

## نگرشی مجدد در مورد تأثیر شوری بر تبخیر

### سمیرا امید<sup>۱</sup> و \*بیژن قهرمان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد، <sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۸۶/۸/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۴/۲

### چکیده

در موارد متعددی چون بیلان آب دریاچه‌ها و مخازن، طراحی حوضچه‌های تبخیر و استخرهای خورشیدی، تأثیر شوری بر تبخیر می‌تواند حائز اهمیت می‌باشد. هدف از این تحقیق، بررسی میزان تأثیر شوری بر تبخیر است. میزان تبخیر از هفت تیمار با شورهای آب شرب (تیمار شاهد)، ۴۰/۶۸، ۶۸/۰۲، ۸۱/۳۷، ۲۰۳/۴۲، ۴۰۶/۸۴، ۶۱۰/۲۶ دسی زیمنس بر متر در ظرفی با سطح مقطع ۶۵۰ سانتی‌متر مربع در یک دوره یک ماهه (۱۳۸۵/۱/۳۰ تا ۱۳۸۵/۲/۲۸) در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد در اراضی همجوار با ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی اندازه‌گیری شد و با استفاده از رگرسیون خطی رابطه‌ای برحسب تبخیر و میزان شوری ارائه گردید. به طور متوسط میزان تبخیر با افزایش شوری کاهش می‌یابد با این وجود تغییر-پذیری این مقادیر با ضریب تغییرات ۰/۲۹ - ۰/۳۳ تقریباً به میزان شوری وابسته نمی‌باشد. همچنین معادلات دالتون و پنمن برای سطوح آب شور با نتایج اندازه‌گیری‌ها مقایسه شد. بررسی‌ها نشان داد تبخیرهای برآوردی با معادله پنمن با مقادیر GSDER نزدیکتر به ۱ (۳/۹-۱/۵) و ME کمتر (۱/۲-۰/۱) نسبت به معادله دالتون با مقادیر GSDER ۵/۸-۲/۴ و ME ۲/۹-۰/۵ شباهت بیشتری با نتایج این تحقیق دارد.

**واژه‌های کلیدی:** تبخیر، شوری، تشت تبخیر، پنمن، دالتون.

### مقدمه

تبخیر از سطوح آب آزاد کاربردهای متعددی دارد. تبخیر از دریاچه‌ها، مخازن و برکه‌ها در بهره‌برداری بهینه از منابع آب مؤثر است. در تبخیر از حوضچه‌های تبخیر و استخرهای خورشیدی برای طراحی این سیستم‌ها حائز اهمیت است. بطور کلی از چهار روش برای تخمین تبخیر استفاده می‌شود:

(الف) روش‌های تجربی که از پارامترهای هواشناسی استفاده کرده و عموماً بر پایه قانون دالتون می‌باشد.  
(ب) روش بیلان آب که بستگی به تخمین جریانهای ورودی و خروجی دارد.  
(ج) روش بیلان انرژی که نیازمند تعیین تمامی اجزای موجود در رابطه با موازنه انرژی می‌باشد.  
(د) روش‌های ترکیبی برای تخمین تبخیر.  
در استفاده از روش‌های تجربی عوامل بی شماری وجود دارند که می‌بایستی در تخمین تبخیر از سطح آزاد آب مد نظر قرار گیرند. در این میان مهمترین

\* - مسئول مکاتبه: [bijangh@ferdowsi.um.ac.ir](mailto:bijangh@ferdowsi.um.ac.ir)

عوامل شامل سطح، عمق آب و شرایط محیط اطراف می‌باشد. معمولاً هر چه سطح از وسعت بیشتری برخوردار باشد میزان تبخیر کمتر خواهد شد، زیرا آب افزوده شده به هوا طی فرایند تبخیر ماهیت هوا را نیز تغییر می‌دهد. عمق بر دمای آب تأثیر می‌گذارد و بخصوص عمق‌های بیشتر موجب سیکل‌های سالانه دمای آب می‌شود که از سیکل دمای هوا عقب‌تر می‌باشند. میزان تبخیر از سطح آب‌ها معمولاً در مناطق خشک، بویژه در مناطقی که جریان‌های افقی انتقال حرارت به میزان قابل ملاحظه‌ای وجود دارد نسبت به مناطق مرطوب بیشتر خواهد بود. تشت تبخیر ساده‌ترین وسیله‌ای است که با آن می‌توان مقدار تبخیر را از یک سطح نسبتاً آزاد به دست آورد. با تقاضاهای تبخیری ثابت اتمسفری، شدت تبخیر از آب‌های شیرین و شور متفاوت خواهد بود. دلیل عمده این تفاوت متفاوت بودن فشار بخار اشباع لایه سطحی آب‌های شیرین و شور است و افزون بر این، آب‌های شور معمولاً گرم‌تر از آب‌های شیرین هستند و فشار بخار اشباع در آب‌های شور باز هم با پارامتر نظیر آب‌های شیرین تفاوت بیشتری خواهد داشت.

تحقیقات متعددی بین دینامیک تبخیر در آب‌های با شوری و دمای مختلف صورت پذیرفته است. هاربک و همکاران (۱۹۵۹) با استفاده از بیلان انرژی مدلی را برای تخمین تبخیر از آب شور به دست آوردند و میزان تبخیر از سطح دریاچه شهر کلرادو را برآورد نمودند. همچنین در تحقیقات مشابهی سیمون و رورباگ (۱۹۷۱) نیز با به کارگیری بیلان انرژی، میزان تبخیر از یک مخزن آب شور در شمال غربی فونتانا را برآورد نمودند. ترک (۱۹۷۰) نشان داد کاهش تبخیر از آب شور به دلیل افزایش ضریب فعالیت آب و انحراف آن از مقدار واحد می‌باشد. مانکاروس (۱۹۷۹) در یک آزمایش ۲۱ روزه در

ایستگاه شکشوک<sup>۱</sup> تبخیر از ۴ تشت مکعب مستطیلی به ابعاد  $0.35 \times 0.5 \times 0.7$  متر را که در یکی از آنها آب شیرین و در بقیه آب دریاچه قارون با شوری‌های متفاوت بود مورد مطالعه قرار داد تا نسبتی بین تبخیر از دریاچه و تبخیر از آب شیرین بدست آورد. نامبرده از ۴ مخزن سنگی با مساحت  $1.44$  متر مربع و عمق  $1/7$  متر شامل آب شیرین نیز برای کنترل آزمایش‌ها استفاده کرد. کالدر و نیل (۱۹۸۴) معادله تجربی تبخیر را برای تبخیر از سطح آب‌های شور اصلاح کردند و با توجه به هیدرولوژی بحرالमित و بررسی موردی، تغییراتی در معادله پیشنهاد کردند. سالهورتا و همکاران (۱۹۸۷) بیان کردند به دلیل دو عامل کاهش فشار بخار اشباع و تا حدودی افزایش دمای سطح آب، تبخیر از سطح آب شور کمتر از آب شیرین است. آنها با تجزیه و تحلیل داده‌های هشت تشت تبخیر با شوری و ترکیبات یونی مختلف این عوامل را به صورت کمی تعیین کردند. استنهل (۱۹۹۴) با استفاده از یک رابطه تجربی برای بحرالमित دریافت تغییر در چگالی آب باعث تغییر تبخیر سالانه از بحرالमित می‌شود. ارود (۱۹۹۵) تبخیر را برای سه دریاچه کم عمق نزدیک بحرالमित با جرم مخصوص‌های متفاوت و برای دریاچه فرضی با آب شیرین با استفاده از مدل پنمن اصلاح شده و مدل نسبت آلفا تخمین زد. آسمار و ارگنزینگر (۱۹۹۹) در پروژه اتصال بحرالमित به دریای سرخ از طریق کانال تحقیقات زیادی انجام دادند. در بخشی از این تحقیق، روشی به منظور تخمین تبخیر از بحرالमित به‌عنوان یک دریاچه خیلی شور لازم داشتند و نمی‌توانستند از روش‌های متداول استفاده کنند. نامبردگان دو روش بر مبنای فرمول پنمن و دالتون را آزمودند و رابطه‌ای به‌منظور تخمین تبخیر تنها برحسب میزان شوری ارائه کردند. علی و همکاران

## مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و نحوه اجرای طرح: منطقه مورد مطالعه در محدوده پردیس دانشگاه فردوسی در اراضی همجوار با ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی واقع شده است. این منطقه دارای طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه در ارتفاعی معادل ۹۸۸ متر از سطح دریا می‌باشد. متوسط پارامترهای اقلیمی در منطقه طرح براساس آمار جوی ارائه شده از سوی ایستگاه هواشناسی مشهد در محدوده سال‌های ۲۰۰۵-۱۹۶۱ موجود است. بر این اساس، متوسط رطوبت نسبی سالانه ۵۶ درصد، متوسط دمای حداقل سالانه ۶/۵ درجه سانتی‌گراد، متوسط دمای حداکثر سالانه ۴۰/۷ درجه سانتی‌گراد، متوسط روزانه دما ۱۳/۸ درجه سانتی‌گراد، حداقل درجه حرارت مطلق ۴۰/۷- درجه سانتی‌گراد و حداکثر درجه حرارت مطلق ۴۱/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

برای تعیین اثر شوری بر تبخیر، از ۱۴ ظرف مکعب مستطیل به ابعاد ۱۲×۲۵/۴×۲۵/۴ سانتی‌متر از جنس آهن گالوانیزه که دارای ارتفاع و حجم‌های برابر بودند استفاده شد. پس از آماده شدن ظرف‌ها به صورت زوج و به طور متوالی در یک سطح صاف قرار داده شدند. ظرف‌ها شماره گذاری شده و در هر ظرف (تیمار با دو تکرار) مقدار نمک لازم ریخته شد و با آب به صورت محلول درآورده شد. زمانی که نمک در تمامی ظرف‌ها به طور کامل حل شد، آزمایش شروع گردید. جدول ۱ شوری آب در تیمارهای آزمایش را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری میزان تبخیر در هر ظرف از پیست نیم لیتری استفاده گردید. در زمان اندازه‌گیری (۶ صبح)، مقدار حجمی را که توسط تبخیر در مدت ۲۴ ساعت گذشته کاهش پیدا نموده بود بوسیله پیست اندازه‌گیری و به همان اندازه آب شیرین به ظرف‌ها اضافه گردید.

(۲۰۰۱) برای کنترل شوری دریاچه و نمکی که در سطح آب نمایان است مدلی را شبیه‌سازی نمودند. این مدل برای تخمین تبخیر از سطح دریاچه که شامل بخش‌هایی با شوری متفاوت بود ارائه گردید. این مدل تأثیر شوری بر تبخیر را تحت فشار بخار اشباع به طور ماهانه و سالانه نشان می‌دهد. عبدالعلی و النعمان (۲۰۰۱) میزان شدت تبخیر از آب شور را در واحدهای نمک‌زدایی خورشیدی چند منظوره مورد آزمایش قرار دادند. در این آزمایش به وسیله جریان دینامیکی از آب شور و در کانال‌های جدا و تحت گرمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد شدت تبخیر را اندازه‌گیری کردند و با استفاده از نتایج بدست آمده، رابطه بین نسبت شوری و تبخیر را مشخص و در ماشین‌های نمک‌زدایی مورد استفاده قرار دادند. موتونایاگام و همکاران (۲۰۰۴) در منطقه‌ای در کشور هند برای تبخیر آب شور تحت دما و فشار کم مدلی را ارائه نمودند که هدف آن نمک‌زدایی از آب دریا در دمای ۲۶ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد بود. در این آزمایش میزان آب آشامیدنی به دست آمده ۳ تا ۴ درصد اندازه‌گیری گردید که با مقداری که مدل پیشنهاد داده بود مطابقت فوق‌العاده‌ای برقرار بود.

در مراجع مختلف نسبت‌های ساده و یا خطوط رگرسیون بین شوری آب (متغیر مستقل) و نسبت تبخیر آب شور به آب شیرین (متغیر وابسته) ارائه شده است. در استفاده از این معادلات می‌باید به جنس و ابعاد ظرف‌های تبخیر و همچنین نوع ترکیب یونی مؤثر بر ضریب فعالیت محلول نیز توجه داشت. عامر (۱۹۹۲) و مانکاروس (۱۹۷۹) گزارش شده توسط علی و همکاران، (۲۰۰۱) روابط و نسبت‌های ثابتی را گزارش کردند. بنابراین بررسی منابع نشان می‌دهد که هنوز یک روش قطعی و مطمئن برای تبیین تأثیر کمی شوری بر تبخیر وجود ندارد. هدف از این مقاله مقایسه روش‌های مختلف و تلاشی در جهت یافتن یک راه‌حل مطمئن می‌باشد.

جدول ۱- شوری آب (دسی‌زیمنس بر متر) در تیمارهای آزمایش.

شماره تیمار	*۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
شوری آب	۲	۴۱	۶۸	۸۱	۲۰۲	۴۰۷	۶۱۰

\*شوری آب شرب در این آزمایش تقریباً ۲ دسی‌زیمنس بر متر بود.

اشباع برحسب  $\text{in Hg}$  و  $u_w$  برحسب  $\text{m/hr}$  که در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین اندازه‌گیری شده است می‌باشد (گری و همکاران، ۱۹۷۰). به دلیل کوچک بودن ظرف‌ها در این آزمایش از تابع باد پنمن در محاسبات استفاده شد. در ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی سرعت باد در کنار تشت تبخیر کلاس A و در ارتفاع ۰/۵ متری از سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین با استفاده از رابطه  $U_2/U_Z = (2/Z)^{0.15}$  سرعت باد در ارتفاع ۰/۵ متری به سرعت باد در ارتفاع ۲ متری تبدیل و در محاسبات استفاده شد.

فشار بخار اشباع بالای سطح مایع تابعی از دما بوده و می‌تواند از رابطه هیلندز و وکسلر (۱۹۸۳) محاسبه شود:

$$e_{\text{sat}}(T) = 10 \exp \left\{ \frac{F_1 T^{-1} + F_2 + F_3 T + F_4 T^2}{F_5 T^3 + F_6 \ln(T)} \right\} \quad (3)$$

که در آن  $e_{\text{sat}}(T)$  فشار بخار اشباع برحسب  $\text{mbar}$  و  $T$  درجه حرارت برحسب درجه کلونین ( $^{\circ}\text{K}$ )،  $F_1$  تا  $F_6$  پارامترهای ثابت که به ترتیب معادل  $10^{+3} \times 0.62208 \times 10^{-5}$ ،  $10^{+3} \times 0.580022 \times 10^{-4}$ ،  $10^{+3} \times 0.5167256 \times 10^{-2}$ ،  $10^{-2} \times 0.239 \times 10^{-4}$ ،  $10^{-8} \times 0.93 \times 10^{-4}$  و  $10^{-3} \times 0.673 \times 10^{-5}$  می‌باشند.

نمک‌های محلول در آب انرژی مولکول‌های آب را کاهش می‌دهند که نتیجه آن کاهش تبخیر آب می‌باشد. با افزایش شوری، فشار بخار اشباع نیز در سطح آب شور کاهش می‌یابد. به منظور نشان دادن کاهش فشار بخار اشباع در نتیجه شوری می‌توان از ضریب فعال آب ( $\beta$ ) استفاده کرد. آلاگو و همکاران (۱۹۹۴) ضریب  $\beta$  را به صورت معادله چند جمله‌ای درجه دوم از درصد شوری ( $S$ ) بیان کردند:

در نتیجه شوری ظرف‌ها در طول آزمایش برابر شوری نمونه‌های اولیه باقی ماند. حجم آب مصرفی برابر با مقدار تبخیر بود. بدین ترتیب میزان تبخیر متناسب با مقدار غلظت نمک هر ظرف در ۳۰ روز متوالی (۳۰ فروردین تا ۲۸ اردیبهشت ۱۳۸۵) اندازه‌گیری گردید. در طول مدت آزمایش برای عدم دسترسی پرنندگان و یا دیگر جانوران موجود در ایستگاه، سطح ظرف‌های آزمایش با یک توری به صورت کامل پوشانده شده بود. از تشت تبخیر کلاس A موجود در ایستگاه هواشناسی به‌عنوان کنترل اندازه‌گیری‌ها استفاده شد.

### نظریه‌های برآورد تبخیر

**الف) قانون دالتون:** سرعت تبخیر از واحد آب شیرین می‌تواند با استفاده از روش انتقال جرم بر مبنای قانون دالتون محاسبه شود:

$$E_{\text{fw}} = [f(u_w)] \{ e_{\text{sat}}(T_{\text{fw}}) - [RH] [e_{\text{sat}}(T_a)] \} \quad (1)$$

که در آن  $f(u_w)$  تابع باد می‌باشد و معمولاً تجربی است،  $RH$  رطوبت نسبی،  $e_{\text{sat}}(T_a)$  و  $e_{\text{sat}}(T_{\text{fw}})$  ترتیب فشار بخار آب در دمای آب شیرین ( $T_{\text{fw}}$ ) و دمای هوا ( $T_a$ ) می‌باشد. در این رابطه  $\{ e_{\text{sat}}(T_{\text{fw}}) - [RH] [e_{\text{sat}}(T_a)] \}$  عبارت مربوط به کمبود بخار اشباع است. تابع باد  $f(u_w)$  معمولاً به صورت تابع خطی از سرعت باد بیان می‌شود:

$$f(u_w) = C_1 + C_2 u_w \quad (2)$$

که در آن  $C_1$  و  $C_2$  ضرایب تجربی هستند (نپ، ۱۹۸۵). پنمن (۱۹۴۸) برای تخمین تبخیر از ظرف‌های کوچک از  $C_1 = 0.35$  و  $C_2 = 0.084$  استفاده کرد. در این صورت  $E_{\text{fw}}$  در معادله برحسب  $\text{in/day}$ ، فشار بخار

(۶)

$$E_{sal} = \frac{\Delta'}{\gamma + \Delta'} \cdot \frac{R_n}{\lambda_v \rho_w} + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta'} \cdot K_E V_a (e_a \beta (T_a) - e_a)$$

که در آن  $E_{sal}$  تبخیر از سطح آب شور،  $\Delta'$  شیب منحنی فشار بخار اشباع برای سطح شور ( $kPa^{\circ}C^{-1}$ )،  $\gamma$  ثابت سایکرومتری ( $kPa^{\circ}C^{-1}$ ) (معادله ۷)،  $R_n$  تابش خالص ( $MJ m^{-2} day^{-1}$ ) (معادله ۸)، براساس روش هارگریوز و سامانی، آلن و همکاران، (۱۹۹۸)،  $\lambda_v$  گرمای نهان تبخیر ( $MJ kg^{-1}$ )،  $\rho_w$  چگالی آب ( $kg m^{-3}$ )،  $K_E$  ضریب انتقال گرمای نهان ( $msm^{-1} kPa^{-1} day^{-1}$ ) (معادله ۹، دینگمن، ۲۰۰۲)  $V_a$  سرعت باد روی سطح تبخیر ( $m s^{-1}$ )،  $e_a$  فشار بخار هوا ( $kPa$ ) و  $\beta$  ضریب فعال آب می باشد (آلاگو و همکاران، ۱۹۹۴).

$$\gamma = \frac{1615 P_a}{2.49(10)^6 - 2.13(10)^3 T_a} \quad (۷)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (۸)$$

(۹)

$$K_E = \frac{0.622 \cdot \rho_a}{P \cdot \rho_w} \cdot \frac{1}{6.25 \times \left[ \ln \left( \frac{Z_m - Z_d}{Z_o} \right) \right]^2}$$

در معادله ۷،  $T_a$  دمای هوا (درجه سانتی گراد)،  $P_a$  فشار هوا ( $101.3 \left[ \frac{293 - 0.0065Z}{293} \right]^{5.256}$ ) بر حسب  $kPa$  و  $Z$  ارتفاع محل از سطح دریا ( $m$ ) می باشد.

در معادله ۸،  $R_{ns}$  و  $R_{nl}$  به ترتیب تابش طول موج کوتاه خالص خورشیدی و تابش طول موج بلند خروجی خالص ( $MJ m^{-2} day^{-1}$ ) می باشند و براساس روش هارگریوز و سامانی به ترتیب از معادلات ۱۰ و ۱۱ تخمین زده می شوند.

در معادله ۹،  $\rho_a$  و  $\rho_w$  به ترتیب چگالی هوا و آب ( $kg m^{-3}$ )،  $P$  فشار هوا ( $kPa$ )؛  $Z$  ارتفاع از سطح دریا ( $m$ )،  $Z_m$  ارتفاع اندازه گیری سرعت باد ( $m$ )،  $Z_d$  جابجایی سطح صفر ( $m$ ) و  $Z_o$  ارتفاع زبری سطح ( $m$ ) است. بروتسارت (۱۹۸۲) مقادیر  $Z_o$ ،  $Z_d$  و  $Z_m$  را به ترتیب  $10^{-4} \times 2/30$  متر، ۰ و ۲ متر پیشنهاد کرد.

$$\beta = 1 + aS + bS^2 \quad (۴)$$

ضرایب  $a$  و  $b$  در این معادله به نوع نمک بستگی دارند که برای کلرور سدیم به ترتیب  $0.0407$  و  $-0.4$  می باشد. در شرایطی که بیش از یک نوع نمک در آب موجود باشد،  $\beta$  را می توان با استفاده از میانگین وزنی به دست آورد. با استفاده از  $\beta(S)$  (یعنی نسبت فشار بخار اشباع در سطح آب شور به فشار بخار اشباع در سطح آب شیرین)، می توان معادله (۱) را به منظور برآورد تبخیر از آب های شور تصحیح کرد:

(۵)

$$E_{sal} = [f(uw)] \{ \beta(S) e_{sat}(T_{sat}) - [RH] [e_{sat}(T_a)] \}$$

که در آن  $T_{sat}$  درجه حرارت آب شور و  $e_{sat}(T_{sat})$  فشار بخار اشباع متناظر با این دما می باشد.

برای محاسبه تبخیر به روش انتقال جرم در هر دو معادله (۱) و (۵) به درجه حرارت آب نیاز است که علی الاصول با دمای هوا یکسان نمی باشد. ما در این آزمایش نتوانستیم درجه حرارت آب را در تیمارهای مختلف اندازه گیری نمائیم. آلاگو و همکاران (۱۹۹۴) یک استخر خورشیدی را طراحی نمودند بر اساس مقاله منتشر شده نامبردگان، درجه حرارت در دوره زمانی ۴-۱۰ فوریه ۱۹۹۴ در تشت تبخیر کلاس الف، استخر تبخیری و هوا به ترتیب  $25/54$ ،  $28/85$  و  $24/34$  درجه سانتی گراد بود. با این اطلاعات دمای آب شیرین  $1/05$  برابر دمای هوا می باشد، با فرض برابر بودن دمای آب در تیمارهای مختلف با  $0/87$  دمای آب شیرین، دمای هر کدام از تیمارها در روزهای آزمایش بدست آمد.

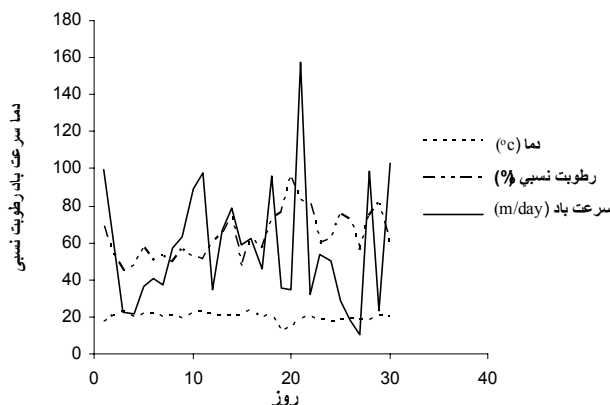
**ب) معادله پنمن:** براساس این معادله، معادله توازن انرژی برای محاسبه تبخیر از سطح آب برمبنای شرایط هوای بالای سطح تبخیر می باشد. فرض می شود دمای سطح و فشار بخار با استفاده از دمای هوا، رطوبت و شیب منحنی فشار بخار اشباع - دما تخمین زده می شود (دینگمن، ۲۰۰۲). معادله اصلاح شده پنمن برای آب های شور با رابطه زیر بیان می شود (محمد، ۲۰۰۶):

$G_{sc}=0.082 \text{ (m}^{-2} \text{ min}^{-1})$  فاصله نسبی زمین تا خورشید،  $d_r = 1 + 0.033 \cos(J 2\pi/365)$  و  $J$  شماره روز ژولیوسی است،  $\phi$  عرض جغرافیایی (رادیان)،  $\omega_s$  زاویه ساعتی غروب خورشید (رادیان)،  $\delta$  زاویه میل خورشید (رادیان)،  $\omega_s = \arccos[-\tan(\phi)\tan(\delta)]$   $\delta = 0.409 \sin(J 2\pi/365 - 1.39)$  می‌باشد.

به دلیل عدم امکان اندازه‌گیری دمای آب در تیمارهای آزمایش، از روش زیر برای این منظور استفاده گردید: براساس اطلاعات نقطه‌ای مولالیت (M) با دمای محلول اشباع (T) برحسب نوع ترکیب یونی (لاید، ۲۰۰۲)، رابطه‌ای به صورت  $(M=0.0038T+6.0651; R^2=0.9834, n=7)$  برآورد شد. در نتیجه مولالیت محلول اشباع هر کدام از تیمارها در روزهای آزمایش برآورد شد. سپس با استفاده از رابطه خطی بین دمای محلول و درصد اشباع (آلاگو و همکاران، ۱۹۹۴)  $(T_s/T_a = 0.136S + 1.0493)$ ، دمای هر کدام از تیمارها در روزهای آزمایش به دست آمد.  $T_a$  و  $T_s$  به ترتیب دمای آب شور و دمای هوا و  $S$  درجه اشباع می‌باشد.

## نتایج و بحث

پارامترهای هواشناسی: شکل ۱ روند تغییر پارامترهای هواشناسی مؤثر بر تبخیر (دما، رطوبت نسبی و سرعت باد) در خلال دوره آزمایش در محل آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱- تغییرات زمانی دما، رطوبت نسبی و سرعت باد در دوره آزمایش (روز ۱/۳۰/۱۳۸۵).

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (10)$$

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

در معادله ۱۰،  $\alpha$  ضریب بازتاب تابش موج کوتاه (آلبیدو) می‌باشد که شاتلورث (۱۹۹۳) مقدار  $0.08$  را برای آب آزاد پیشنهاد کرده است. عامل  $R_s$  (تابش ورودی) در این رابطه براساس پیشنهاد هارگریوز و سامانی به صورت  $R_s = K_{RS} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a$  است ( $K_{RS}$  ضریب تصحیح و به ترتیب برای نواحی داخلی و ساحلی  $0.16$  و  $0.19$ ،  $T_{min}$  و  $T_{max}$  به ترتیب دمای حداکثر و حداقل هوا (درجه سانتی‌گراد) و  $R_a$  تابش برون زمینی برحسب  $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  (معادله ۱۲) می‌باشد).

در معادله ۱۱،  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمن  $(\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1})$   $\sigma=4.903 \times 10^{-9}$ ،  $e_a$  فشار بخار واقعی،  $R_s$  تابش ورودی،  $R_{so}$  تابش خورشیدی در آسمان صاف،  $R_{so}=(a_s+b_s)R_a(\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1})$  با  $a_s=0.25$  و  $b_s=0.05$  (شاتلورث، ۱۹۹۳) می‌باشد.  $T_{min}$  و  $T_{max}$  نیز قبلاً تعریف شده‌اند.  $(12)$

$$R_a = \frac{(24)(60)}{\pi} G_{sc} d_r \left[ \omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) \right]$$

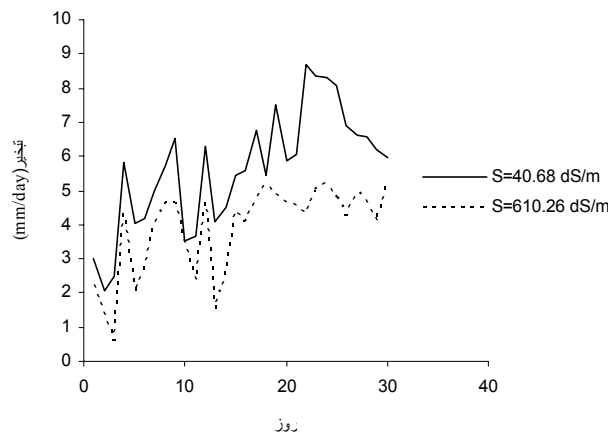
در معادله ۱۲،  $G_{sc}$  ثابت خورشیدی؛ (MJ

بر اساس شکل ۱، رطوبت نسبی با تغییر دما به طور معکوس کم و زیاد می‌شود. کاهش دما، کم شدن ظرفیت را به دنبال دارد و اگر ظرفیت پذیرش بخار آب در هوا کاهش یابد رطوبت نسبی هوا افزوده می‌شود. ویژگی‌های آماری داده‌های هواشناسی که نوسانات آنها در شکل ۱ ارائه شده است، در جدول ۲ درج گردیده است.

**تبخیرهای اندازه‌گیری شده:** شکل ۲ روند تغییرات زمانی تبخیر اندازه‌گیری شده مربوط به تنها دو تیمار را نشان می‌دهد. نتایج مربوط به سایر تیمارها روند مشابهی داشت.

جدول ۲- آمار توصیفی پارامترهای هواشناسی در طول آزمایش.

پارامتر	دما (درجه سانتی‌گراد)	رطوبت نسبی (درصد)	سرعت باد در ۲ متری (متر بر روز)
میانگین	۱۹/۷	۶۳/۲	۵۷/۲
انحراف معیار	۲/۲۳	۱۲/۴۵	۳۲/۵۸
ضریب تغییرات	۰/۱۱	۰/۲۰	۰/۵۷



شکل ۲- روند تغییرات زمانی تبخیر از سطح آب با شوری‌های ۴۰/۶۸ و ۶۱۰/۲۶ دسی زیمنس بر متر.

جدول ۳- آمار توصیفی تیمارهای آزمایش در طی اندازه‌گیری.

پارامتر	تیمار						
	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
شوری (دسی‌زیمنس بر متر)	۶۱۰/۲۶	۴۰۶/۸۴	۲۰۳/۴۲	۸۱/۳۷	۶۱/۰۲	۴۰/۶۸	آب شرب
متوسط تبخیر (میلی‌متر بر روز)	۳/۸۸	۴/۴۷	۴/۷۴	۴/۸۹	۵/۱۸	۵/۶۴	۵/۳۸
انحراف معیار	۱/۳۰	۱/۴۰	۱/۴۴	۱/۴۱	۱/۵۱	۱/۷۳	۲/۵۲
ضریب تغییرات	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۳۰	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۳۱	۰/۳۰

کاربرد معادله پنمن: اگر سرعت تبخیر از واحد آب شور با استفاده از معادله پنمن (معادله ۶) محاسبه شود، معادله تبخیر و میزان شوری مطابق معادله ۱۳ خواهد بود (STDEV) انحراف معیار و STD خطای استاندارد رگرسیون می باشد):

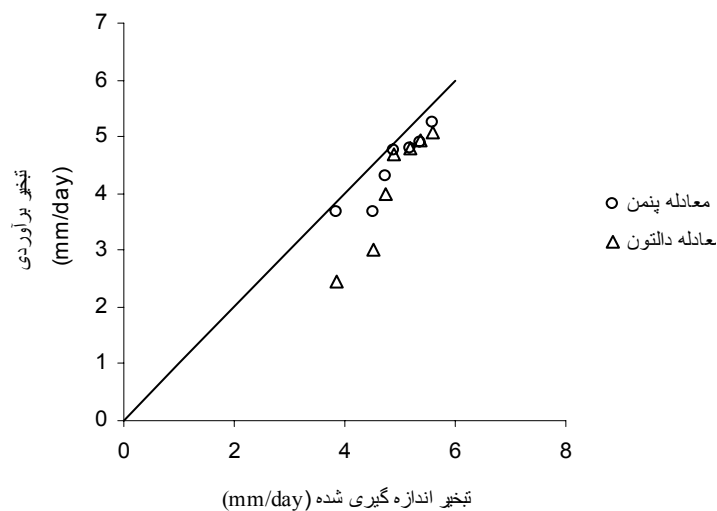
(۱۳)

$$R^2=0.9004; n=7; \underline{STDEV=0.6159}; \\ E_{sal} = -0.0026S + 4.9976 \quad \underline{STD=0.2134}$$

که در آن  $E_{sal}$  میزان تبخیر از آب شور بر حسب میلی متر،  $S$  میزان شوری آب بر حسب دسی زیمنس بر متر می باشد.

مقایسه تبخیر برآورد شده براساس معادله پنمن و تبخیر اندازه گیری شده از طرفها در شکل ۳ نشان داده شده است. شاخص های آماری تعیین صحت و اعتبار معادله نیز در جدول ۴ آورده شده است. نسبت خطای

متوسط هندسی (GMER) برابر با یک حاکی از تطابق کامل میان مقادیر اندازه گیری شده و تخمین زده شده است. GMER کمتر از یک نشان دهنده کمتر بودن مقادیر تخمینی از مقادیر اندازه گیری شده می باشد و بالعکس. نسبت خطای انحراف استاندارد هندسی (GSDER) برابر با یک بیانگر دقیق ترین حالت ممکن است و با انحراف مقادیر پیش بینی شده از مقادیر اندازه گیری شده، افزایش می یابد. بر این اساس مشاهده می شود تبخیر محاسبه شده از معادله پنمن در سطح شوری  $81/37 \text{ dS/m}$  دقیق تر می باشد. در این معادله در تیمارهای شور دقت معادله از سطح شوری  $81/37 \text{ dS/m}$  تا  $40/68 \text{ dS/m}$  افزایش سطح شوری  $81/37 \text{ dS/m}$  پس از آن با افزایش سطح شوری دقت معادله در برآورد تبخیر کاهش می یابد.



شکل ۳- رابطه تبخیر محاسبه شده با استفاده از معادلات پنمن و دالتون و تبخیر اندازه گیری شده از طرفهای آزمایش.

جدول ۴- شاخص های آماری صحت و اعتبار معادله پنمن.

شاخص*	شوری (دسی زیمنس بر متر)					
	۴۰/۶۸	۶۱/۰۲	۸۱/۳۷	۲۰۳/۴۲	۴۰۶/۸۴	۶۱۰/۲۶
R	-۰/۳۲	-۰/۳۱	-۰/۲۹	-۰/۴۹	-۰/۶۰	-۰/۱۱
RMSE	۲/۱۵۵	۱/۸۳۶	۱/۶۹۸	۲/۰۶۶	۲/۶۱۷	۳/۶۱۳
ME	۰/۷۵۴	۰/۳۷۲	۰/۱۵۰	۰/۳۶۱	۰/۸۵۴	۱/۱۹۹
GMER	۰/۹۰۵	۰/۹۶۸	۱/۰۱۰	۰/۹۶۰	۰/۷۷۵	۱/۰۱۲
GSDER	۱/۵۴۲	۱/۵۳۸	۱/۵۳۰	۱/۷۱۷	۲/۴۱۵	۳/۸۹۰

\* R ضریب همبستگی، RMSE ریشه میانگین مربعات خطا، ME میانگین خطا، GMER نسبت خطای متوسط هندسی و GSDER نسبت خطای انحراف استاندارد هندسی است.



**کاربرد معادله دالتون:** اگر سرعت تبخیر از واحد آب شور با استفاده از روش انتقال جرم بر مبنای قانون دالتون (معادله ۵) محاسبه شود، معادله تبخیر و میزان شوری مطابق رابطه (۱۴) خواهد بود:

$$\text{STDEV}=0.8970, R^2=0.9862, \quad (14)$$

$E_{sal} = -0.0045S + 5.0296$   $n=7$   $\text{STE}=0.1374$  که در آن  $E_{sal}$  میزان تبخیر از آب شور بر حسب mm و S میزان شوری آب بر حسب dS/m می باشد.

مقایسه تبخیر اندازه گیری شده بر اساس قانون دالتون و تبخیر اندازه گیری شده از ظرف ها در شکل ۳ آورده شده است. مشاهده می شود که تبخیر برآورد شده از معادله دالتون با مقادیر اندازه گیری شده با افزایش سطح شوری تفاوت بیشتری

می گیرد. یک دلیل محتمل برای این تفاوت در اختیار نداشتن مقادیر واقعی دمای آب در تیمارهای شور می باشد. در این صورت هرچه میزان شوری کمتر باشد این تفاوت نیز کمتر است. شاخص های آماری تعیین صحت و اعتبار معادله دالتون در جدول ۵ آورده شده است. بر اساس اطلاعات این جدول تبخیر محاسبه شده از معادله دالتون برای تیمار شاهد دقیق تر است و با افزایش شوری این دقت کاهش می یابد (به استثنای شورترین تیمار، دقت معادله در برآورد تبخیر افزایش می یابد)، این موضوع با فرضیاتی که برای محاسبه دمای سطح آب تیمارها گرفته شد قابل توضیح است.

جدول ۵- شاخص های آماری صحت و اعتبار معادله دالتون.

شاخص*	۴۰/۶۸	۶۱/۰۲	۸۱/۳۷	۲۰۳/۴۲	۴۰۶/۸۴	۶۱۰/۲۶	آب شرب
R	-۰/۵۱	-۰/۴۵	-۰/۴۶	-۰/۵۴	-۰/۴۶	-۰/۴۶	-۰/۴۸
RMSE	۴/۲۶۰	۳/۹۵۷	۳/۸۶۴	۳/۹۹۹	۴/۲۶۷	۴/۶۲۵	۴/۰۶۰
ME	۰/۹۲۲	۰/۵۶۵	۰/۳۷۸	۰/۹۷۸	۲/۱۳۱	۲/۹۶۳	۰/۴۹۲
GMER	۱/۰۰۷	۱/۰۱۷	۱/۰۱۷	۱/۰۰۹	۰/۹۷۳	۱/۰۰۰	۱/۰۰۲
GSDER	۲/۵۵۲	۲/۵۰۹	۲/۵۲۹	۳/۸۹۶	۵/۷۷۴	۳/۴۴۴	۲/۳۸۱

\* شاخص ها به شرح جدول ۴ می باشد.

**رابطه شوری و تبخیر:** با تحلیل های آماری و اعمال رگرسیون روی داده ها، معادله تبخیر و میزان شوری به صورت زیر می باشد:

$$\text{STDEV}=0.1076, R^2=0.9167, n=7, \quad (15)$$

$E_{sal}/E_{fw} = -0.0004S + 0.959$   $\text{STE}=0.1870$  که در آن S میزان شوری آب (dS/m) و  $E_{sal}/E_{fw}$  نسبت تبخیر از آب شور به تبخیر از آب شیرین است.

عامر (۱۹۹۲) با استفاده از داده های مانکاروس (۱۹۷۹) یک رابطه ریاضی بین نسبت سرعت تبخیر از آب شور ( $E_{sal}$ ) به سرعت تبخیر از آب شیرین

( $E_{fw}$ ) و شوری آب دریاچه (S برحسب  $\text{mg l}^{-1}$ ) بدست آورد:

$$E_{sal}/E_{fw} = 1 - 0.22S \quad (16)$$

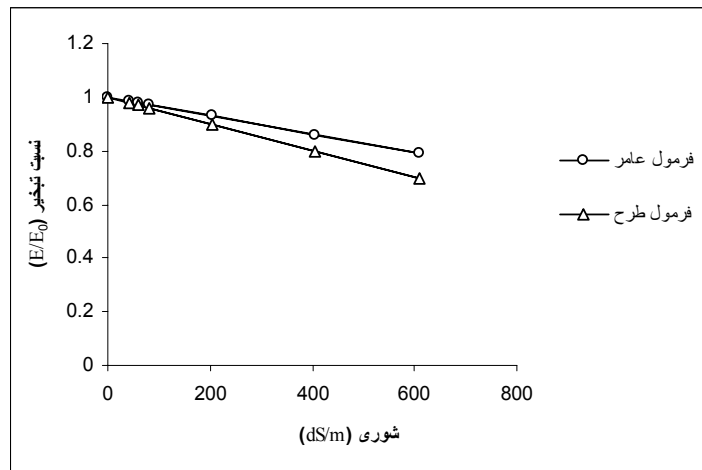
مانکاروس (۱۹۷۹) سرعت تبخیر ماهانه به سرعت تبخیر اندازه گیری شده از ۱۴۴ متر مربع مخزن آب شیرین را مبنای قرار داد و مقدار ۰/۹ را برای  $E_{sal}/E_{fw}$  بکار برد.

نتایج به دست آمده از این آزمایش با فرمول عامر (۱۹۹۲) که برای تخمین میزان تبخیر از سطح دریاچه قارون در مصر ارائه شده است مورد مقایسه قرار گرفت که نمودار حاصل از آن در شکل ۴ ارائه

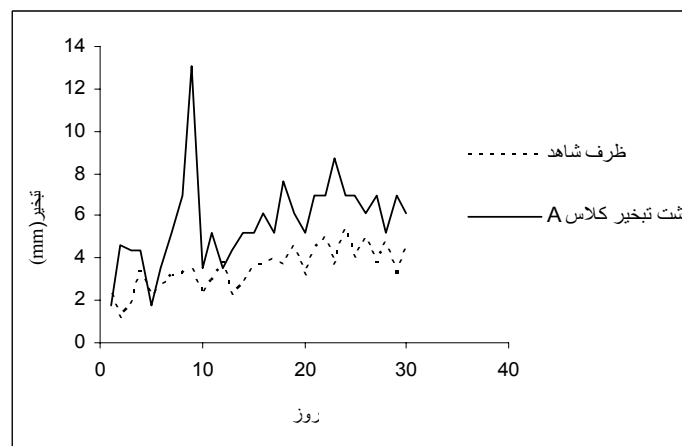
شده است. در مقادیر شوری کم فرمول طرح (رابطه ۱۴) و فرمول عامر برآورد تقریباً یکسانی برای تبخیر دارند ولی با افزایش میزان شوری تفاوت تبخیر محاسبه شده از فرمول عامر و فرمول طرح بیشتر می شود. احتمال داده می شود تفاوت در جنس و اندازه ظروف دلیل این تفاوت باشد.

مقایسه میزان تبخیر از ظرف شاهد با تست تبخیر کلاس A: میزان تبخیر از ظرف شاهد با میزان تبخیر از تست تبخیر کلاس A با هم مقایسه گردید که در شکل ۵ نشان داده شده است. اطلاعات تبخیر اندازه گیری شده حاوی عددی در روز هشتم آزمایش است که به مقدار بسیار

زیادی با بقیه اعداد تفاوت دارد. پارامترهای هواشناسی در این روز تفاوت معنی داری با روزهای مجاور این روز نداشتند. بنابراین می توان استنباط کرد که مقدار تبخیر گزارش شده برای این روز صحیح نمی باشد. شکل ۵ نشان می دهد که میزان تبخیر برآورد شده از تست تبخیر کلاس A بیشتر از تبخیر از ظرف شاهد می باشد. احتمالاً یکی از دلایل آن، بزرگتر بودن سطح جانبی تست تبخیر کلاس A نسبت به ظرف شاهد است که جذب بیشتر تابش خورشید را به دنبال دارد و سبب می شود انرژی بیشتری به مولکول های آب برای تبخیر نسبت به ظرف شاهد داده شود.



شکل ۴- مقایسه فرمول عامر با فرمول طرح.



شکل ۵- مقایسه میزان تبخیر از تست تبخیر کلاس A با ظرف شاهد در مدت آزمایش (روز ۱=۱۳۸۵/۱/۳۰).

## نتیجه گیری

ظروفی با ابعاد یکسان  $12 \times 25 / 4 \times 25 / 4$  سانتی متر تهیه شد و آب با شوری های  $40/68$ ،  $68/02$ ،  $81/37$ ،  $203/42$ ،  $406/84$  و  $610/26$  دسی زیمنس بر متر در آنها ریخته شد. از آب شرب به عنوان تیمار شاهد استفاده شد. اندازه گیری ها نشان داد در طول یک ماه (از  $1385/1/30$  تا  $1385/2/28$ )، تبخیر به طور معکوس و خطی با شوری رابطه داشت. نتایج با آنچه در منابع گزارش شده است تفاوت هایی نشان می دهد که ممکن است به دلیل نوع و اندازه ظروف باشد. معادلات پنمن و دالتون برای آب شور تحلیل شد و میزان تبخیر توسط آنها نیز برآورد شد. فرمول پنمن، تبخیر را مقدار اندکی کم برآورد نمود ولی تفاوت چشمگیری با اندازه گیری ها نداشت. از طرف دیگر تبخیرهای برآورد

شده با فرمول دالتون تفاوت قابل ملاحظه ای با نتایج این تحقیق داشت که ممکن است به دلیل عدم اندازه گیری دمای آب در تیمارهای آزمایش باشد.

- با استفاده از معادله به دست آمده می توان در مناطقی که امکان استفاده از آب شیرین در تحت تبخیر نمی باشد از آب شور با تعیین میزان شوری آن استفاده کرد و میزان تبخیر را با تقریب خوبی بدست آورد.
- نتایج، در نمک زدایی از سطح آب دریاچه کاربرد فراوانی دارد.
- باید توجه داشت که این معادله مربوط به یک ناحیه جغرافیایی با مشخصات مربوط به خود می باشد و تنها برای نواحی مشابه می تواند به کار رود.
- در استفاده از معادله باید به جنس و ابعاد ظرف های تبخیر و نوع ترکیب یونی آب توجه داشت.

## منابع

1. Abdel-Ali, H.K., and AL-Naafam, A. 2001. Enhanced evaporation of saline water in multipurpose solar desalination units. Department of Chemical Engineering, King Fahad University of Petroleum and Minerals, Dhahran Saudi Arabia
2. Alagao, F.B., Akbarzadeh, A., and Johnson, P.W. 1994. The design, construction, and initial operation of a closed-cycle, salt-gradient solar pond. *Solar Energy* 53(4): 343-351.
3. Ali, H. 1998. Water and salt management strategies in the Fayoum basin of Egypt. PhD Thesis, Dept of Agricultural and Biosystems Engineering, McGill University, Qubec, Canada.
4. Ali, H., Madramootoo, C.A., and Abdel, S.G. 2001. Evaporation model of lake Qaroun as influenced by lake salinity. *Irrig. Drain.* 50: 9-17.
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* 56: 300-328.
6. Amer, M.H. 1992. Fayoum Oasis of Egypt: Water Research Center, El Kanater, Egypt.
7. Asmar, B.N., and Ergenzinger, P. 1999. Estimation of evaporation from the Dead Sea. *Hydrol. Process.* 13: 2743-2750.
8. Brutsaert, W. 1982. Evaporation into the atmosphere: Theory, history, and applications. Kluwer, Boston, 299 p.
9. Calder, I.R., and Neal, C. 1984. Evaporation from saline lakes: a combination equation approach. *Hydrol. Sciences J.* 29: 89-97.
10. Dingman, S.L. 2002. Physical hydrology. Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. 646 p.
11. Gray, D.M., McKay, G.A., and Wigham, J.M. 1970. Energy, evaporation and evapotranspiration. pp. 3.1-3.66, In: D. M. Gray (Ed.), Handbook on the Principles of Hydrology, National Research Council of Canada, Ottawa.
12. Harbeck, G.E., Koberg, G.E., and Hughes, G.E. 1959. The effect of the addition of heat from a powerplant on the thermal structure and evaporation of lake Colorado city. Texas, US Geol. Surv. Prof. Paper. 272-B, 7-25.
13. Hyland, R.W., and Wexler, A. 1983. Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H<sub>2</sub>O from 173. 15 K to 473. 15 K, *ASHRAE Transactions* 89 (2A): 500-519.

14. Knapp, H.V. 1985. Evaporation and transpiration. pp. 537-554, In: D. D. Houghton (Ed.) Handbook of Applied Meteorology. John Wiley and Sons, New York.
15. Lide, D.R. 2002. Handbook of Chemistry and Physics. Washington, CRC Press.
16. Mankarous, W.F. 1979. Hydrology of lake Qaroun, MSc. Thesis, Faculty of Engineering, Cairo University, Cairo, Egypt.
17. Mohammed, I.N. 2006. Modeling in the great salt lake. PhD Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Utah State University, Logan, Utah. Available at: <http://www.neng.usu.edu>.
18. Muthunayagam, A.E., Romamurthi, K., and Paden, J. 2004. Modelling experiments on vaporization of saline water at low temperatures and reduced pressures. Karunya Institute of Technology and Science, Coimbatore, India.
19. Oroud, I.M. 1995. Effects of salinity upon evaporation from pans and shallow lakes near the Dead Sea. *Theor. Appl. Climatol.* 52: 231–240.
20. Salhotra, A.M., Adams, E.E., and Harleman, D.R. 1987. The alpha, beta, gamma of evaporation from saline water bodies. *Water Resour. Res.* 23: 1769–1774.
21. Shuttleworth, W.J. 1993. Evaporation. pp. 4.1-4.47. In: D. R. Maidment (Eds.). Handbook of hydrology. McGraw Hill, Inc., New York.
22. Simon, W.D., and Rorabaugh, M.I. 1971. Hydrology of the Hungry Horse Reservoir. Northwestern Montana, US Geol. Surv. Prof. Pap. 682.
23. Stanhill, G. 1994. Changes in the rate of evaporation from the Dead Sea. *Int. J. Climatol.* 14: 465–471.
24. Turk, L.J. 1970. Evaporation of brine: a field study on the Bonneville Salt Flats, Utah. *Water Resour. Res.* 6: 1209–1215.

## **Effect of salinity on evaporation-revisited**

**S. Omidi<sup>1</sup> and \*B. Ghahraman<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>M.Sc. student Dept. of water Engineering Ferdowsi University of Mashhad, Iran,  
<sup>2</sup>Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

---

---

### **Abstract**

Knowledge of salinity-evaporation relation may be of prime importance in numerous situations, e.g. water balance in reservoirs and lakes, and designing evaporation ponds. Invoking such a relationship is the aim of the present paper. Seven treatments of drinking water (as control) and saline water with salinities of 41, 68, 81, 203, 407, and 610 dS/m were designed in Pardis of Ferdowsi University of Mashhad. Evaporation was measured from containers with a surface area of 650 cm<sup>2</sup> during one month period (Apr. 21 to May 18, 2006). There was a climatology station just near the study area. A linear regression was established between measured values of evaporations and salinity levels. On the average, evaporation decreases as salinity increases. However the coefficient of variations (0.29-0.33) were not correlated with salinity level. Measured evaporations were compared with those of Dalton and Penman equations. There was a better fit for Penman equation, as its GSDER is closer to one (1.5-3.9) and its ME is low (0.1-1.2) as is compared with Dalton equation (higher GSDER and ME).

**Keywords:** Evaporation; Salinity; Evaporation pan; Penman; Dalton