.
- [5]. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper, NO. 56, Rome, Italy.
- [6]. Fisher, J. B., DeBiase, T. A., Qi, Y., Xu, M., and Goldesteian, A. H. (2009). Evapotranspiration models compared a Sierra Nevada forest ecosystems. *Environmental Modelling & Software*, 20: 783-796.
- [7]. Lopez-Urrea, R., Martin de Santa Olalla, F., Fabeiro, C., and Moratalla, A. (2006). An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 86: 277-282.
- [8]. Lopez-Urrea, R., Martin de Santa Olalla, F., Fabeiro, C., and Moratalla, A. (2006). Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 85: 15-26.
- [9]. Smith, M. (1991). Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. FAO, Rome.
- [10]. Sharifan, H., Ghahreman, B., Alizadeh, A., and Mirlatifi, S. M. (2006). Comparison of the different methods of estimated reference evapotranspiration (Compound and temperature) with standard method and analysis of aridity effects. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 13(1): 19-30.
- [11]. Samani, Z. A. and Pessarakli, M. (1986). Estimating potential crop evapotranspiration with minimum data in Arizona. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 29(2): 522-524.
- [12]. Salih, A. M. A. and Sendil, U. (1984). Evapotranspiration under extremely arid climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 110(3): 289-303.
- [13]. Trajković, S. and Gocić, M. (2010). Comparison of some empirical equations for estimating daily reference evapotranspiration *Facta universitatis – series. Architecture and Civil Engineering*, 8(2): 163-168.
- [14]. Tabari, H. (2010). Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. *Water Resources Management*, 24(10): 2311-2337.
- [15]. Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. (1977). Guidelines for Predicting Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper, No 24, 2nd edit FAO Rome.
- [16]. Jensen, M. E. and Haise, H. R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 93(3): 15-41.

- [17]. Turc, L. (1961). Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise à jour. *Annales Agronomiques*, 12(1):13-49.
- [18]. Mohawesh, O. E. (2011). Evaluation of evapotranspiration models for estimating daily reference evapotranspiration in arid and semi-arid environments. *Plant, Soil and Environments*, 57(4): 145-152.
- [19]. Fisher, J. B., DeBiase, T. A., Qi, Y., Xu, M., and Goldesteian, A. H. (2009). Evapotranspiration models compared a Sierra Nevada forest ecosystems. *Environmental Modelling & Software*, 20: 783-796.
- [20]. Douglas, E. M., Jacobs, J. M., Sumner, D. M., and Ray, R. M. (2009). A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types. *Journal of Hydrology*, 373: 366-376.9
- [21]. Silva, D., Meza, F. J., and Varas, E. (2009). Estimating reference evapotranspiration (ET_0) using numerical weather forecast data in central Chile. *Journal of Hydrology*, 382: 64-71.
- [22]. Xu, C. Y. and Singh, V. P. (2005). Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions. *Journal of Hydrology*, 308: 105-121.

