

## بررسی تصحیح جزء تابش مدل‌های پریستلی - تیلور و پنمن به منظور برآورد تبخیر از مخازن خورشیدی

احمد احمدی نیک<sup>۱</sup>، علی رحیمی خوب<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۸/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۲/۲

### چکیده

تخمین هرچه دقیق‌تر تبخیر در مخازن خورشیدی گام مؤثری در برنامه‌ریزی و طراحی سیستم‌های آبیاری تراکمی در مناطق گرم و خشک بحساب می‌آید. به دلیل اینکه تابش رسیده به سطح تبخیر در داخل و خارج مخزن متفاوت است، برای برآورد اولیه میزان تبخیر داخل مخازن، نمی‌توان از تکنیک‌های رایج مورد استفاده در سطوح آزاد آب استفاده کرد. هدف اصلی از این مطالعه، اصلاح جزء تابش مدل پنمن (بعنوان مدلی ترکیبی و مبنا در تخمین تبخیر از سطوح آزاد آب) و مدل پریستلی - تیلور (به‌عنوان مدل تابشی توصیه شده برای برآورد تبخیر از محیط‌های بسته نظیر گلخانه‌ها)، جهت برآورد شدت تبخیر از مخازن خورشیدی می‌باشد. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی مدل‌ها در طول دوره یکساله مطالعه، نشان داد که تصحیح جزء تابش روابط مذکور، اثر مثبتی در برآورد دقیق‌تر تبخیر از مخازن خورشیدی دارند. نتایج حاکی از آن بود که مدل اصلاح شده پنمن قادر است تبخیر از مخزن را با بیش‌ترین ضریب تبیین برابر  $R^2 = 0.950$  و میانگین انحراف خطای (MBE)  $1/116$  میلی‌متر در روز و ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE)  $1/258$  میلی‌متر در روز تخمین بزند.

**واژه‌های کلیدی:** آب‌های نامتعارف، سیستم آبیاری تراکمی، مدل پریستلی - تیلور، مدل پنمن، مخازن خورشیدی، نمک‌زدایی

### مقدمه

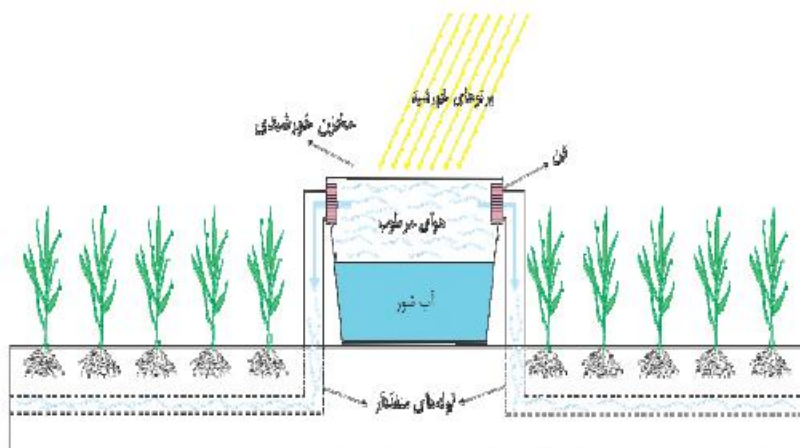
معضل کمبود منابع آب با کیفیت، در خیلی از مناطق کشور می‌تواند یک راه حل اساسی باشد.

سیستم آبیاری تراکمی (Condensation Irrigation) یکی از ایده‌های نوینی می‌باشد که توأمان با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، مسائل زیست محیطی را نیز با استفاده و کنترل آب‌های نامتعارف مد نظر قرار می‌دهد. همانطور که در شکل ۱ نمایش داده شده است این روش آبیاری، ترکیبی از یک مخزن خورشیدی و شبکه لوله‌های زیرزمینی است. در این روش از انرژی خورشیدی جهت تبخیر آب‌های با کیفیت نامناسب استفاده می‌گردد و سپس هوای مرطوب ایجاد شده در مخزن، توسط شبکه لوله‌های پلاستیکی سوراخ‌دار و تجهیزات مربوطه به محیط ریشه منتقل می‌شود (Lindblom and Nordell, 2007).

دقت بالا در تخمین حجم آب باکیفیت تولیدی و مقایسه آن با تبخیر و تعرق گیاه مرجع می‌تواند گامی مهم در امکان‌سنجی کاربرد این روش نوین آبیاری در مناطق مختلف باشد. تاکنون روابط نسبتاً دقیق ترکیبی و تجربی متنوعی برای تعیین نرخ تبخیر (E) از سطوح آزاد آب توسط پارامترهای اقلیمی معرفی شده‌اند. مدل ترکیبی پنمن (۱۹۴۸) و مدل تجربی پریسلی - تیلور (۱۹۷۲) از جمله شاخص‌ترین این روابط به‌شمار می‌روند.

جلوگیری از آلودگی منابع محدود آب شیرین توسط آب‌های نامتعارف اعم از زه‌آب‌های کشاورزی و پساب‌های شهری، از جمله اقدامات حیاتی در جهت حفاظت از منابع محدود آبی کشور به‌شمار می‌آید. علاوه بر رویکرد حفظ منابع آب و محیط زیست، استفاده مناسب از منابع آب نامتعارف، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک، می‌تواند گامی مثبت در جهت توسعه کشاورزی باشد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند مناطقی که نیاز مبرمی به آب با کیفیت مناسب دارند شامل بیش‌ترین تابش خورشیدی نیز هستند. بنابراین در این مناطق، استفاده از انرژی حرارتی خورشید می‌تواند به‌عنوان یک منبع تجدیدپذیر برای تصفیه و نمک‌زدایی از آب محسوب شود (Garcia, 2002). ایران نیز با قرار گرفتن در بین مدارهای ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی، به‌عنوان یک منطقه گرم و خشک، شامل مجموع ساعت آفتابی قابل توجهی در طول سال می‌باشد. لذا شناخت تجهیزات و دانش نوین به‌منظور استفاده از این انرژی پاک و مقرون به‌صرفه، در جهت برطرف کردن

۱ - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران  
۲ - استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران  
\* - نویسنده مسئول (Email: akhob@ut.ac.ir)



شکل ۱ نمایی از سیستم آبیاری تراکمی و مخزن خورشیدی

پریستلی - تیلور، به منظور تطبیق آن‌ها با شرایط تابشی داخل مخزن و در نتیجه دستیابی به تخمین دقیق‌تر تبخیر از مخزن خورشیدی می‌باشد. سپس برای ارزیابی دقت مدل‌ها و بررسی تأثیر اصلاح جزء تابش در آن‌ها، مقادیر تخمینی به دست آمده با مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر در مخزن، طی یک دوره آماری یکساله، مورد مقایسه قرار گرفتند.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعاتی و برداشت داده‌ها

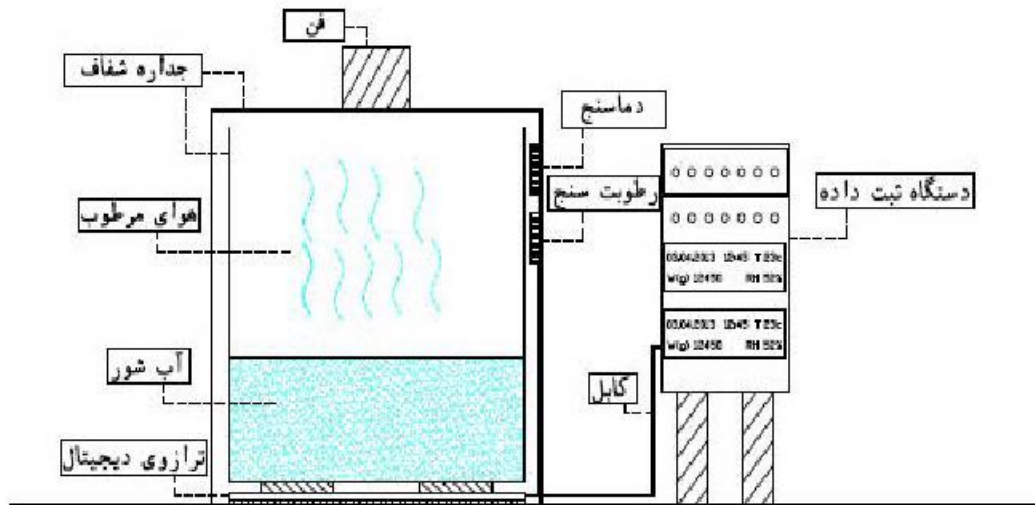
منطقه مورد مطالعه واقع در جنوب شرق تهران، در محل پردیس ابوریحان دانشگاه تهران می‌باشد. این منطقه یکی از مهم‌ترین مناطق کشاورزی جنوب شرق تهران است و با متوسط بارندگی ۲۳۰ میلی‌متر و تبخیر ۱۳۹۰ میلی‌متر در سال جزء مناطق اقلیمی نیمه‌خشک محسوب می‌شود. مراحل طراحی و ساخت مخزن، نصب تجهیزات اندازه‌گیری از اوایل تابستان سال ۱۳۹۱ شروع شد و تا اوایل پاییز همان سال ادامه داشت. سپس داده‌برداری از ابتدای مهر سال ۱۳۹۱ (اوایل اکتبر ۲۰۱۲) تا اوایل آبان سال ۱۳۹۲ (اواخر اکتبر ۲۰۱۳) به طول انجامید که حدوداً دوره یکساله را تحت پوشش خود قرار داد. علاوه بر آن داده‌های هواشناسی مورد نیاز در این تحقیق شامل پارامترهای حداکثر و حداقل دمای روزانه، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی هوا، تعداد ساعات آفتابی در روز و سرعت باد روزانه می‌باشد که مربوط به سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ ایستگاه هواشناسی شهرستان پاکدشت (منطقه مطالعاتی) واقع در پردیس ابوریحان دانشگاه تهران است.

مزیت مدل پنمن در این است که مبنای فیزیکی دارد و مقادیر تبخیر را با دقت بالایی از مجموع دو جزء آیرودینامیک و تابش تخمین می‌زند. از طرف دیگر پریستلی و تیلور با اصلاح مدل پنمن، رابطه‌ای ارائه دادند که در آن تنها از پارامتر انرژی برای برآورد تبخیر از سطوح مختلف استفاده می‌شود (Priestley and Taylor, 1972). نتایج مطالعات انجام شده روی این مدل گویای دقت قابل قبول آن در تخمین ET در محیط‌های بسته نظیر گلخانه‌ها است (Vuscovich, 2001).

فرآیند تبخیر در مخازن خورشیدی متفاوت با سطوح بدون پوشش است. جدارهای شفاف باعث جدا کردن فضای داخلی مخزن از محیط و اتمسفر اطراف می‌شود که این خود عاملی بر تغییر تأثیر پارامترهای محیطی بر روی شدت تبخیر می‌شود. نظیر فرآیندی که در سیستم گلخانه‌ها اتفاق می‌افتد می‌توان گفت مهم‌ترین تغییرات به وجود آمده اثر گلخانه‌ای و حذف عامل سرعت باد می‌باشند. به عبارت دیگر طبق اصول ترمودینامیکی و بیلان انرژی قسمتی از تابش خورشیدی با طول موج کوتاه پس از برخورد با سطوح مختلف نظیر جداره مخزن و سطح آب، جذب شده و باعث گرم شدن آن‌ها می‌گردد. بر اساس قانون استفان - بولتزمن، افزایش دمای سطح آب و جداره مخزن و اتمسفر باعث تابش امواج بلند به سمت خارج و داخل سطح تبخیر می‌گردد (Allen et al, 1998). بدین ترتیب در مخازن خورشیدی، در اثر افزایش برآیند تابش‌های بلند به سطح آب، دمای آن به عنوان عامل تشدید کننده تبخیر افزایش می‌یابد. این فرآیند که به اثر گلخانه‌ای معروف است، در سیستم گلخانه‌ها سبب گرم شدن محیط داخلی و در جو زمین جهت گرم نگه داشتن کره زمین می‌گردد. از طرف دیگر، جداره‌های مخازن مانعی در برابر جریان باد و کاهش رطوبت سطح تبخیر می‌باشد که به نوبه خود عامل کاهش در فرآیند تبخیر به شمار می‌رود (Fazlil and Boesveld, 2009).

هدف اصلی از این مطالعه، اصلاح جزء تابش مدل پنمن و





شکل ۲ اجزای مخزن خورشیدی و نحوه اتصال دستگاه‌های مربوطه طرح حاضر

متر بود که در طی پژوهش با توجه به تبخیر آب و باقی ماندن املاح و نمک و اضافه کردن مجدد آب، کیفیت آن به صورت مداوم کاهش پیدا کرد. به طوریکه که EC در اواسط دوره پژوهش (پاییز و زمستان ۱۳۹۱) به میزان ۵/۵ دسی‌زیمنس بر متر و در انتهای دوره پژوهشی (پایان فصل تابستان ۱۳۹۲) به میزان ۱۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر افزایش یافت که بر اساس طبقه‌بندی که از سوی سازمان خوار و بار جهانی (FAO-1992) اعلام شده است به ترتیب در گروه آب‌های کم شور، لب شور و خیلی شور قرار می‌گیرد.

از طرفی افزایش غلظت نمک‌ها در آب باعث کاهش فشار بخار آب اشباع می‌شود که این عامل باید در معادله پنمن لحاظ شود. از آنجایی که در بدترین حالت کیفیت آب (۱۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر)، غلظت آن کم‌تر از یک مولار (حدود ۰/۲۲ مولار) بود، به منظور اعمال تأثیر کاهش فشار بخار اشباع از رابطه رانولت استفاده گردید (علیزاده، ۱۳۸۵).

#### مدل کلاسیک پنمن (PE)

در سال ۱۹۴۸ پنمن، دانشمند انگلیسی از ترکیب روش‌های آیرودینامیک و توازن انرژی روشی را برای محاسبه تبخیر از سطح آزاد آب ارائه نمود که به روش ترکیبی یا معادله پنمن معروف شد (Valiantzas, 2006). شکل کلاسیک معادله پنمن برای برآورد تبخیر پتانسیل به این صورت است:

$$E_{PEN} = \frac{\Delta(R_n)}{\lambda(\Delta + \gamma)} + \frac{6.43(f_{it})D\gamma}{\lambda(\Delta + \gamma)} \quad (1)$$

که در آن  $E_{PEN}$ : تبخیر بالقوه از سطح آزاد آب (mm/day)،

#### مدل فیزیکی

در این تحقیق از یک طرح مخزن خورشیدی (solar still) جهت بررسی فرآیند تبخیر و اندازه‌گیری آن استفاده شد. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود طراحی مخزن خورشیدی مذکور با ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متر و به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر صورت پذیرفت. جنس جداره شفاف مخزن از صفحات فلکسی گلاس می‌باشد. پوشش شفاف به اشعه‌های تابش خورشیدی با امواج کوتاه اجازه می‌دهد تا به درون مخزن عبور داده شده و توسط ملکول‌های آب درون مخزن جذب شوند. سپس در اثر افزایش دما، جداره‌های مخزن و آب پرتوهای فرسوخ (امواج بلند) ساطع می‌کند که اکثر این امواج در درون مخزن محبوس شده و باعث افزایش دمای سطح آب می‌شود. این فرآیند به اثر گلخانه‌ای معروف است که در جو زمین نیز رخ می‌دهد. به تدریج دمای آب درون مخزن بالا رفته و میزان رطوبت حبس شده بین سطح آب و جداره‌ها افزایش می‌یابد. مخزن بر روی دستگاه اندازه‌گیری وزن قرار گرفت و وزن آب درون آن با دقت ۰/۰۱ گرم در هر ثانیه به صورت دیجیتال اندازه‌گیری شد. همچنین درون آن دستگاه‌های دقیق اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی قرار داده شد که مقدار پارامترهای دما و رطوبت نسبی محیط داخلی را به صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری کنند. تمامی دستگاه‌های اندازه‌گیری در مخزن به وسیله کابل‌های مجزا به دستگاه‌های ثبت داده متصل شدند.

کیفیت آب به کاربرده شده طی دوره پژوهش در آزمایشگاه کیفیت آب پردیس ابوریحان دانشگاه تهران مورد آزمایش قرار گرفت. شاخص شوری آب (EC) در درجه حرارت استاندارد (۲۵ درجه سانتی‌گراد) در مراحل ابتدایی طرح ( شهریور ۱۳۹۱) ۱/۵ دسی‌زیمنس بر

Taylor, 1972). در این مدل جزء آئروودینامیکی معادله پنمن برای سطوحی با مقاومت آیرودینامیک بالا نظیر سطح آب و محیط‌های بسته همانند گلخانه‌ها، حذف و به جای آن یک مقدار ثابت در ترم مربوط به انرژی ( $c = 1/26$ ) ضرب گردید.

$$E_{PT} = \frac{C \cdot \Delta(R_n)}{\lambda(\Delta + \gamma)} \quad (6)$$

$$E_{PT} = C \cdot E_{rad} \quad (7)$$

به دلیل اینکه در معادله پریستلی-تیلور فقط از ترم انرژی برای تخمین تبخیر استفاده شده است، مطالعات زیادی نشان داده‌اند که این مدل در تخمین مقادیر تبخیر و تعرق در گلخانه‌ها دارای دقت قابل قبولی است (Vusovich, 2001). به دلیل شباهت فضای داخل مخازن خورشیدی به شرایط گلخانه‌ها، بعد از اصلاح جزء تابش مدل پریستلی-تیلور، از آن برای محاسبه تبخیر از مخزن خورشیدی استفاده شد.

#### اصلاح ترم تابش خالص

پارامتر  $R_n$  از اختلاف تابش خالص کوتاه رسیده به سطح آب ( $R_{ns}$ ) و تابش خالص بلند ساطع شده از آن ( $R_{nl}$ ) به دست می‌آید. آن و همکاران در نشریه فائو ۵۶، رابطه‌ای برای تخمین مقادیر  $R_{ns}$  و  $R_{nl}$  پیشنهاد دادند که با استفاده از آن‌ها می‌توان مقدار  $R_n$  در رابطه پنمن استاندارد را محاسبه کرد (Allen et al, 1998). بنابراین طبق تعریف تابش خالص داریم:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (8)$$

$$R_{ns} = R_s(1 - \alpha) \quad (9)$$

که در آن  $R_s$  و  $R_{ns}$  به ترتیب تابش با طول موج کوتاه و تابش خالص با طول موج کوتاه رسیده به آب ( $MJ/m^2/d$ ) و  $\alpha$  ضریب بازتابش (آلبدو) که برای آب  $0.08$  در نظر گرفته می‌شود هستند (Allen et al, 1998).

با توجه به این که تهیه وسایل اندازه‌گیری  $R_s$  بسیار پرهزینه است، آلن و همکاران (Allen et al, 1998) در ایستگاه‌هایی که امکان اندازه‌گیری این پارامتر را نداشتند، رابطه آنگستروم را پیشنهاد کردند. در رابطه آنگستروم از پارامتر ساعت آفتابی برای برآورد  $R_s$  بدین ترتیب استفاده می‌شود:

$$R_s = R_a \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad (10)$$

که در آن  $n$  تعداد ساعت واقعی آفتاب ( $h_r$ )،  $R_a$ : تابش برون زمینی ( $MJ/m^2/d$ ) و  $N$  بیش‌ترین تعداد ساعت آفتابی ممکن در طول روز ( $h_r$ ) و پارامترهای  $a$  و  $b$  مقادیر ثابت برای کالیبراسیون رابطه آنگستروم هستند که برای منطقه مورد مطالعه به ترتیب  $0.26$  و  $0.49$  محاسبه شده است (Rahimikhoob, 2009).

$R_n$ : تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ( $MJ/m^2/d$ )،  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار ( $KPa/^\circ C$ )،  $\gamma$ : ضریب سایکرومتری ( $KPa/^\circ C$ )،  $\lambda$ : گرمای نهان تبخیر ( $MJ/Kg$ )،  $D$ : کمبود فشار بخار ( $KPa$ ) و  $f(u)$  تابع باد می‌باشد که از معادله زیر به دست می‌آید:

$$f(u) = a_u + b_u u \quad (2)$$

که در آن  $a_u$  و  $b_u$  ضرایب تابع باد می‌باشند و  $u$  سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین بر حسب متر بر ثانیه است. ضمناً در معادله اصلی پنمن مقدار  $a_u$  و  $b_u$  به ترتیب برابر با  $1$  و  $0.536$  می‌باشد (Penman, 1948).

هدف اصلی در این مطالعه اصلاح جزء تابش روابط پنمن و پریستلی-تیلور، به منظور ایجاد قابلیت برآورد تبخیر از سطح آب داخل مخازن خورشیدی می‌باشد. بدین منظور نیاز است که این معادلات را تفکیک کرده و عملکرد هر قسمت، جداگانه تجزیه و تحلیل شود. جزء تابش معادله پنمن را می‌توان به این شکل نمایش داد:

$$E_{Pen} = E_{rad} + E_{aero} \quad (3)$$

که در آن  $E_{rad}$ : ترم تابش و  $E_{aero}$ : ترم آیرودینامیکی هستند. پارامترهای تأثیرگذار در بخش تابش شامل تابش ورودی و تابش خروجی هستند. به عبارتی از برآیند تابش با طول موج کوتاه و بلند رسیده و خروجی از سطح آب بدست می‌آید. بنابراین می‌توان آن را به این صورت نمایش داد:

$$E_{rad} = \frac{\Delta(R_n)}{\lambda(\Delta + \gamma)} \quad (4)$$

جزء دوم معادله پنمن یا همان جزء آیرودینامیک که سرعت باد و کمبود فشار بخار اشباع مهم‌ترین پارامترهای آن هستند را نیز بدین صورت می‌توان نمایش داد:

$$E_{aero} = \frac{\gamma}{\lambda(\Delta + \gamma)} 6.43 F_u \cdot D \quad (5)$$

از آنجایی که جداره‌ها فضای داخل مخزن را از محیط اطراف جدا می‌کند، بنابراین در جزء آیرودینامیک سرعت باد صفر در نظر گرفته شد. همچنین از آنجایی که پارامترهای دما، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی (ساعت آفتابی) و سرعت باد به عنوان پارامترهای رایج در اکثر ایستگاه‌های استاندارد هواشناسی به صورت روزانه و ماهانه اندازه‌گیری می‌شوند، لذا روند محاسبه‌ای رابطه پنمن بگونه‌ای که بتواند مستقیماً از این داده‌ها استفاده کند استاندارد شده است (Valiantzas, 2006). به همین دلیل در این تحقیق از فرم استاندارد مدل پنمن استفاده شد.

#### مدل پریستلی - تیلور (PT)

پریستلی و تیلور (با اصلاح معادله پنمن، مدلی تجربی برای تعیین تبخیر پتانسیل با استفاده از تابش خالص ارائه دادند) Priestley and

و معادله استفان-بولتزمن بدست می‌آید،  $R_{1a}$  تابش بلند ساحل شده از طرف اتمسفر و رسیده به سطح آب ( $MJ/m^2/d$ ) (ضریب عبور تابش بلند توسط جدار مخزن  $0/2$  در نظر گرفته شد (Gallego, 1997))،  $R_{sc}$  تابش کوتاه عبور کرده از جدار مخزن ( $MJ/m^2/d$ )،  $R_s$  تابش کوتاه رسیده به جداره مخزن ( $MJ/m^2/d$ ) و  $\beta$  ضریب انعکاس تابش جداره هستند.

برای به‌دست آوردن تابش بلند ساحل شده از سطح اجسام از رابطه استفان بولتزمن به شکل زیر استفاده می‌شود:

$$R_T = (4.903 \times 10^{-9}) T_{sk}^4 \cdot \varepsilon \quad (14)$$

$\varepsilon$ : قابلیت انتشار (که برای جداره مخزن و سطح آب به ترتیب برابر  $0/85$  و  $0/97$  می‌باشد (Gallego, 1997))،  $T_{sk}$ : متوسط دمای مطلق جداره ( $^{\circ}K$ ) می‌باشد. هم‌چنین برای به‌دست آوردن تابش بلند ساحل شده از اتمسفر از رابطه (۱۴) استفاده می‌کنیم. با این تفاوت که قابلیت انتشار برای اتمسفر از رابطه ایدسو (۱۹۸۱) به این ترتیب به-دست می‌آید:

$$\varepsilon = 0.179 \cdot e_a^{1/7} \cdot \exp(350 / T_{sk}) \quad (15)$$

$e_a$  فشار بخار هوا (kpa) می‌باشد. در راستای هدف اصلی در این مطالعه، با جایگذاری معادله تابش خالص رسیده به سطح آب داخل مخزن به‌جای معادله تابش خالص رسیده به سطح آب در شرایط آزاد و بدون پوشش بخش اول رابطه پنمن برای تخمین شدت تبخیر از مخزن اصلاح شد. از این به بعد لازم است تا جزء آیرودینامیک نیز به‌منظور نزدیک شدن به شرایط داخل مخزن تغییر کند.

### نتایج و بحث

بررسی ارتباط بین مقادیر تبخیر از مخزن با پارامترهای اقلیمی روزانه

برای اینکه تأثیر هر یک از پارامترهای اقلیمی بر روی شدت تبخیر به‌دست آید، لازم است که همبستگی و نوع ارتباط بین آن‌ها مشخص شود. آنالیز همبستگی روشی برای تعیین میزان ارتباط و جهت آن بین دو متغیر می‌باشد. در اینجا جهت بررسی رابطه بین پارامترهای محیطی شامل دما ( $T_a$ )، رطوبت نسبی محیط ( $RHa$ ) و تابش خالص درون مخزن ( $Rn,c$ ) با شدت تبخیر اندازه‌گیری شده درون مخزن ( $E$ ) از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده است.

جدول ۱ ضرایب همبستگی پیرسون بین متغیرها

Variable	$T_a$	$RHa$	$Rn,c$	$E$
$T_a$	۱	-۰/۸۰۷	۰/۸۷۰	-۰/۹۵۳
$RHa$	-	۱	-۰/۷۱۶	-۰/۷۴۲
$Rn$	-	-	۱	۰/۹۳۵
$E$	-	-	-	۱

بعد از برآورد تابش خالص کوتاه رسیده به سطح آب آزاد لازم است تابش خالص بلند رسیده ( $Rn_l$ ) به آن نیز محاسبه شود.  $Rn_l$  شامل برآیند تابش‌های بلند ساحل شده از سطح آب و یا اتمسفر می‌باشد. به‌طور کلی طبق قانون استفان-بولتزمن هر جسمی که دارای دمای مطلق بزرگ‌تر از صفر باشد از خود امواج بلند ساحل می‌کند که می‌توان مقدار آن را محاسبه کرد (Allen et al, 1998). برای سطوح آزاد آب یا پوشش گیاهی برآیند تابش بلند از این سطوح به سمت اتمسفر است. لذا به‌منظور محاسبه  $Rn$  باید مقدار به‌دست آمده برای  $Rn_l$  را از  $Rns$  کم کرد. آئن و همکاران برای برآورد  $Rn_l$  رابطه زیر را پیشنهاد دادند (Allen et al, 1998):

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max-k}^4 + T_{min-k}^4}{2} \right] \left( 0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (11)$$

که در آن  $Rn_l$ : تابش خالص برگشتی از سطح آب با طول موج بلند ( $MJ/m^2/d$ )،  $T_{max-k}$  و  $T_{min-k}$  به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین دمای مطلق روزانه ( $^{\circ}K$ )،  $\delta$  ثابت استفان بولتزمن ( $4.903 \times 10^{-9} MJ/K^4/m^2/d$ )،  $R_{so}$  تابش رسیده به زمین در شرایط آسمان بدون ابر ( $MJ/m^2/d$ ) هستند.

تا اینجا روند محاسبه جزء تابش معادله پنمن و پریستلی-تیلور برای برآورد تبخیر از سطح آزاد آب تشریح شد. این در شرایطی است که هیچ‌گونه پوششی در مسیر تابش خورشیدی وجود نداشته باشد. به‌طور کلی جداره‌های فلکسی گلاس مخزن خورشیدی باعث می‌شوند امواج بلند ساحل شده به سطح آب افزایش یابد. در این حالت برآیند تابش بلند رسیده به سطح آب بیش‌تر از مقدار تابیده شده از آن می‌شود. به‌همین دلیل  $Rn_l$  با حاصل پارامتر  $Rns$  جمع گشته و به-جای جزء تابش در رابطه پنمن قرار می‌گیرد.

علاوه بر این زمانی که آب داخل مخزن است، درصدی از  $R_s$  که به جداره‌ها می‌رسد، قبل از ورود، منعکس می‌شود که برای در نظر گرفتن آن از ضریب آلبیدوی فلکسی گلاس ( $0/2$ ) استفاده شده است. در ادامه، درصدی از تابش کوتاه رسیده به سطح آب نیز منعکس می‌شود که لازم است هر دو ضریب آلبیدو در نظر گرفته شود.

به‌غیر از تابش کوتاه، باید تابش بلندی که از سطح آب خارج می‌شود و نیز تابش بلندی که از اتمسفر و جداره مخزن به سطح آب وارد می‌شوند محاسبه گردند. در نهایت طبق مطالعات صورت گرفته، برای مخزن تحت پوشش رابطه تابش خالص به این شکل می‌باشد (Gallego et al, 2012):

$$R_{n,c} = (1 - \alpha) R_{sc} + (1 - b)(R_{1a} + R_{1c}) - R_{1w} \quad (12)$$

$$R_{sc} = (1 - \beta) \cdot R_s \quad (13)$$

که در آن  $Rn,c$ : تابش خالص رسیده به سطح آب داخل مخزن ( $MJ/m^2/d$ )،  $b$ : ضریب انعکاس تابش بلند از سطح آب ( $0/03$ ).

$R_{1w}$  و  $R_{1c}$  به ترتیب تابش بلند ساحل شده از سطح جدار مخزن و آب

برآورد تبخیر از مخزن می‌تواند منجر به دستیابی به نتایج دقیق‌تری گردد. به دلیل ممانعت جداره‌ها از ورود باد به داخل مخزن، رطوبت داخل مخزن نسبت به رطوبت هوای خارج آن بیش‌تر بود (شکل ۳) که به دلیل افزایش مقاومت آیرودینامیکی باعث کاهش شدت تبخیر می‌شود.

بررسی عملکرد مدل اصلاح شده پنمن و پریستلی - تیلور در تخمین تبخیر از مخازن خورشیدی:

با اعمال این تفاوت‌ها مدل‌های پنمن (MPE) و پریستلی - تیلور (MPT) برای شرایط داخل مخزن اصلاح شدند. نتایج حاصل با مقادیر تبخیر روزانه اندازه‌گیری شده از مخزن (E) به‌عنوان مقادیر مبنا ارزیابی شدند. شکل ۴ نحوه پراکنش مقادیر تخمینی را در برابر نقاط اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. سپس شدت تبخیر به دست آمده از این معادلات با مقادیر واقعی تبخیر از مخزن مقایسه شدند. هم‌چنین برای بررسی اینکه آیا فرضیات و به تبع آن اصلاحات اعمال شده روی مدل‌ها باعث بهبود تخمین‌ها شده است یا نه، از شاخص‌های آماری ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین انحراف خطا (MBE) استفاده شد.

همانطور که در پراکنش نقاط نشان داده شده است، پارامتر  $R^2$  به‌ترتیب برای مدل‌های MPE و MPT بیش‌تر از PE و PT می‌باشد. جهت معنی‌دار بودن اختلاف بین نتایج مدل‌های مذکور با مدل‌های اصلاح شده آن‌ها، از روش آنالیز واریانس استفاده شد که این آزمون بیانگر اختلاف در سطح ۵ درصد بین نتایج مدل‌ها بود. این موضوع نشان‌دهنده این است که تصحیح صورت گرفته در جزء تابش معادلات مذکور تأثیر مثبت داشته است. هم‌چنین بیش تخمینی محسوسی در پراکنش نقاط مدل‌ها دیده می‌شود که باید دقیق‌تر بررسی شوند. اما برای اینکه دقیق‌تر بتوان روی دقت مدل‌ها بحث کرد لازم است تا شاخص‌های آماری محاسبه شده برای هر کدام از آن‌ها آنالیز شوند.

جدول ۲ مقادیر شاخص‌های آماری بدست آمده برای هر مدل را در خود جای داده است.

در جدول ۱ ضریب همبستگی بین پارامترها نمایش داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهند شدت تبخیر از مخزن دارای ارتباط مستقیم و قوی با پارامترهای دما ( $0/953$ ) و تابش خالص ( $0/87$ ) و همبستگی منفی بالا با رطوبت نسبی ( $-0/807$ ) می‌باشد که نشان‌دهنده تأثیرپذیری بالای شدت تبخیر داخل مخزن به ترتیب از پارامترهای دما، تابش و رطوبت نسبی است.

مقایسه پارامترهای محیطی داخل و خارج مخزن

جداره‌های شفاف فلکسی گلاس باعث عبور بخش زیادی از تابش خورشیدی (ضریب عبورتابش کوتاه  $0/8$ ) می‌شوند و در عین حال قسمت زیادی از امواج بلند را به سطح آب ساطع می‌کند (ضریب گسیل  $0/9$ ). بنابراین شرایطی ایجاد می‌کنند که باعث افزایش دمای هوای داخل مخزن می‌گردد که در شکل ۳- الف به وضوح مشخص است و این افزایش را می‌توان ناشی از اثر گلخانه‌ای دانست. واضح است که جداره مخزن خورشیدی با افزایش دمای محیط داخلی اثر فزاینده‌ای در شدت تبخیر گذاشته‌اند. روند تغییرات دمای هوای خارج و داخل مخزن با یکدیگر تقریباً هماهنگ می‌باشد. هم‌چنین اختلاف بین دمای داخل و خارج مخزن در ماه‌های سرد سال کمتر از ماه‌های گرم‌تر است که این خود باعث می‌شود که اختلاف بین رطوبت آن‌ها نیز کمتر از ماه‌های گرم‌تر شود. این نکته در شکل ۳- ب کاملاً آشکار است.

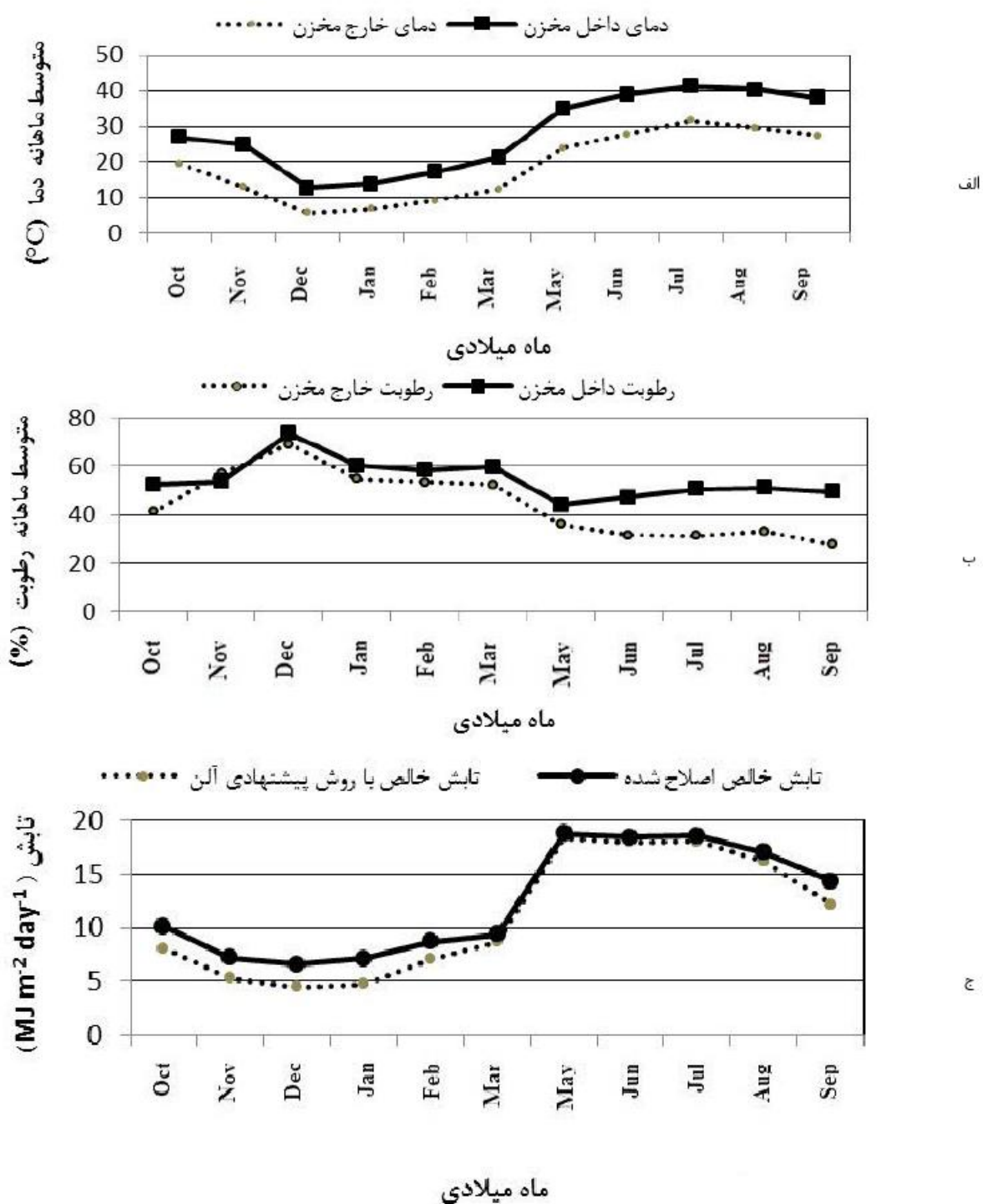
در شکل ۳- ج متوسط ماهانه تابش خالص اصلاح شده ( $Rn,c$ ) در کنار تابش خالص محاسبه شده با استفاده از رابطه آلن و همکاران برای سطوح آزاد آب ( $Rn$ ) رسم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود مقادیر متوسط ماهانه برای هر دو روش در ماه‌های گرم‌تر خیلی به هم نزدیک هستند. دلیل اصلی آن‌را می‌توان ناشی از شدت تابش بالای موجود در منطقه در فصل تابستان دانست. به عبارت دیگر شدت تابش بالا باعث شده است که افزایش تابش خالص در داخل مخزن چندان به چشم نیاید.

همانطور که مشخص شد تابش خالص بعد از دمای هوا، اثر- گذارترین پارامتر روی شدت تبخیر است. لذا تصحیح مقدار آن برای

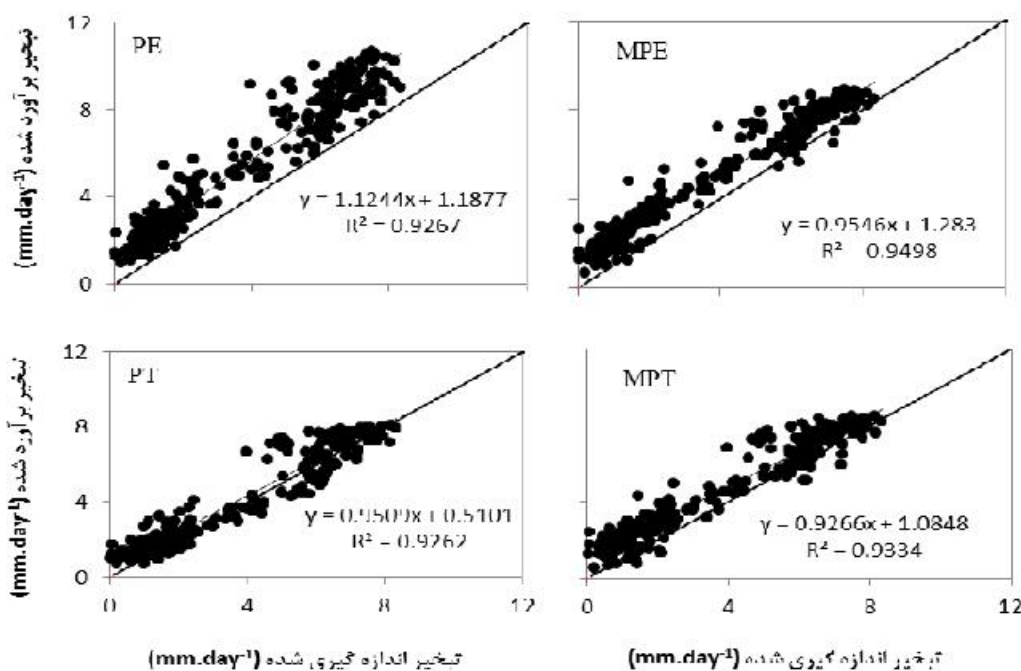
جدول ۲ شاخص‌های آماری بدست آمده از نتایج مدل‌ها

شاخص‌های آماری	PE	MPE	PT	MPT
RMSE(mm day <sup>-1</sup> )	۱/۸۷	۱/۲۵	۰/۷۸	۱/۰۵
MBE(mm day <sup>-1</sup> )	۱/۶۴	۱/۱۱	۰/۳۳	۰/۸۳
R <sup>2</sup>	۰/۹۲۶	۰/۹۵۰	۰/۹۲۶	۰/۹۳۳





شکل ۳ روند تغییرات متوسط ماهانه پارامترهای هواشناسی (الف دما، ب رطوبت، ج تابش خالص) داخل و خارج مخزن



شکل ۴ پراکنش مقادیر تخمینی توسط مدل پنمن اصلاح شده (MPE)، مدل پریستلی تیلور اصلاح شده (MPT)، مدل پنمن (PE) و مدل پریستلی تیلور (PT) در مقابل تبخیر واقعی از مخزن (E)

مخازن توسط مدل ترکیبی پنمن نیاز داریم اجزاء تابش و آیرودینامیک معادله را تصحیح کنیم. از طرفی مدل PT دارای کم‌ترین خطا در برآورد داده‌های تبخیر از مخزن است. اما ضریب تبیین محاسبه شده برای آن (۰/۹۲۶) برابر PE است. به عبارت دیگر تصحیح صورت گرفته روی جزء تابش تا حدودی منجر به افزایش ضریب تبیین MPT و MPE نسبت به PT و PE شده است.

از نتایج به دست آمده بدین صورت می‌توان استنباط کرد که با توجه به شرایط محیطی داخل مخزن، جزء آیرودینامیک معادله PE و MPE در بیش تخمینی مقادیر تبخیر از آن مؤثر است. این نکته در مطالعات سابق روی معادله پنمن و اجزای آن نیز مطرح شده است. همچنین مدل‌های MPE و MPT تقریباً روند یکسانی را در طول ماه‌های مختلف دارند با این تفاوت که مدل MPE دارای ضریب تبیین بالاتری نسبت به سایر مدل‌هاست.

طبق نتایج مطالعات شاتلورث، رابطه پنمن در حالت کلی تبخیر را تحت شرایطی که مقاومت آیرودینامیک بالا باشد، (نظیر سطوح بسیار پهن‌آور آب) حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد بیش‌تر از مقادیر واقعی برآورد می‌کند (Shuttleworth, 1993). به همین دلیل والیانترس (۲۰۰۶) برای حل این مشکل پیشنهاد داد تا از تابع باد پیشنهادی لیناکر (۱۹۹۳) استفاده گردد تا جزء آیرودینامیک بهتر تخمین زده شود (Linacre, 1993). همانطور که در شکل ۵ نشان داده شد رطوبت داخل مخزن نسبت به محیط اطراف بالاتر است که این خود

این نتایج به خوبی نشان می‌دهند که چهار روش دارای دقت‌های نسبتاً متفاوتی هستند. بیش‌ترین RMSE و MBE به ترتیب با مقادیر ۱/۸۷ و ۱/۶۴ میلی‌متر در روز مربوط به مدل PE است و گویای خطای بالای آن در تخمین تبخیر از داخل مخزن می‌باشد. بعد از آن مدل MPE قرار دارد که علی‌رغم داشتن ضریب تبیین بسیار بالا (۰/۹۵۰) در برآورد مقادیر تبخیر از مخزن دارای خطای محاسباتی نیز می‌باشد. علاوه بر این با مقایسه MBE مشخص می‌شود که مدل پنمن دارای بیش‌ترین بیش تخمینی در بین مدل‌ها می‌باشد. بررسی نتایج به دست آمده از مدل‌های PT و MPT گویای این است که خطا در برآورد مقادیر تبخیر کم‌تر از مدل PE و MPE است که دقت برآورد آن نسبت به سایر روش‌ها بیش‌تر است.

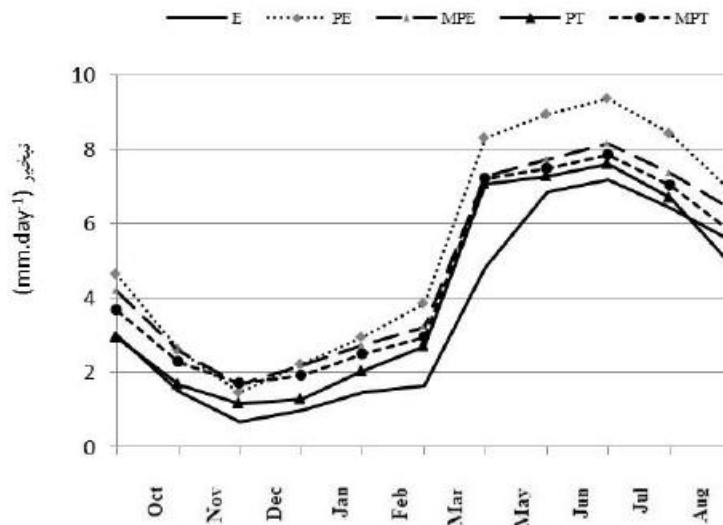
شکل ۵ تغییرات مقادیر تخمینی متوسط ماهانه تبخیر توسط مدل‌ها را در کنار مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در این شکل نیز بیش تخمینی مدل‌ها نسبت به مقادیر واقعی تبخیر از مخزن می‌باشد. به عبارت دیگر شاخص‌های آماری محاسبه شده در جدول ۲ نیز در این شکل به تصویر کشیده شده است. بجز مدل PT که در ماه سپتامبر دچار کم تخمینی شده است سایر مدل‌ها در تمام ماه‌ها تبخیر را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد کرده‌اند.

کم دقت‌ترین مدل PE است که می‌توان گفت چون اثر باد محیط را نیز در برآورد تبخیر از مخزن لحاظ می‌کند دارای خطای بیش‌تری است. این خود گویای این است که برای برآورد تبخیر



پنمن، تابع باد معادله پنمن نیز باید تغییر داده شود و متناسب با شرایط محیط شود تا نتایج بهتری حاصل گردد.

باعث افزایش مقاومت آیرودینامیک در آن محیط می‌شود. باتوجه به موارد مذکور می‌توان گفت که علاوه بر تصحیح قسمت تابش معادله



ماههای اندازه گیری

شکل ۵ روند تغییرات تبخیر برآورد شده نسبت به مقادیر واقعی در ماه‌های مختلف

علیزاده، ا.، ۱۳۸۵. رابطه آب و خاک و گیاه. دانشگاه امام رضا. چاپ ششم.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage. FAO56.

Fazlil, w.f., Boesveld, h. 2009. Evapotranspiration Models in Greenhouse. Master thesis Irrigation and Water Engineering submitted in partial fulfillment of the Master of Science degree Agricultural and Bioresearch Engineering at Wageningen University. Netherlands.

Garcia, R.L. 2002. Seawater desalination driven by renewable energies (a review). Desalination. 143. 103-113.

Gallego, B., Baille, A., Martin, B., Maestre, G.F., Martinez, V. 2012. Evaluation of evaporation estimation methods for a covered reservoir in a semi-arid climate (south-eastern Spain). Journal of Hydrology. 458-459.

Idso, S. 1981. A set of equations for full spectrum and 8 to 14  $\mu\text{m}$  and 10.5 to 12.5  $\mu\text{m}$  thermal radiation from cloudless skies. Water Resour. Res. 19. 295-304.

Linacre, E.T. 1993. Data sparse estimation of potential evaporation using a simplified Penman equation. Agric. Forest Meteorology.

## نتیجه گیری

در این تحقیق از یک مخزن خورشیدی برای بررسی رفتار تبخیر آب‌های شور در مناطق گرم و خشک جنوب شرق تهران به‌عنوان گام نخست در مطالعه و طراحی سیستم آبیاری تراکمی استفاده شد. بعد از مقایسه پارامترهای هواشناسی داخل و خارج مخزن مشخص شد که میزان تابش و دما به‌عنوان فاکتورهای افزایشده تبخیر و رطوبت به‌عنوان فاکتور کاهشده تبخیر در داخل مخزن افزایش یافتند. در ادامه جزء تابش در مدل ترکیبی پنمن و پرستلی - تیلور به‌گونه‌ای تغییر داده شد تا قابلیت تخمین تبخیر از مخزن خورشیدی را با استفاده از پارامترهای معمول هواشناسی پیدا کنند. نتایج به‌دست آمده از مدل - های اصلاح شده با مقادیر واقعی تبخیر از مخزن مقایسه گردید و مشخص شد که دارای دقت قابل قبولی می‌باشند. هم‌چنین نتایج نشان دادند که اصلاح جزء تابش باعث افزایش دقت مدل پنمن شده است. این در حالی است که در مدل پرستلی تیلور این اصلاحات اثر عکس گذاشته و باعث کاهش دقت مدل پرستلی تیلور اصلاح شده گشت.

## منابع

امیدی، س و قهرمان، ب. ۱۳۸۷. نگرشی مجدد در مورد تأثیر شوری بر تبخیر. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۵. ۱۹۳.

- Rahimikhoob.A. 2009. Comparison of estimates of solar radiation from neural network models and angstrom formula for application ETo – a case study in Abureyhan Station, Iran. *Applied Engineering in Agriculture*. 25(5): 671-675.
- Shuttleworth W.J. 1993. *Evaporation*. McGraw-Hill, New York. (Chapter 4). 4.1-4.53.
- Valiantzas.J.D. 2006. Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data. *Journal of Hydrology*. 331. 690-702.
- Vuscovich.M. 2001. Desarrollo de un modelo para determinar evapotranspiración en invernaderos. Tesis Magíster Scientiae. 64 p. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Chillán, Chile.
- Ward.J.C. 1997. evaporation of wastewater from mountain Cabins. Environmental resource center. Colorado state university. Serial number 77. 121-123.
64. 225-237.
- Lindblom.J., Nordell.B. 2007. Underground condensation of humid air for drinking water production and subsurface irrigation. *Desalination*. 203. 417-434.
- Penman.H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London Series A – Mathematical and Physical Sciences*. 193. 120.
- Penman.H.L. 1963. *Vegetation and hydrology* (Technical Communication no. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden) Commonwealth Agricultural Bureaux, Farham Royal. 124. 72.
- Priestley.C.H.B., Taylor.R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Rev.* 100. 81-92.

## Evaluation of Modification Priestley - Taylor and Penman Models Radiation Component to Estimate Evaporation from Solar Stills

A. AhmadiNik<sup>1</sup>, A. Rahimikhoob<sup>2\*</sup>

Received: Nov.17, 2014

Accepted: Apr.22, 2015

### Abstract

The more accurate estimate of evaporation in Solar Stills is considered as an important step in the planning and design of condensation irrigation system in hot and dry region. Since received radiation to evaporation surface is different inside and outside the Still, to initial estimate of evaporation in Stills, can not apply the commonly techniques used in open surface water. The main purpose of this study is modification of Penman model (as a compound and base model to estimate evaporation from open surface) radiation component and Priestley - Taylor model (as a recommended radiation model for estimating evaporation from closed environments such as greenhouses) to estimate the evaporation rate from the Solar Stills. Comparison of measured and estimated values over the one-year period of the study showed that modification the radiation component have a positive effect in more accurate estimate of evaporation from Solar Stills. The results showed that the modified Penman model is capable of estimate evaporation from Still with  $R^2=0.950$ ,  $MBE= 1.116$  (mm/day) and  $RMSE=1.258$  (mm/day).

**Keywords:** Condensation Irrigation System, Desalination, Penman model, Priestley - Taylor model, Saline Water, Solar Stills.

1- Former M.Sc. Student, Drainage and Irrigation Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran

2- Professor of Department of Irrigation and Drainage, College of Aburaihan, University of Tehran

(\*- Corresponding Author; Email: akhob@ut.ac.ir)