

## مقایسه برخی روابط تجربی بر آورد تبخیر - تعرق مرجع برای دشت تبریز با استفاده از لایسیمتر و ارائه مدلی برای تعیین آن از روی داده‌های هواشناسی

اژدر عنابی میلانی<sup>۱\*</sup>، محمدرضا نیشابوری<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۹۶/۳/۱۶

۱- استادیار، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران

۲- استاد، گروه علوم خاک، دانشگاه تبریز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a\_o\_milani@yahoo.com

### چکیده

تبخیر- تعرق گیاهان در کل به دو روش اندازه‌گیری مستقیم و یا برآورد غیرمستقیم از روی داده‌های هواشناسی تعیین می‌شود. تعیین مستقیم تبخیر- تعرق گیاهان پرهزینه و وقت‌گیر است، لذا روش‌هایی تعیین شده‌اند که بتوان با استفاده از آنها نیاز آبی محصولات را با دقت قابل قبولی تعیین نمود. در این مطالعه تبخیر- تعرق مرجع توسط فرمول بیلان آبی خاک با استفاده از لایسیمتر برای دوره‌های ۱۰ روزه و ماهانه در دشت تبریز تعیین گردیده و با نتایج به دست آمده از برخی روابط تجربی مقایسه شد. نتایج نشان داد که مقدار تبخیر- تعرق مرجع ( $E_{To}$ ) سالانه در طول ۹ ماه به طور متوسط برابر ۱۲۲۶/۹ میلی‌متر می‌باشد. در این مدت متوسط تبخیر از تشت کلاس A ( $E_p$ )، برابر ۱۹۴۷/۳ میلی‌متر بود. مقایسه تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر با آنچه توسط روابط مختلف تجربی بدست آمده نشان داد که روش تشت تبخیر کلاس A ( $R^2=0/99$ ) و روش هارگریوز به ترتیب بیش‌ترین و کمترین همبستگی را با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر دارند. با این وجود نزدیکترین روش به لایسیمتر از نظر شاخص‌های مورد بررسی، روش پنمن- مانیتث بود. در کل بهترین روش برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع در دشت تبریز روش پنمن- مانیتث شناخته شد. همچنین بهترین رابطه رگرسیونی برای تعیین تبخیر- تعرق مرجع از روی داده‌های هواشناسی ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: اطلاعات هواشناسی، پنمن- مانیتث، تبخیر- تعرق مرجع، تشت تبخیر، لایسیمتر، مدل تجربی

## Comparison of Some Empirical Estimating Methods of Reference Evapotranspiration in Tabriz Plain Using Lysimeter and Proposing a Model for its Determination from Climatic Data

A Onnabi Milani<sup>1\*</sup>, MR Neyshabouri<sup>2</sup>

Received: 2016.3.30

Accepted: 2017.06.06

1- Assistant Prof., Soil and Water Research Department, East Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Tabriz, Iran

2- Prof., Soil Science Dep., Faculty of Agriculture, Univ. of Tabriz, Iran

\*Corresponding Author, Email: a\_o\_milani@yahoo.com

### Abstract

Determining the evapotranspiration of plants is possible mainly by two methods, namely direct measuring and indirect estimation using climatic parameters. Evapotranspiration determination using direct method is difficult, costly and time consuming. For this reason, some indirect methods have been proposed for determination of crop water requirement with acceptable accuracy. A lysimetric study was conducted to determine the reference evapotranspiration ( $ET_o$ ) in Tabriz plain in a loamy soil. Evapotranspiration was measured in ten days and monthly intervals by water balance equation method and then compared with  $ET_o$  obtained using some empirical methods. Results indicated that the average seasonal  $ET_o$  and pan evaporation ( $E_p$ ) for 9 months were 1226.9 and 1947.3 mm respectively. Comparison between the measured and estimated  $ET_o$  by various methods showed that the pan evaporation (class A) and Hargreaves methods had the highest and lowest correlation with lysimetric data, respectively. Based on the statistical analysis, Penman-Monteith method had the closest estimates to lysimetric measurement. In general, Penman-Monteith was introduced as a suitable method for estimating reference evapotranspiration in Tabriz plain. Also, the best regression equation for estimating  $ET_o$  using meteorological parameter was introduced.

**Keywords:** Climatic data; Empirical model; Lysimeter; Penman-Monteith; Reference evapotranspiration

### مقدمه

سبزی با ارتفاع یکنواخت که به طور فعال در حال رشد بوده و سایه آن کاملاً زمین را می پوشاند و هیچ محدودیتی از نظر آب ندارد، می باشد. مطالعات و پژوهش های فراوانی در نقاط مختلف دنیا در مورد تبخیر- تعرق مرجع صورت گرفته است. بعضی از این مطالعات به منظور بررسی دقت روش های تجربی انجام شده و برخی دیگر برای مقایسه روش ها و معرفی مناسب ترین روش صورت گرفته است. در برخی از این پژوهش ها مقادیر تبخیر- تعرق مرجع برآورد شده با مقادیر اندازه گیری شده هم خوانی داشته

تبخیر- تعرق ( $ET$ ) یکی از فرایندهای عمده در چرخه هیدرولوژیکی است و برآورد دقیق آن برای مدیریت و برنامه ریزی منابع آب ضروری می باشد. برای تعیین تبخیر- تعرق یک محصول، اولین گام تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع ( $ET_o$ ) است. تبخیر- تعرق مرجع بر طبق تعریف آلن و همکاران (۱۹۹۸)، شدت تبخیر- تعرق از یک محصول فرضی با ارتفاع ۰/۱۲ متر و مقاومت پوشش گیاهی ۷۰ ثانیه بر متر و آلبدو ۰/۲۳ که بسیار شبیه به تبخیر- تعرق از سطح فشرده چمن

و در برخی دیگر و به‌ویژه در نواحی خشک‌تر متفاوت بوده است (ابوخالد و همکاران ۱۹۸۲). مقایسه روش‌های مبتنی بر تابش برای استان‌های مختلف کشور نشان داد که مناسبترین روش برای استان آذربایجان شرقی روش تورک می‌باشد (ولی‌پور ۲۰۱۴). ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق مرجع در کرمان توسط مطالعه لایسیمتری نشان داد که روش تابشی FAO ۲۴ در مقایسه با روش‌های دیگر هم برای کل فصل رشد و هم برای شرایط قدرت تبخیرکنندگی کم و زیاد اتمسفر، بهترین برآورد را داشته است درحالی‌که روش ماکینک نامناسبترین روش برای منطقه معرفی گردید (بختیاری و همکاران ۲۰۱۱). مقایسه روش پنمن-مانتیتش و هارگریوز برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع در شرایط وجود اطلاعات اقلیمی نادقیق، نشان داد که این دو روش مطابقت قابل قبولی با هم دارند. در این پژوهش اصلاح روش هارگریوز با استفاده از اطلاعات بارش، تبخیر-تعرق برآورد شده را برای شرایط آب و هوایی خشک به‌طور معنی‌داری بهبود بخشید همچنین ثابت شد که روش پنمن-مانتیتش روش قابل توصیه برای شرایطی است که اطلاعات اقلیمی دقیق وجود دارد و در شرایط وجود اطلاعات نادقیق روش اصلاح شده‌ی هارگریوز توصیه می‌شود (دروگوز و آلن ۲۰۰۲). برای معرفی روش استاندارد برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع در کانادا، سه مدل برآورد تبخیر-تعرق مرجع مبتنی بر دما، رطوبت و رطوبت و سرعت باد با سه روش بایر-رابرتسون، هارگریوز و لینکر مقایسه شد در مورد روش‌های مبتنی بر دما، مدل وابسته به دما و روش هارگریوز مطابقت بیشتری با مقادیر اندازه‌گیری شده داشتند. مدل وابسته به رطوبت برآوردهای مدل وابسته به دما را بهبود بخشید. روش لینکر و بایر-رابرتسون نتایج درستی ندادند و برای منطقه توصیه نشدند (مأول و همکاران ۲۰۰۶). در تانزانیا دو روش مبتنی بر دما یعنی هارگریوز و جنسن-هیز در مقابل روش پنمن-مانتیتش به‌عنوان شاهد مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که تبخیر-تعرق مرجع روزانه برآورد شده توسط روش‌های هارگریوز و جنسن-هیز به‌طور معنی‌داری با روش پنمن مانیتیتش اختلاف دارد (ایگبادون

و همکاران ۲۰۰۶). در پژوهشی در صربستان شش مدل پریستلی-تیلور، تورک، ماکینگ، هارگریوز-سامانی، کوپایس و هارگریوز اصلاح شده برای منطقه با مدل پنمن-مانتیتش مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل‌های پریستلی-تیلور و کوپایس برآورد نزدیک‌تری را به روش پنمن-مانتیتش داشتند (الکساندریس و همکاران ۲۰۰۸). نتایج به‌دست آمده در پژوهشی برای مقایسه چهار روش تجربی نشان داد که روش تورک برای شرایط آب و هوایی سرد و مرطوب و سرد و خشک و روش هارگریوز هم برای شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب و گرم و نیمه‌خشک ایران مناسبترین روش است. در کل برای تمامی شرایط آب و هوایی، روش‌های ماکینگ و پریستلی-تیلور در مقابل روش‌های تورک و هارگریوز از صحت کمتری برخوردار بودند (طبری ۲۰۰۹). در پژوهشی در جنوب ایتالیا روش‌های فائو-پنمن-مانتیتش (آلن و همکاران ۱۹۹۸)، پنمن FAO ۲۴، بلینی-کریدل FAO ۲۴، تابشی FAO ۲۴، روش تشت تبخیر FAO ۲۴، پریستلی-تیلور و هارگریوز برای برآورد تبخیر-تعرق روزانه مورد مقایسه قرار گرفتند که روش‌های فائو-پنمن-مانتیتش و روش تشت تبخیر بهترین برآورد را در بین روش‌ها داشتند (تراجکوویچ و گوجیچ ۲۰۱۰). در کشور کنیا که اطلاعات هواشناسی کم و محدود است سه روش برآورد تبخیر-تعرق که تنها از داده‌های درجه حرارت هوا استفاده می‌کنند یعنی هارگریوز، تورنتوایت و بلینی-کریدل در مقابل روش فائو-پنمن-مانتیتش به‌عنوان مرجع مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاکی از برتری روش هارگریوز در این مطالعه بود (مائده و همکاران ۲۰۱۱).

مطالعات متعددی نیز برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق مرجع در کشورمان صورت پذیرفته و بر حسب شرایط آب و هوایی و طول مدت زمان اندازه‌گیری، مقادیر متفاوتی از ۲۸۶/۳ (صارمی ۱۳۷۳) تا ۱۵۷۳ (شریعتی ۱۳۷۲) میلی‌متر بدست آمده است.

به‌علت قابل دسترس بودن اطلاعات هواشناسی، روش‌های تجربی برآورد تبخیر-تعرق نسبت به روش‌های مستقیم کم هزینه‌تر بوده و کاربرد بیشتری دارند.

با این شرایط، لایسیمتر به شکل استوانه‌ای به شعاع و ارتفاع ۱/۵ متر با کف مخروطی شیب‌دار و یک خروجی با قطر ۳۸ میلی‌متر برای خارج کردن آب حاصل از زهکشی ساخته شد. جاگذاری لایسیمتر مطابق استاندارد FAO (ابوخاله و همکاران ۱۹۸۲) انجام گرفت. قبل از کاشت چمن، به منظور مدیریت مناسب آبی و کودی، نمونه‌های خاک از لایه‌های مختلف نیم‌رخ خاک در داخل و خارج لایسیمتر تهیه و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آنها تعیین گردید. بذر چمن رقم باربال (نام تجاری است و مخلوطی است از ۴۰٪ *Lolium prene*، ۲۰٪ *Agrostis tenuis* و ۲۰٪ *Poa pratensis*) با تراکم ۲۵ گرم در متر مربع (شجاع رضوی ۱۳۶۲) کاشته شد. برای جلوگیری از تنش رطوبتی و نگه‌داشتن رطوبت خاک داخل لایسیمتر نزدیک به حد گنجایش مزرعه‌ای (۲۶/۷۸ درصد حجمی در لایه سطحی)، دو عدد تانسیموتر در اعماق ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری خاک قرار گرفت و زمانی‌که در یکی از تانسیموترها مکش خاک به ۰/۳ بار (با توجه به بافت نسبتاً سبک خاک داخل لایسیمتر، ۰/۲ بار به‌عنوان مکش مربوط به رطوبت گنجایش مزرعه‌ای در نظر گرفته شد) رسید، آبیاری انجام گرفت. در طول فصل رشد، مراقبت‌های لازم برای مطابقت چمن کاشته شده با تعریف ارائه شده برای تبخیر-تعرق مرجع (عنابی میلانی ۱۳۷۶، سننلهاس و فولگاتی ۲۰۰۳) صورت گرفت. در اواخر دوره رشد هر ساله، کودهای فسفره و پتاسیمی به‌ترتیب از منابع سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار مصرف گردید. کود نیتروژن به مقدار ۲۵ کیلوگرم ازت خالص در هکتار در هر ماه از منبع سولفات آمونیم مصرف شد. آماربرداری و اندازه‌گیری‌ها از فروردین ماه سال ۱۳۸۲ آغاز گردید و پارامترهای لازم در فرمول بیلان رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده و میزان آب مصرفی در دوره‌های ده روزه و ماهانه تعیین شد. فرمول بیلان آبی خاک به‌صورت زیر می‌باشد:

$$ET_o = P + I - D + \Delta SW \quad [1]$$

که در آن P مقدار نزولات آسمانی (میلی‌متر)، I مقدار

اما بایستی دقت و صحت آنها در مقابل روش‌های دقیق اندازه‌گیری تبخیر-تعرق مانند لایسیمتر (بنی حبیب و همکاران ۲۰۱۲، شرادر و همکاران ۲۰۱۳، سو و چن ۲۰۰۵) بررسی گردد. بر این اساس FAO روش فائو-پنمن-مانتیت (آلن و همکاران ۱۹۹۸) را به‌عنوان روش استاندارد برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع ارائه نمود. این روش برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع به پارامترهای زیادی نیاز دارد درحالی‌که در بیشتر مناطق اطلاعات هواشناسی محدود هستند و روش پنمن-مانتیت کارآمدی مناسبی برای این مناطق ندارد. به‌همین منظور پژوهش حاضر با هدف تعیین دقیق تبخیر-تعرق مرجع برای دشت تبریز به‌همراه تعیین بهترین روش تجربی برآورد تبخیر-تعرق مرجع و ارائه مدلی برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع از روی داده‌های هواشناسی برای شرایط منطقه به مرحله اجرا درآمد.

#### مواد و روش‌ها

این پژوهش به مدت پنج سال (۱۳۸۱-۱۳۸۵) در دشت تبریز و در ایستگاه تحقیقات کشاورزی خسروشاه (طول جغرافیائی "۳۹°۰۲'، ۴۶° عرض جغرافیائی "۴۲'۵۸'، ۳۷°) به‌مرحله اجرا در آمد. دشت تبریز با زمستان سرد و تابستان گرم و متوسط ۲۶۷ میلی‌متر بارندگی سالانه، از نظر تقسیم‌بندی آب و هوایی در ناحیه نیمه‌خشک واقع شده است. متوسط ۳۰ ساله درجه حرارت سردترین و گرم‌ترین ماه سال به-ترتیب ۱/۴- و ۲۶/۲ درجه سلسیوس می‌باشد.

برای اجرای پژوهش ابتدا زمینی دایره‌ای شکل به شعاع ۳۰ متر (مساحت تقریبی ۲۸۰۰ مترمربع) که در اطراف آن تا شعاع ۵۰۰ متری هیچ‌گونه مانعی نبود، در نظر گرفته شده و در وسط آن یک لایسیمتر زهکش‌دار بدون سطح ایستابی از نوع تعادل آبی و با سطح مقطع دایره کار گذاشته شد.

برای دقت بیشتر، سطح لایسیمتر تا حد امکان بزرگتر انتخاب شد و همچنین برای جلوگیری از ایجاد خرداقلیم در گوشه‌های لایسیمتر سطح مقطع آن دایره‌ای ساخته شد تا تمام قسمت‌های داخل لایسیمتر به یک میزان تحت شرایط آب و هوایی منطقه قرار گیرد.

سومین روش مورد ارزیابی برای منطقه روش تابشی ماکینک (اصلاح شده توسط FAO) بود که رابطه آن به صورت زیر است (دورنباس و پروت ۱۹۷۷):

$$ET_o = c \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] R_s \quad [۴]$$

که در آن  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس)،  $\gamma$  ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس)،  $R_s$  شدت تابش خورشیدی (میلی متر بر روز) و  $c$  ضریب تصحیح می باشد که به کمینه رطوبت نسبی هوا و سرعت باد روزانه بستگی داشته و از روی شیب منحنی  $ET_o$  در مقابل  $R_s$  [  $\Delta / (\Delta + \gamma)$  ] به دست می آید.

رابطه بعدی معادله پنمن می باشد که به شکل زیر است:

$$ET_o = c \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left\{ \frac{Rn}{\lambda} \right\} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 2.7f(u)f(e) \right] \quad [۵]$$

که در آن  $Rn$  تابش خالص در سطح گیاه (مگاژول بر متر مربع در روز)،  $f(u)$  تابع باد،  $f(e)$  تابع فشار بخار،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر (مگاژول بر کیلوگرم) و  $c$  ضریب تصحیح می باشد.

روش دیگری که امروزه به عنوان روش مرجع توسط FAO ارائه شده و به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد، روش فائو- پنمن- مانیتث (آلن و همکاران ۱۹۹۸) می باشد که به صورت زیر ارائه شده است:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad [۶]$$

که در آن  $G$  جریان گرمای خاک (مگاژول بر متر مربع بر روز)،  $T$  دمای هوا در ارتفاع دو متری (درجه سلسیوس)،  $u_2$  سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)،  $e_s$  فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)،  $e_a$  فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)،  $e_s - e_a$  کمبود فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال) می باشد.

آخرین روش مورد استفاده برای مقایسه، روش استفاده از تشت تبخیر کلاس A با ضریب تشت ارائه

آب آبیاری (میلی متر)،  $D$  مقدار آب زهکشی (میلی متر) و  $\Delta SW$  تغییرات رطوبت خاک (میلی متر) در هر دوره می باشد.

علاوه بر آن در هر دوره میزان تبخیر از تشت کلاس A و پارمترهای مورد نیاز در روابط تجربی مورد مطالعه شامل بلینی- کریدل تعدیل شده توسط FAO (بلینی- کریدل)، هارگریوز- سامانی (هارگریوز)، روش تشعشعی FAO (ماکینک)، پنمن تعدیل شده توسط FAO (پنمن)، پنمن- مانیتث FAO (پنمن- مانیتث) و روش تشت تبخیر FAO با ضریب تشت ارائه شده توسط آلن و همکاران (تشت تبخیر) نیز اندازه گیری و میزان تبخیر- تعرق توسط این روابط تجربی تعیین گردید. در هر دوره تبخیر- تعرق به دست آمده از روش مستقیم لایسیمتر و غیرمستقیم (روابط تجربی موجود) با هم مقایسه گردید و همچنین ضرایب تشت تبخیر کلاس A از روی تبخیر- تعرق مرجع به دست آمده از لایسیمتر تعیین و با ضرایب ارائه شده توسط FAO مقایسه شد.

اولین روش مورد استفاده برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع روش بلینی- کریدل FAO بود که رابطه آن به صورت زیر می باشد (دورنباس و پروت ۱۹۷۷):

$$ET_o = a + b[p(0.46t + 8.13)] \quad [۲]$$

که در آن  $a$  و  $b$  ضرایب ثابت هستند و به کمینه رطوبت نسبی هوا، ساعات آفتابی و سرعت روزانه باد بستگی داشته و از طریق واسنجی به دست می آیند،  $p$  نسبت متوسط ساعات روز در ماه مورد نظر به کل ساعات روز در سال (درصد) و  $t$  متوسط دمای روزانه برای ماه مورد نظر (درجه سلسیوس) می باشد.

روش بعدی روش هارگریوز بود که معادله ارائه شده آن توسط آلن و همکاران (۱۹۹۸) به صورت زیر می باشد:

$$ET_o = 0.0023(T_{max} - T_{min})^{0.5} (T_{mean} + 17.8) Ra \quad [۳]$$

که در آن  $T_{max}$ ،  $T_{min}$  و  $T_{mean}$  به ترتیب بیشینه، کمینه و متوسط روزانه دمای هوا (درجه سلسیوس) و  $Ra$  تابش ماوراء اتمسفری (میلی متر بر روز) می باشد.

$$MAXE = MAX(|O_i - E_i|)_{i=1}^n \quad [11]$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [12]$$

در این روابط  $O_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده،  $E_i$  مقادیر برآورد شده با استفاده از روش‌های تجربی،  $\bar{O}$  متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده برای  $ET_o$  و  $n$  تعداد اندازه‌گیری‌ها می‌باشند. حد شاخص‌های توافق و کفایت بین صفر و یک بوده و هر قدر به یک نزدیکتر باشد نشان‌گر توانمندی روش مورد نظر در برآورد تبخیر-تغرق می‌باشد. بالا بودن شاخص‌های خطای مطلق متوسط و بیشینه نیز نشان‌دهنده خطای بیشتر و عدم توانمندی روش مورد انتخاب برای برآورد تبخیر-تغرق است.

### نتایج و بحث

بعد از ادغام نتایج سال‌های مختلف، نسبت به تجزیه و تحلیل مجموع داده‌های به‌دست آمده در این چهار سال (۱۳۸۲-۱۳۸۵) اقدام گردید. متوسط چهار ساله تبخیر-تغرق مرجع اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و برآورد شده بوسیله‌ی برخی روابط تجربی، تبخیر از تشتت کلاس A و ضریب تشتت تبخیر کلاس A به‌صورت ماهانه در جدول ۱ نشان داده شده است. کل میزان تبخیر-تغرق مرجع (میانگین ۴ سال) در طول فصل رشد چمن از اول فروردین تا آخر آذر، ۱۲۲۶/۹ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید، درحالی‌که روش‌های برآورد تبخیر-تغرق مرجع شامل بلینی-کریدل، هارگریوز، ماکینک، پنمن-پنمن، مانتیت و تشتت تبخیر با ضریب تشتت به‌دست آمده از رابطه ارائه شده توسط آلن و همکاران (۱۹۹۸) آن را به‌ترتیب ۱۴۵۱/۴، ۱۰۶۲/۷، ۱۳۵۰/۳، ۱۶۰۶/۱ و ۱۲۳۷/۷ و ۱۰۳۲/۵ میلی‌متر برآورد کردند (جدول ۱). از میان روابط برآورد کننده تبخیر-تغرق مرجع، روش پنمن-مانتیت با ۱۰/۸ میلی‌متر، کمترین و روش پنمن با ۳۷۹/۲ میلی‌متر بیشترین اختلاف را با مقدار اندازه‌گیری شده داشت. از این نظر بعد از روش پنمن-مانتیت به‌ترتیب روش‌های ماکینک، هارگریوز، تشتت تبخیر، بلینی-کریدل و پنمن در

شده توسط آلن و همکاران در نشریه فائو ۵۶ (آلن و همکاران ۱۹۹۸) می‌باشد که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Kp = 0.61 + 0.00341RH_{mean} - \quad [7]$$

$$0.000162U_2RH_{mean} - 0.00000959U_2FET + 0.00327U_2\ln(FET) - 0.00289U_2\ln(86.4U_2) - 0.0106\ln(86.4U_2)\ln(FET) + 0.00063[\ln(FET)]^2\ln(86.4U_2)$$

که در آن  $Kp$  ضریب تشتت تبخیر،  $RH_{mean}$  رطوبت نسبی متوسط بر حسب درصد،  $U_2$  سرعت باد در ارتفاع دو متری بر حسب متر بر ثانیه و  $FET$  فاصله پوشش گیاهی اطراف تشتت در جهت باد بر حسب متر می‌باشد (آلن و همکاران ۱۹۹۸).

بعد از محاسبه ضریب تشتت از رابطه ۷، مقدار تبخیر-تغرق مرجع از رابطه زیر به‌دست آمد:

$$ET_o = Kp Ep \quad [8]$$

که در آن  $ET_o$  تبخیر-تغرق مرجع (میلی‌متر بر روز)،  $Kp$  ضریب تشتت تبخیر کلاس A و  $Ep$  تبخیر از تشتت تبخیر کلاس A (میلی‌متر بر روز) می‌باشد.

برای مقایسه نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری تبخیر-تغرق مرجع بوسیله لایسیمتر و برآورد آن توسط روابط تجربی اشاره شده و ارزیابی کارآمدی روش‌های برآورد تبخیر-تغرق مرجع، علاوه بر ضریب همبستگی، از بعضی شاخص‌های آماری دیگر نظیر شاخص توافق<sup>۱</sup> ( $D$ )، خطای مطلق متوسط<sup>۲</sup> ( $MAE$ )، خطای مطلق بیشینه<sup>۳</sup> ( $MAXE$ ) و شاخص کفایت<sup>۴</sup> ( $EF$ ) نیز استفاده گردید که هر یک به شکل زیر تعریف می‌شوند (سنتلهاس و فولگاتی ۲۰۰۳):

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad [9]$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - E_i| \quad [10]$$

<sup>1</sup> Agreement index

<sup>2</sup> Mean absolute error

<sup>3</sup> Maximum absolute error

<sup>4</sup> Efficiency

از این روش‌ها برای شرایط اقلیمی معینی ارائه شده‌اند و برای قدرت‌های متفاوت تبخیرکنندگی اتمسفر پاسخ مختلفی می‌دهند. از این رو هر یک از این روش‌ها برای قدرت تبخیرکنندگی مختلف اتمسفر ذیلا مورد بحث قرار می‌گیرند.

رتبه‌های بعدی قرار گرفتند (جدول ۱). برآورد روش-های هارگریوز و تشت تبخیر کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده بوده و بقیه روش‌ها بیش‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد کردند (جدول ۱). علت این اختلافات در برآورد تبخیر- تعرق در تفاوت در شرایط آب و هوایی مربوط به خاستگاه این روش‌ها می‌باشد؛ چراکه هر یک

جدول ۱- مقادیر ماهانه تبخیر- تعرق مرجع، تبخیر از تشت کلاس A و ضریب تشت تبخیر.

ماه	تبخیر- تعرق مرجع $ET_0$ در روشهای مختلف ( $\text{mm d}^{-1}$ )							تبخیر	ضریب تشت
	لاسیمتر	بلینی- کریدل	هارگریوز	ماکینک	پنمن	پنمن-مانتیث	تشت تبخیر		
فروردین	۲/۴۵	۳/۰۳	۲/۸۴	۳/۴۱	۴/۲۴	۳/۲۰	۱/۹۸	۳/۴۸	۰/۷۰
اردیبهشت	۳/۶۱	۴/۷۸	۴/۱۰	۵/۱۲	۵/۹۶	۴/۴۴	۳/۲۱	۵/۸۱	۰/۶۲
خرداد	۶/۲۸	۷/۳۹	۵/۵۴	۷/۳۴	۸/۶۱	۶/۲۲	۵/۳۴	۱۰/۱۱	۰/۶۲
متوسط بهار	۴/۱۱	۵/۰۷	۴/۱۶	۵/۲۹	۶/۲۷	۴/۶۲	۳/۵۱	۶/۴۷	۰/۶۴
تیر	۸/۳۷	۹/۰۱	۶/۱۱	۸/۰۱	۹/۷۸	۷/۳۶	۶/۸۳	۱۳/۳۰	۰/۶۳
مرداد	۸/۷۶	۹/۰۰	۵/۸۹	۷/۶۵	۹/۳۷	۷/۳۱	۶/۹۹	۱۳/۸۷	۰/۶۳
شهریور	۵/۵۶	۷/۰۰	۴/۶۳	۶/۰۷	۶/۸۹	۵/۵۵	۴/۹۷	۹/۳۵	۰/۶۰
متوسط تابستان	۷/۵۶	۸/۳۴	۵/۵۴	۷/۲۴	۸/۶۸	۶/۷۴	۶/۲۷	۱۲/۱۷	۰/۶۲
مهر	۳/۲۵	۴/۴۲	۳/۰۵	۳/۷۱	۴/۲۴	۳/۵۲	۲/۸۲	۵/۰۷	۰/۶۴
آبان	۱/۲۴	۱/۹۵	۱/۵۷	۱/۷۹	۲/۰۳	۱/۷۴	۱/۱۵	۱/۸۵	۰/۶۶
آذر	۰/۲۰	۰/۴۶	۰/۷۲	۰/۶۶	۰/۹۳	۰/۷۸	۰/۱۴	۰/۲۱	۰/۹۸
متوسط پائیز	۱/۵۶	۲/۲۸	۱/۷۸	۲/۰۵	۲/۴۰	۲/۰۱	۱/۳۷	۲/۲۸	۰/۶۵
جمع (mm)	۱۲۲۶/۹	۱۴۵۱/۴	۱۰۶۲/۷	۱۳۵۰/۳	۱۶۰۶/۱	۱۲۳۷/۷	۱۰۲۲/۵	۱۹۴۷/۳	
میانگین	۴/۴۵	۵/۲۶	۳/۸۵	۴/۸۹	۵/۸۲	۴/۴۸	۳/۷۴	۷/۰۶	۰/۶۳

خوبی تبخیر- تعرق مرجع را برآورد نمود. در تبخیر- تعرق‌های بسیار بالا (۱۰-۸ میلی‌متر در روز) روش‌های بلینی- کریدل و ماکینک برآوردهای نزدیک‌تری داشتند. برای معرفی مناسبترین روش برآورد تبخیر- تعرق مرجع برای منطقه ضریب همبستگی بین روش‌های مختلف و لایسیمتر مورد ارزیابی قرار گرفت. بیشترین ضریب همبستگی بین روش‌های برآورد تبخیر- تعرق و لایسیمتر از روش تشت تبخیر به دست آمد و از این نظر روش‌های بلینی- کریدل، پنمن-مانتیث، پنمن، ماکینک و هارگریوز در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

در روش بلینی- کریدل هر چند که همبستگی خوبی با لایسیمتر دیده می‌شود ولی در کل در تمامی مراحل، تبخیر- تعرق برآورد شده بیشتر از لایسیمتر

با توجه به نتایج ماهانه و دهروزه (ارائه نشده است) مشخص می‌شود که در تبخیر- تعرق‌های کم، بعضی از روش‌های برآورد تبخیر- تعرق، اختلاف کمتری با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند در حالی که در تبخیر- تعرق‌های زیاد برخی دیگر برتری می‌یابند، به همین خاطر اختلاف بین مقادیر برآورد شده توسط روش‌های مختلف و اندازه‌گیری شده در محدوده‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفت. در تبخیر- تعرق‌های خیلی کم (۲-۰ میلی‌متر در روز)، روش تشت تبخیر تنها روشی است که برآورد نزدیک‌تری با لایسیمتر داشت. در تبخیر- تعرق‌های ۲-۴ میلی‌متر در روز، روش هارگریوز نسبت به روش‌های دیگر برآورد بهتری نشان داد. در تبخیر- تعرق‌های متوسط به بالا (۸-۴ میلی‌متر در روز) روش پنمن-مانتیث به‌طور بسیار

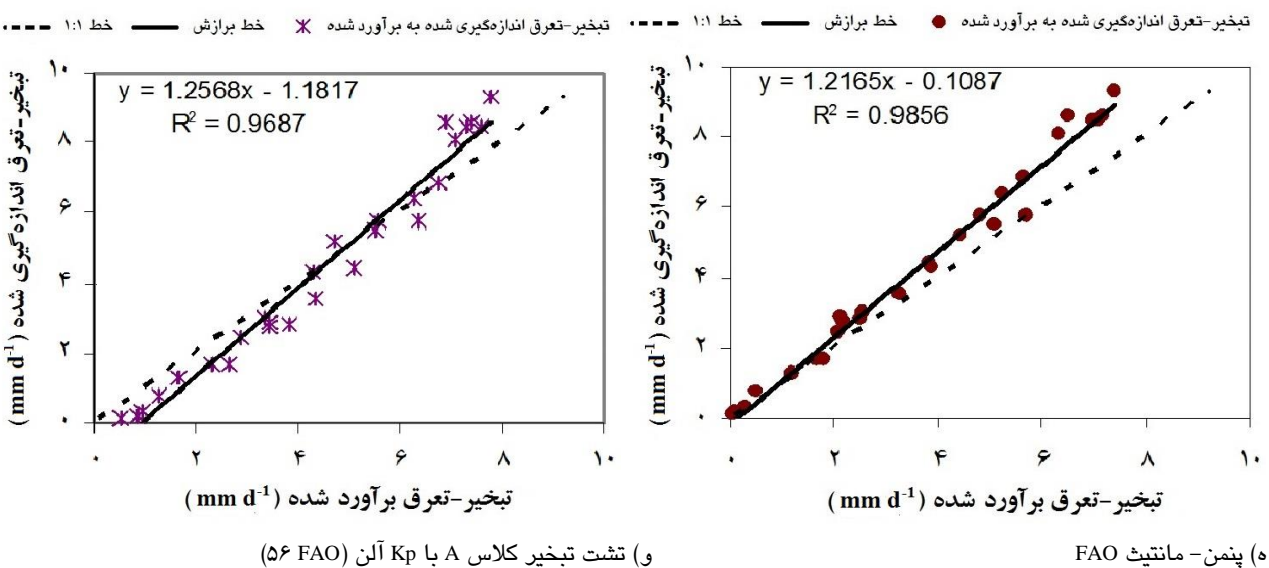
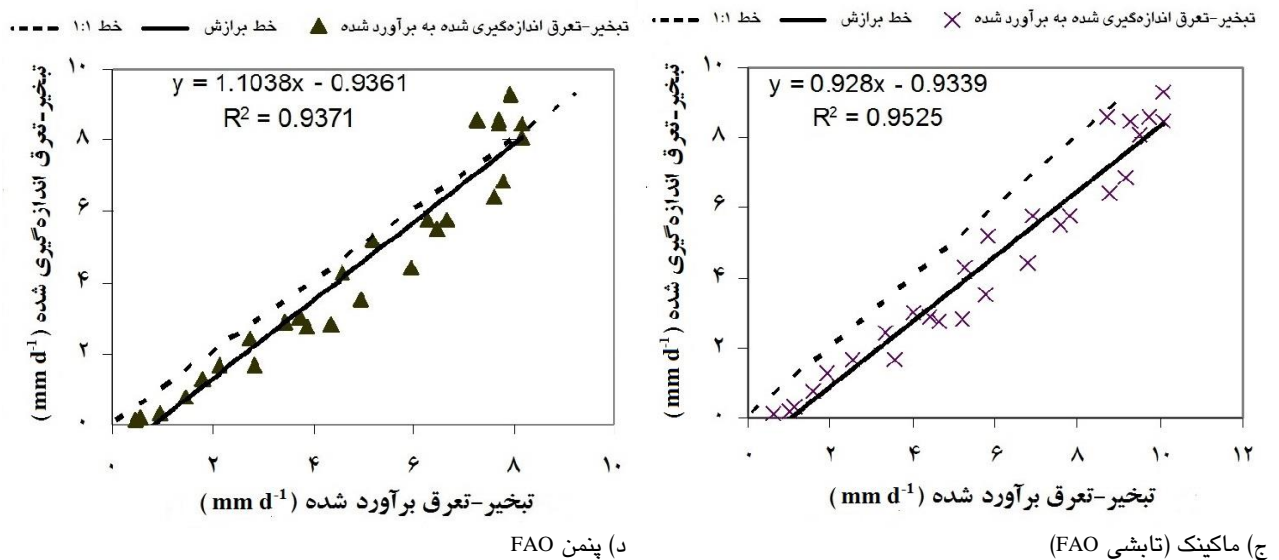
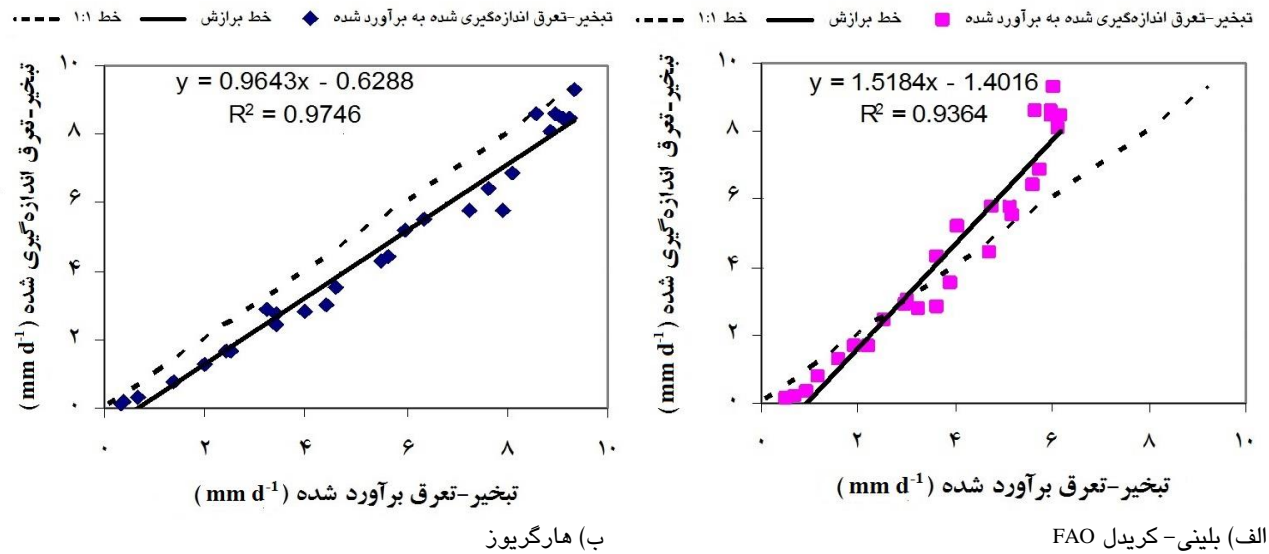
بود که این بیشتر بودن در تبخیر- تعرق‌های کم بیشتر از تبخیر- تعرق‌های زیاد است. یعنی با افزایش دما و بالا رفتن تبخیر- تعرق، روش بلینی- کریدل برآورد خوبی داشت به طوری که در شدت‌های تبخیر- تعرق زیاد (۸-۱۰ میلی‌متر در روز) کمترین خطا را در بین روش‌های برآورد داشت. بالا بودن ضریب همبستگی نشان‌دهنده این است که روند تغییرات تبخیر- تعرق مرجع در طول فصل به خوبی توسط این روش قابل برآورد است. منحنی یک به یک رسم شده (شکل ۱-الف) نیز نشان می‌دهد که در تمامی مراحل، تبخیر- تعرق برآورد شده توسط رابطه بلینی- کریدل بیشتر از لایسیمتر است. این نتایج با یافته‌های امداد و صباغ فرشی (۱۳۷۹) مغایرت دارد که به نظر می‌رسد علت امر اختلاف در شرایط آب و هوایی به‌ویژه رطوبت نسبی هوا، سرعت باد روزانه و ساعات آفتابی دو منطقه باشد چراکه ضرایب مدل بلینی- کریدل شدیداً به این پارامترها وابسته است. همچنین در پژوهش لایسیمتری انجام شده در کرمان نیز مقدار تبخیر- تعرق برآورد شده توسط روش بلینی- کریدل کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده بود (بختیاری و همکاران ۲۰۱۱). در پژوهشی در سویس مقایسه روش بلینی- کریدل با روش پنمن-مانتیث نشان داد که این دو روش هم‌خوانی خوبی باهم دارند و مقدار تبخیر- تعرق برآورد شده توسط روش بلینی- کریدل اندکی کمتر از روش پنمن-مانتیث است (سو و سینگ ۲۰۰۲).

روش هارگریوز کمترین ضریب همبستگی را با لایسیمتر داشت ولی در مقاطعی از فصل برآورد خوبی به‌دست داد. در ماه‌های معتدل روش هارگریوز برآورد نزدیکتری به لایسیمتر داشت و کم بودن نسبی اختلاف این روش در محدوده تبخیر- تعرق ۲-۶ میلی‌متر در روز، حاکی از این مطلب است. در تبخیر- تعرق‌های خیلی کم، این روش، برآورد بیشتر از مقدار واقعی و در تبخیر- تعرق‌های زیاد کمتر از مقدار واقعی داشت (شکل ۱-ب) که نتایج به‌دست آمده توسط سو و سینگ

(۲۰۰۲) را تأیید می‌کند. احتشامی و همکاران (۱۳۷۸) نیز نتیجه‌ای کمابیش یکسان را در اصفهان به‌دست آوردند. در مطالعه آنها نیز روش هارگریوز در ماه‌های گرم سال برآورد کمتری نسبت به لایسیمتر داشت. در پژوهش بختیاری و همکاران (۲۰۱۱) نیز روش هارگریوز- سامانی نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر برآورد کمتری را نشان داد. د سوزا لیما و همکاران (۲۰۱۳) نیز در شرایط نیمه‌مرطوب برزیل به این نتیجه رسیدند که روش هارگریوز- سامانی مقدار تبخیر تعرق مرجع را به‌ویژه در ماه‌هایی که قدرت تبخیرکنندگی اتمسفر پایین است (می تا جولای)، بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند که از این نظر هم‌خوانی خوبی با نتایج پژوهش حاضر دارد. در پژوهشی دیگر در شرایط گرم و مرطوب هندوستان نیز روش هارگریوز مقدار تبخیر- تعرق مرجع را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرد با این تفاوت که برعکس نتایج پژوهش حاضر و پژوهش د سوزا لیما و همکاران (۲۰۱۳)، با افزایش قدرت تبخیرکنندگی اتمسفر این برآورد بیشتر از مقدار واقعی، افزایش یافت (سابورایان و همکاران ۲۰۱۱). در شرایط ساحلی کشور سنگال نیز روش هارگریوز مقدار تبخیر- تعرق مرجع را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده بود (جمن و همکاران ۲۰۱۵). بعد از روش پنمن که قابل پیش‌بینی بود (خاستگاه یکسان با روش پنمن-مانتیث)، روش هارگریوز بیشترین همبستگی را با روش پنمن-مانتیث داشت که این مسئله توسط دروگرز و آلن (۲۰۰۲) و مائده و همکاران (۲۰۱۱) نیز ثابت شده است.

روش هارگریوز کمترین ضریب همبستگی را با لایسیمتر داشت ولی در مقاطعی از فصل برآورد خوبی به‌دست داد. در ماه‌های معتدل روش هارگریوز برآورد نزدیکتری به لایسیمتر داشت و کم بودن نسبی اختلاف این روش در محدوده تبخیر- تعرق ۲-۶ میلی‌متر در روز، حاکی از این مطلب است. در تبخیر- تعرق‌های خیلی کم، این روش، برآورد بیشتر از مقدار واقعی و در تبخیر- تعرق‌های زیاد کمتر از مقدار واقعی داشت (شکل ۱-ب) که نتایج به‌دست آمده توسط سو و سینگ





شکل ۱ - مقایسه‌ی نتایج تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده و برآورد شده با برخی از روابط تجربی در منحنی ۱:۱

تبخیر- تعرق برآورد شده در تمام مقاطع زمانی از مقدار اندازه‌گیری شده بیشتر بود. منحنی یک به یک روش پنمن با لایسیمتر (شکل ۱-د) نشان‌گر بالا بودن تبخیر- تعرق برآورد شده نسبت به اندازه‌گیری شده می‌باشد ولی این برآورد بیشتر از مقدار واقعی، تقریباً در تمامی شدت‌ها یکسان است به طوری که شیب هر دو منحنی مانند روش بلینی- کریدل تقریباً مساوی است و تنها تفاوتی که دو روش پنمن و بلینی- کریدل دارند اینست که فاصله‌ی منحنی برآورد با منحنی اندازه‌گیری در روش پنمن بیشتر از روش بلینی- کریدل است و این نشان می‌دهد که روش پنمن نسبت به روش بلینی- کریدل خطای بیشتری دارد. در کل روش پنمن نیز مانند روش بلینی- کریدل در شدت‌های بالای تبخیر- تعرق برآورد نزدیکتری به لایسیمتر دارد و خطای آن در تبخیر- تعرق‌های ۱۰-۸ میلی‌متر در روز کاهش می‌یابد. بیشترین همبستگی روش پنمن با روش پنمن-مانتیت دیده شد که نشانگر قرابت این دو روش است. FAO در نشریه‌ی شماره‌ی ۵۶ (آلن و همکاران ۱۹۹۸) به این مسئله اذعان دارد که روش پنمن تبخیر- تعرق را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند و حتی دلیل ارائه‌ی روش پنمن-مانتیت در این نشریه نیز برآورد بیشتر از مقدار واقعی روش پنمن بوده است. احتشامی و همکاران (۱۳۷۸) نیز در اصفهان نتیجه‌ی مشابهی را در مورد روش پنمن بدست آوردند. اما بختیاری و همکاران (۲۰۱۱) در کرمان نتایج متفاوتی بدست آوردند. در پژوهش آنها روش پنمن-کیمبرلی مقدار تبخیر-تعرق مرجع را کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر برآورد کرد.

روش پنمن-مانتیت از ضریب همبستگی خوبی با لایسیمتر برخوردار بود. این روش برآورد بسیار خوبی در محدوده‌ی تبخیر-تعرق متوسط داشت. نسبت تبخیر-تعرق مرجع اندازه‌گیری شده به تابش خالص از اوایل خرداد تا اواخر مهر بیشتر از واحد بود که نشانگر وجود پدیده‌ی پهنرفت (انتقال گرما از مناطق گرم مجاور بصورت توده‌ای) در منطقه در ماه‌های مذکور است و این عامل باعث می‌شود که مقدار تبخیر-تعرق

روش ماکینک هم مانند روش هارگریوز نسبت به بقیه روش‌ها از همبستگی کمتری با لایسیمتر برخوردار بود (شکل ۱-ج) ولی در تبخیر-تعرق‌های زیاد (۱۰-۸ میلی‌متر در روز) نسبتاً خطای کمتری داشت. منحنی یک به یک این روش با لایسیمتر نشان می‌دهد که در تبخیر-تعرق‌های کمتر، روش ماکینک به مراتب بیشتر از لایسیمتر تبخیر-تعرق را برآورد می‌کند ولی با افزایش شدت تبخیر-تعرق این برآورد غیرواقعی کمتر شده و در تبخیر-تعرق‌های زیاد دو منحنی بر روی هم منطبق می‌شوند (شکل ۱-ج). امداد و صباغ فرشی (۱۳۷۹) در استان گلستان نتایج متفاوتی را به دست آوردند به طوری که با افزایش قدرت تبخیرکنندگی اتمسفر، برآورد روش ماکینک در پژوهش آنها خطای بیشتری نشان داد. سو و سینگ (۲۰۰۲) در سوئیس با مقایسه روش ماکینک با پنمن-مانتیت به این نتیجه رسیدند که در تبخیر-تعرق‌های کمتر از ۴ میلی‌متر بر روز مقدار تبخیر-تعرق برآورد شده توسط روش ماکینک بیشتر از پنمن-مانتیت است ولی در تبخیر-تعرق‌های بیشتر از آن روند عکس می‌شود. جمن و همکاران (۲۰۱۵) نیز در شرایط ساحلی سنگال به این نتیجه رسیدند که روش ماکینک مقدار تبخیر-تعرق مرجع را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند که به نظر می‌رسد علت اختلاف نتایج دو پژوهش اخیر با نتایج پژوهش حاضر وجود شرایط ساحلی در آنها و عدم تطابق آن با شرایط پژوهش حاضر است. در پژوهش بختیاری و همکاران (۲۰۱۱)، روش تابشی FAO (در پژوهش حاضر با نام ماکینک آورده شده است) بیشترین همبستگی را با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر هم برای شرایط قدرت تبخیرکنندگی بالا و هم پایین داشت. با این حال تا تبخیر-تعرق‌های کمتر از ۵ میلی‌متر در روز این روش مقدار تبخیر-تعرق را بیشتر از لایسیمتر و در شرایط قدرت تبخیرکنندگی بیشتر از آن کمتر از لایسیمتر برآورد کرده بود درحالی که در پژوهش حاضر این حد تبخیر-تعرق ۹ میلی‌متر در روز بود (شکل ۱-ج).

در روش پنمن مانند روش بلینی-کریدل مقدار

(۱۳۷۹) در گرگان نتیجه‌ی متفاوتی از آنچه در این آزمایش بدست آمده گرفتند. در بررسی آنها روش تشت در تبخیر- تعرق‌های پائین کمتر از لایسیمتر، در تبخیر- تعرق‌های متوسط نزدیک لایسیمتر و در تبخیر- تعرق‌های بالا بیشتر از لایسیمتر برآورد داشت. اما تراککوویچ و گوجیچ (۲۰۱۰) نتیجه گرفتند که روش تشت تبخیر همبستگی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد و با دقت قابل قبولی توانائی برآورد تبخیر- تعرق مرجع را دارد که با نتایج ما هم‌خوانی بیشتری دارد.

**روابط بین پارامترهای جوی و روابط تجربی مورد استفاده:** هر یک از روش‌های تجربی از بعضی از پارامترهای جوی برای محاسبه تبخیر- تعرق استفاده می‌کنند. بعضی از آنها مانند روش پنمن و پنمن-مانتیت از پارامترهای زیادی بهره می‌برند و برخی دیگر مانند بلینی- کریدل و هارگریوز بسیار ساده هستند. برای یافتن ارتباط بین پارامترهای جوی مورد استفاده در روش‌های فوق با تبخیر- تعرق برآورد شده در هر روش و اینکه در دشت تبریز کدامیک از پارامترهای جوی در برآورد تبخیر- تعرق توسط هر روش نقش مؤثرتری دارند، مبادرت به تعیین روابط رگرسیونی بین پارامترهای جوی و تبخیر- تعرق برآورد شده در هر روش از طریق رگرسیون خطی گام‌به‌گام گردید که نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

اندازه‌گیری شده در ماه‌های فوق بیشتر از مقدار برآورد شده باشد. به‌طوری‌که از شکل ۲-۵ ملاحظه می‌شود در تبخیر- تعرق‌های کم، مقدار تبخیر- تعرق برآورد شده بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده بوده و در تبخیر- تعرق‌های زیاد عکس این پدیده اتفاق می‌افتد. احتشامی و همکاران (۱۳۷۸) در اصفهان نتیجه‌ی کمابیش مشابهی بدست آوردند. تراککوویچ و گوجیچ (۲۰۱۰) نیز در جنوب ایتالیا نتیجه گرفتند که روش پنمن-مانتیت بهترین برآورد را بدست می‌دهد که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. اما بختیاری و همکاران (۲۰۱۱) در کرمان بهترین برآورد را از روش تابشی FAO بدست آوردند و روش پنمن-مانتیت بعد از روش پنمن-کیمبرلی در جایگاه سوم قرار گرفت. بهترین همبستگی با لایسیمتر توسط روش تشت تبخیر کلاس A با استفاده از ضریب تشت تبخیر ارائه شده توسط آلن و همکاران (آلن و همکاران ۱۹۹۸) بدست آمد هرچند که مقدار کل تبخیر- تعرق برآورد شده در این روش کمتر از لایسیمتر بود. به‌طوری‌که از شکل ۱-۵ ملاحظه می‌شود در تبخیر- تعرق‌های کم، منحنی روش تشت تبخیر بر خط یک به یک منطبق است ولی با افزایش شدت تبخیر- تعرق این دو خط از هم فاصله می‌گیرند که بنظر می‌رسد علت امر افزایش خطای محاسبه ضریب تشت توسط رابطه آلن در شدت‌های بالای تبخیر باشد. امداد و صباغ فرشی

**جدول ۲- روابط رگرسیونی بین پارامترهای جوی و تبخیر- تعرق برآورد شده توسط روابط مختلف.**

روش برآورد	رابطه‌ی رگرسیونی موجود بین پارامترهای جوی و تبخیر- تعرق برآورد شده	R <sup>2</sup>	RMSE (mm d <sup>-1</sup> )
بلینی- کریدل	$ET_{(B-C)} = 0.630T_{Mean} + 0.003R_s - 0.373T_{Max} - 0.613$	۰/۹۸۷	۰/۶۷۲
هارگریوز	$ET_{(H)} = 0.003R_s + 0.135T_{Min} - 0.156n - 0.216U_2 + 0.13RH_{Min} - 0.552$	۰/۹۹۵	۰/۱۸۵
ماکینک	$ET_{(M)} = 0.003R_s + 0.099T_{Mean} - 0.087P + 0.039RH_{Min} - 0.023RH_{Max} - 1.702$	۰/۹۹۷	۰/۰۲۴
پنمن	$ET_{(P)} = 0.003R_s + 0.141T_{Min} + 0.444U_2 + 0.024RH_{Min} - 2.890$	۰/۹۹۳	۰/۱۰۱
پنمن-مانتیت	$ET_{(P-M)} = 0.002R_s + 0.156T_{Min} + 0.452U_2 - 1.325$	۰/۹۸۴	۰/۱۲۲
تشت تبخیر	$ET_{(Pan)} = 0.731T_{Min} + 0.002R_s - 0.437T_{Max} + 2.417$	۰/۹۵۷	۰/۰۸۵
لایسیمتر	$ET_{(L)} = 0.855T_{Min} + 0.003R_s - 0.543T_{Max} + 2.656$	۰/۹۴۷	۰/۲۷۵
لایسیمتر <sup>#</sup>	$ET_{(L)} = 0.553E_p + 0.001R_s + 0.024RH_{Max} - 2.525$	۰/۹۸۹	۰/۰۳۵

# (در صورت وجود اطلاعات تبخیر از تشت)

کفایت، خطای مطلق متوسط و بیشینه که نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

بعد از مشخص شدن رتبه‌ی هریک از روش‌ها در شاخص مربوطه، رتبه‌ها باهم جمع گردید و رتبه

با توجه به اینکه ضریب همبستگی به تنهایی مقیاس مناسبی برای انتخاب روش مناسب برای برآورد تبخیر- تعرق نیست، لذا از شاخص‌های دیگری نیز استفاده گردید که عبارتند از شاخص توافق، شاخص

تغرق مرجع برای دشت تبریز معرفی شد و از این نظر روش‌های تشت تبخیر، ماکینک، بلینی- کریدل، پنمن و هارگریوز در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

نهایی برای هر روش تعیین شد که نتایج در جدول ۳ مشهود است. همان‌طوری‌که ملاحظه می‌گردد روش پنمن- مانتیت به‌عنوان بهترین روش برآورد تبخیر-

جدول ۴ - بررسی شاخص‌های مختلف برای مقایسه روش‌های برآورد تبخیر- تعرق مرجع.

روش برآورد	R <sup>2</sup>	D	MAE (mm d <sup>-1</sup> )	MAXE	EF	جمع رتبه‌ها	رتبه نهایی
بلینی- کریدل	۰/۹۸۷ <sup>(۷)</sup>	۰/۹۷۴ <sup>(۲)</sup>	۰/۸۱۵ <sup>(۳)</sup>	۲/۱۳۷ <sup>(۴)</sup>	۰/۸۹۴ <sup>(۳)</sup>	۱۶	۴
هارگریوز	۰/۹۶۸ <sup>(۶)</sup>	۰/۹۲۱ <sup>(۶)</sup>	۰/۹۷۵ <sup>(۵)</sup>	۳/۲۰۸ <sup>(۶)</sup>	۰/۷۸۴ <sup>(۵)</sup>	۲۸	۶
ماکینک	۰/۹۶۸ <sup>(۵)</sup>	۰/۹۷۳ <sup>(۳)</sup>	۰/۷۷۱ <sup>(۳)</sup>	۱/۵۲۲ <sup>(۱)</sup>	۰/۹۰۶ <sup>(۲)</sup>	۱۴	۳
پنمن	۰/۹۷۶ <sup>(۴)</sup>	۰/۹۳۹ <sup>(۵)</sup>	۱/۳۴۹ <sup>(۶)</sup>	۲/۳۹۹ <sup>(۵)</sup>	۰/۷۲۹ <sup>(۶)</sup>	۲۶	۵
پنمن- مانتیت	۰/۹۸۴ <sup>(۳)</sup>	۰/۹۷۷ <sup>(۱)</sup>	۰/۶۵۳ <sup>(۱)</sup>	۱/۶۹۶ <sup>(۲)</sup>	۰/۹۲۸ <sup>(۱)</sup>	۸	۱
تشت تبخیر	۰/۹۹۳ <sup>(۱)</sup>	۰/۹۶۹ <sup>(۴)</sup>	۰/۷۰۷ <sup>(۲)</sup>	۲/۰۴۷ <sup>(۳)</sup>	۰/۸۹۶ <sup>(۳)</sup>	۱۳	۲

# اعداد داخل پرانتز نشانگر رتبه هر روش در شاخص مربوطه می‌باشد

قدرت تبخیرکنندگی منطقه قابل پیشنهاد است. بطوریکه برای مقادیر کم تبخیر- تعرق مرجع (صفر تا ۶ میلی‌متر در روز) روش تشت تبخیر، برای مقادیر متوسط تبخیر- تعرق مرجع (۶ تا ۸ میلی‌متر در روز) روش ماکینک و برای مقادیر زیاد تبخیر- تعرق مرجع (۸ تا ۱۰ میلی‌متر در روز) روش بلینی- کریدل قابل توصیه است.

رابطه‌ی رگرسیونی بین پارامترهای جوی و تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده نشان داد که تبخیر از تشت، تابش خورشیدی و رطوبت نسبی بیشینه، به- خوبی قادرند تبخیر- تعرق مرجع را برآورد کنند (رابطه ۱۳)، ولی در صورت عدم دسترسی به اطلاعات تبخیر، پارامترهای دمای کمینه و بیشینه و تابش خورشیدی نیز برای برآورد تبخیر تعرق مرجع کافی خواهد بود (رابطه ۱۴).

$$ET_o = 0.553E_p + 0.001R_s + 0.024RH_{Max} - 2.525, [13]$$

$$R^2 = 0.99$$

$$ET_o = 0.855T_{Min} + 0.003R_s - 0.543T_{Max} + 2.656, [14]$$

$$R^2 = 0.95$$

## نتیجه‌گیری کلی

متوسط تبخیر- تعرق مرجع برای دشت تبریز توسط لایسیمتر زهکش‌دار بدون سطح ایستابی در طی ۹ ماه (اول فروردین تا آخر آذر) ۱۲۲۶/۹ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید. در همین مدت متوسط میزان تبخیر ۱۹۴۷/۳ میلی‌متر بود. بدین ترتیب متوسط ضریب تشت تبخیر برای ۹ ماه مذکور ۰/۶۳ تعیین شد.

بین روش‌های مورد مطالعه، روش پنمن- مانتیت به‌عنوان بهترین روش برآورد تبخیر- تعرق مرجع برای دشت تبریز معرفی گردید و روش هارگریوز نامناسبترین روش برای منطقه تشخیص داده شد. با توجه به اینکه روش فائو- پنمن- مانتیت از پارامترهای زیادی برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع بهره می‌برد که تمامی این پارامترها عامل تبخیر و تعرق آب هستند در نتیجه قابل پیش‌بینی است که این روش برآورد بهتری داشته باشد. اما آنچه که اهمیت دارد این است که در بیشتر مناطق دسترسی به داده‌های مورد نیاز روش فائو- پنمن- مانتیت وجود ندارد. در چنین مناطقی استفاده از روش‌های بعدی به ترتیب اولویت و براساس

## منابع مورد استفاده

Aboukhaled A, Alfaro A and Smith M, 1982. Lysimeters. FAO Irrigation and Drainage Paper. 39. FAO,

Rome.

- Alexandris S, Stricevic R and Petkovic S, 2008. Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated with six empirical methods against the Penman-Monteith formula. *European Water* 21/22: 17–28.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. *Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper. 56. FAO, Rome.
- Bakhtiari B, Ghahreman N, Liaghat AM and Hoogenboom G, 2011. Evaluation of reference evapotranspiration models for a semiarid environment using lysimeter measurements. *Journal of Agricultural Science and Technology* 13: 223–237.
- Banihabib, ME, Valipour M and Behbahani, SMR, 2012. Comparison of autoregressive static and artificial dynamic neural network for the forecasting of monthly inflow of Dez reservoir. *Journal of Environmental Science and Technology* 13(4): 1–14.
- De Sousa Lima JR, Dantas Antonio AC, De Souza ES, Hammecker C, Lima Montenegro SMG and de Oliveira Lira CAB, 2013. Calibration of Hargreaves-Samani equation for estimating reference evapotranspiration in Sub-humid region of Brazil. *Journal of Water Resource and Protection* 5: 1–5.
- Djaman K, Balde AB, Sow A, Muller B, Irmak S, N'Diaye MK, Manneh B, Moukoumbi YD, Futakuchi K and Saito K, 2015. Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 3: 139–159.
- Doorenbos H, and Pruitt WO, 1977. *Guidelines for Predicting Crop Water Requirement*. FAO Irrigation and Drainage Paper. 24. FAO, Rome.
- Droogers P and Allen RG, 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems* 16 (1): 33–45.
- Ehteshami M, Najafi P and Sattar M, 1999. Estimating reference evapotranspiration in Isfahan region using minimum weather data set. *Iranian Journal of Soil and Water Sciences* 13(2): 140–147. (In Farsi)
- Emdad MR, and Sabbagh Farshi AA, 2000. Selection of suitable empirical model for estimating reference evapotranspiration in Golestan (Gorgan). *Iranian Journal of Soil and Water Sciences* 12(10): 90–95. (In Farsi)
- Igbadun HE, Mahoo HF, Tarimo AKPR and Salim BA, 2006. Performance of Two Temperature-Based Reference Evapotranspiration Models in the Mkoji Sub-Catchment in Tanzania. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript LW 05 008. Vol. VIII.
- Maeda EE, Wiberg DA and Pellikka PKE, 2011. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. *Applied Geography* 31(1): 251–258.
- Maulé C, Helgason W, McGinn S and Cutforth H, 2006. Estimation of standardized reference evapotranspiration on the Canadian Prairies using simple models with limited weather data. *Canadian Biosystems Engineering* 48:1.1–1.11.
- Onnabi Milani A. 1997. Evaluating the effect of different irrigation scheduling method for forage corn in Azarshahr. MSc Thesis, Agricultural Faculty, Tarbiat Modarres University. (In Farsi)
- Saremi M, 1994. Determination of reference (grass) evapotranspiration. Agricultural Research Center of Khuzestan Province Annual Report: 26–28. (In Farsi)
- Schrader F, Durnera W, Fank Johann, Gebler S, Pütz T, Hannes M and Wollschläger U, 2013. Estimating precipitation and actual evapotranspiration from precision lysimeter measurements. *Procedia Environmental Sciences* 19: 543–552.
- Shariati M, 1993. Determining water requirement of the region (Lysimetric study of grass evapotranspiration). Soil and Water Research Institute Annual report: 154–157. (In Farsi)
- Shoja Razavi M, 1983. *Gardening Principles in Homes*. Tizhoush and Golar. Tehran, Iran. PP. 55. (In Farsi)
- Subburayan S, Murugappan A and Mohan S, 2011. Modified Hargreaves equation for estimation of ET<sub>0</sub> in a hot and humid location in Tamilnadu State, India. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)* 3(1): 592–600.
- Sentelhas PC and Folegatti MV, 2003. Class A pan coefficients (K<sub>p</sub>) to estimate daily reference evapotranspiration (ET<sub>0</sub>). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 7 (1): 111–115. Available at: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v7n1/v7n1a18.pdf>
- Tabari H, 2009. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. *Water Resources Management*. 24(10): 2311–2337.

- 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.
- Valipour M, 2014. Comparative evaluation of radiation-based methods for estimation of reference evapotranspiration. *Journal of Hydrological Engineering* 20(5): 1-14, doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001066
- Xu, CY and Chen D, 2005. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. *Hydrological Processes* 19(18): 3717-3734.
- Xu CY and Singh VP, 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Management* 16: 197-219.