

# تعیین رابطه تبخیر با استفاده از عدد بی بعد لوئیس به منظور بهره‌وری منابع آبی در مدیریت شهری

مازیار اسمنی

دانشجوی دکتری، گروه مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

کاظم بشیرنژاد<sup>۱</sup>

استادیار، گروه مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

پیمان باشی شهابی

استادیار، گروه مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

ایمان زحمتکش

دانشیار، گروه مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

سید محمود ابوالحسن علوی

استادیار، گروه مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۶

## چکیده

تبخیر عامل مهمی در مدیریت منابع آب است و با محاسبه دقیق آن می‌توان راهکارهای مؤثری در جهت کاهش اثرات خشک‌سالی و به منظور حفاظت منابع آب اجرا نمود و این امر در برنامه ریزی منابع آبی در راستای بهره‌وری محصولات کشاورزی بسیار مؤثر می‌باشد. به دلیل کمبود ایستگاه‌های تبخیر سنجی و عدم وجود آمار کافی از تبخیر، روش‌های تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد مایع توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است این روابط علاوه بر اصلاح مقدار تبخیر اندازه‌گیری شده از تشت، می‌تواند در مدت‌زمان کوتاه نتایج قابل اعتمادتری در تخمین تبخیر از پهنه‌های آبی داشته باشد. در این تحقیق با استفاده از عدد بی بعد لوئیس (Le) و بررسی داده‌های ده ساله، رابطه‌ی تخمین تبخیر پیشنهاد می‌گردد و با روابط تجربی اسمنی-بشیرنژاد-شهابی<sup>۱</sup>، جنسن-هیز، استیفنز-استوارت و هامون مقایسه گردید که رابطه پیشنهادی نقاط ضعف روابط تجربی پیشین را رفع و اختلاف فاحش با آن‌ها را اصلاح نمود. تجزیه و تحلیل نتایج با پارامترهای آماری انجام گرفت و کلیه پارامترها بیانگر بهینه بودن رابطه تجربی تحقیق فعلی می‌باشد. آماره‌های  $MAPE$ ،  $MSE$ ،  $MAD$ ،  $RMSE$  و ضریب همبستگی (R) رابطه تجربی تحقیق فعلی دارای مقادیر ۱۳۹/۹۵۹، ۱۰۷/۴۰۶، ۱۹۵۸۸/۶۱۵، ۴/۶۱۵ و ۰/۴۲ می‌باشد که نسبت به چهار رابطه تجربی دیگر بهبود پیدا کرده و قابل اتکاتر می‌باشد. نکته قابل توجه در نتایج بدست آمده از این تحقیق استفاده از عدد بی بعد لوئیس است که علاوه بر سادگی، پیش‌بینی منحصر به فردی نسبت به سایر روش‌ها را دارد.

کلیدواژگان: پهنه‌های آبی، رابطه بی بعد لوئیس، تبخیر، روش تجربی، مدیریت شهری.

<sup>۱</sup>. نویسنده مسئول: bashirnezhad@mshdiau.ac.ir

## مقدمه

تبخیر پارامتر مهمی در مطالعات هیدرولوژی، منابع آب، مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری می‌باشد و مهم‌ترین پارامترهای هواشناسی مؤثر بر تبخیر شامل تابش خورشیدی، درجه حرارت، رطوبت نسبی و سرعت باد در نظر گرفته می‌شود (Allen et al., 1998: 300). اخیراً، مشخص شده است که جریان آب در اکثر رودخانه‌ها به دلیل تغییرات زیست‌محیطی روند کاهشی به خود گرفته است که این امر راهبردهای مدیریت منابع آبی را تحت سیطره خود درمی‌آورد و امنیت آبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Yanli et al., 2020). تخمین میزان تبخیر تأثیر زیادی بر مدیریت منابع آبی داشته تا جایی که در کشور ایران و در استانهای شمالی جهت افزایش تولید برنج حایز اهمیت می‌باشد (مدیری و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین در سایر محصولات کشاورزی مانند گندم، تبخیر و سنجش میزان آن بر افزایش میزان تولید این محصول مؤثر می‌باشد (ظهوریان پردل و همکاران، ۱۳۹۴). تبخیر یک پارامتر اقلیمی می‌باشد که با توجه به داده‌های هواشناسی قابل محاسبه می‌باشد (Sentelhas et al., 2010). از آنجاکه بیش از نیمی از بارش تبخیر می‌گردد تبخیر و تعرق در هیدرولوژی دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. سدها با هزینه زیاد اقدام به ذخیره آب نموده و این امر تبخیر را افزایش می‌دهد و در نهایت املاح به‌جامانده از تبخیر باعث نزول کیفیت آب می‌گردد (عراقی‌نژاد و کارآموز، ۱۳۸۴). ایران به لحاظ جغرافیایی در منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و حدود سی درصد بارندگی کره زمین در این منطقه صورت پذیرفته و میزان تبخیر در این منطقه سه برابر مناطق دیگر می‌باشد (قبادیان و همکاران، ۱۳۸۷). رفع مشکل تبخیر به‌واسطه مدیریت علمی منابع آب و کاهش میزان تبخیر امکان‌پذیر می‌باشد. ساده‌ترین ابزار سنجش تبخیر تشت کلاس A می‌باشد (شکل ۱) که در ایستگاه‌های هواشناسی و دریاچه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Goel, 2009).



شکل ۱. تشت تبخیر کلاس A واقع در ایستگاه هواشناسی فرودگاه بندرعباس

استفاده از تشت نیاز به بازدید روزانه و نگهداری اطلاعات دارد و به همین دلیل در مناطق بدون حضور نیروی انسانی قابل استفاده نبوده و گاهی نیز میزان تبخیر اندازه‌گیری شده با واقعیت فاصله زیادی دارد (Sudheer, 2000) و بر این اساس روابط تجربی مبتنی بر پارامترهای هواشناسی جهت تخمین تبخیر دارای اهمیت بسیار بوده و محققین زیادی روابط مذکور را پیشنهاد و جایگزین روش‌های میدانی نموده‌اند (یزدانی و همکاران، ۱۳۹۰). روابط تجربی که عموماً استفاده می‌گردند بر پایه پارامترهایی مانند دمای هوا، شدت تابش خورشید، سرعت باد، میزان رطوبت، میزان بارندگی و ساعت آفتابی عمل می‌نمایند (دانشکار آراسته و همکاران، ۱۳۸۶). در نظر داشته باشیم به لحاظ علمی و ریاضی اختلاف بین روابط تجربی و روش‌های میدانی قابل‌پذیرش و طبیعی است (سالاریان و همکاران، ۱۳۹۲). با در نظر گرفتن پارامترهای متعدد در روابط تجربی می‌توان از این روابط در مناطق مختلف بدون محاسبه اختصاصی

استفاده نمود (یزدانی و همکاران، ۱۳۹۰). تبخیر و تعرق می‌تواند به‌طور مستقیم محاسبه شود، حال آنکه به دلیل گرانی و زمان‌بر بودن، ترجیحاً تخمین زده می‌شود (Kouchakzadeh & Bahmani, 2005). برای استفاده از این معادله ایستگاه‌های هواشناسی باید مجهز به وسایل اندازه‌گیری دمای هوا، سرعت باد، رطوبت نسبی و تابش‌سنج یا آفتاب نگار باشند (Rahimi Khoob et al., 2006). تجهیز چنین ایستگاه‌هایی برای مزارع کشاورزی هزینه بالایی را در بردارد (بیدآبادی و همکاران، ۱۳۹۸).

سد دوستی در موقعیت جغرافیایی طول شرقی ۶۱،۰۹،۵۰ و عرض شمالی ۳۵،۵۶،۳۰ در مرز مشترک ایران و ترکمنستان واقع بوده که به‌عنوان منبع آب مؤثر در کشاورزی و اجتماعی دو کشور می‌باشد. در این تحقیق اقدام به سنجش دقیق تبخیر نموده و علاوه بر پارامترهای متعدد از عدد بی‌بعد لوئیس جهت سنجش تبخیر استفاده می‌گردد. عدد بی‌بعد لوئیس با در نظر گرفتن معادلات انتقال جرم و انرژی می‌تواند در سنجش تبخیر راهگشا باشد (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۲). دریاچه‌های پشت سد و پهنه‌های آبی در استفاده از منابع آب مؤثر بوده و اندازه‌گیری آن به دلیل مدیریت منابع موجود دارای اهمیت می‌باشد (توکلی و همکاران، ۱۳۹۲). با توجه به در دسترس بودن آب، مطالعات پرهزینه آزمایشگاهی بر روی رفتار تبخیری آب صورت نگرفته است (Collin et al., 2008; Kim & Ryou, 2003). یوشیدا و هایدو به‌صورت آزمایشگاهی کاهش نرخ تبخیر آب را به دلیل افزایش رطوبت نسبی نشان دادند (Yoshida & Hyodo, 1970). شیرای و همکاران تغییرات دمای قطرات آب را به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مطالعه کردند (Shira, et al., 1971; Shirai et al., 1971). یکی از پرکاربردترین فرض‌هایی که در مطالعات مربوط به رفتار تبخیری آب استفاده می‌شود، فرض واحد بودن عدد بی‌بعد لوئیس است. این فرض اغلب به این دلیل استفاده می‌شود که روابط موجود برای نفوذ آب در هوا، به دلیل جامع نبودن نتایج آزمایشگاهی، بازه عملکرد دمایی محدودی دارند (Montgomery, 1947). فرض عدد لوئیس واحد در مدل‌سازی‌های اولیه برای سنجش تبخیر استفاده می‌شد، اما در مدل‌های جدیدتر این فرض کمتر مورد توجه قرار گرفت (Baptista da Silvia et al., 2005). عموماً چهار روش شامل روابط تجربی، بیلان آب، بیلان انرژی و روش‌های ترکیبی برای تخمین تبخیر در نظر گرفته می‌شود (Vazifedoust, 2015). پارامترهای متعددی همچون عمق آب، سطح و شرایط محیطی در روابط تجربی تأثیرگذار هستند. عمق آب بیشتر در تبخیر اثرگذار بوده و سطح دریاچه پشت سد و منابع آب با میزان تبخیر رابطه معکوس دارد و باوجود سطح بیشتر میزان تبخیر کمتر خواهد بود (نجفوند دریکوندی، اسلامی، ۱۳۹۸).

• رابطه اسمنی-بشیرنژاد-شهابی ۱

در این رابطه (Asmani et al., 2020) با استفاده از سه پارامتر دمای متوسط، شدت تابش و سرعت باد، تبخیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$E=1.16(0.278 T_a + 2.697 W - 0.023 R_s) \quad (2)$$

در این رابطه  $T_a$  به‌عنوان دمای میانگین (سلسیوس)،  $W$  سرعت باد (متر بر ثانیه) و  $R_s$  نیز شدت تابش (وات بر مترمربع) است.

• رابطه جنسن-هیز

با سه هزار مشاهده مرتبط با تبخیر از نمونه برداری خاک طی سه دهه در سال ۱۹۶۳ رابطه زیر به چاپ رسید که این رابطه در غرب آمریکا مورد استفاده قرار گرفت (Jensen, 1963).

$$E=0.03523 R_s (0.014T_a-0.37) \quad (۳)$$

رابطه فوق مبتنی بر دمای میانگین و شدت تابش می‌باشد و در ایران نیز در تحقیقات متعدد مورد استفاده قرار می‌گیرد (فولادمند و صالحی، ۱۳۹۳). تحقیقات سبزی پرور و همکاران (۱۳۸۷) در استان همدان نیز نشان داد که معادله جنسن-هیز در مقایسه با معادله پنمن-مانیتیت برای تبخیر تعرق معادله مناسبی می‌باشد. وظیفه دوست و همکاران (۲۰۱۵) در خصوص سد دوستی مطالعاتی انجام دادند که بیانگر دقت بالای رابطه جنسن-هیز برای منطقه ذکر شده است.

#### • رابطه استفنز-استوارت

محققین روابط تجربی متعددی را با توجه به مناطق جغرافیایی جهت تخمین تبخیر مورد استفاده قرار می‌دهند (معروفی، ۱۳۹۰). الشالان و صالح (۱۹۸۷)، بیش از بیست روش اقلیمی معتبر را جهت برآورد تبخیر در مناطق خشک ارزیابی نموده و دقت این رابطه قابل قبول می‌باشد. این رابطه توسط Clayton (1989) مجدداً مورد محاسبه و اصلاح قرار گرفت و به عنوان یکی از روابط تجربی بهینه استفاده می‌گردد. این رابطه به عنوان معادله تخلخل نیز نامیده می‌شود که مشابه رابطه جنسن-هیز است (Stephens, 1963).

$$E=0.03495(0.0082 T_a-0.19) R_s \quad (۳)$$

#### • رابطه هامون

تخمین تبخیر و تعرق توسط هامون با رابطه‌ای ساده بیان گردید (Hamon, 1963) که در این رابطه تبخیر دریاچه و حوضچه‌ها دارای دقت مناسبی می‌باشد (Yao, 2005).

$$E = 0.63D^2 \times 10^{\frac{7.5 \times T_a}{7T_a + 273}} \quad (۴)$$

در این رابطه  $D$  بر اساس ساعات آفتابی و  $T_a$  نیز دمای میانگین روزانه است.

نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که روابط پیشنهاد شده برای تخمین تبخیر در پهنه‌های آبی دارای خطاهای فاحشی می‌باشد که در بخش‌های بعدی این خطاها با یکدیگر مقایسه خواهند شد. در این تحقیق روش جدید برای تخمین تبخیر از سطح پهنه‌های آبی پیشنهاد شده که در عین سادگی نتایج قابل قبولی نیز ارائه می‌دهد.

#### روش کار

#### • رابطه لوئیس

عدد بی بعد لوئیس نمایانگر نفوذ حرارتی ( $\alpha$ ) به نفوذ جرمی ( $D_{ab}$ ) است و هنگامی تعریف می‌شود که انتقال حرارت و انتقال جرم به روش جابجایی هم‌زمان صورت می‌گیرد.

$$Le = \frac{\alpha}{D_{ab}} \quad (۵)$$

که در آن  $Le = \frac{k}{\rho c_p}$  است. علاوه بر این، عدد لوئیس را می‌توان نسبت عدد اشمیت به پرانتل نیز تعریف کرد.

$$Le = \frac{Sc}{Pr} \quad (۶)$$

برای نفوذ بخار آب در هوا اطلاعات کمی ارائه شده است (Guye, 1917). جدول ۱ مقادیر  $D_{ab}$  را در بازه زمانی ۲۰- تا ۴۰+ درجه سانتی‌گراد برای آب نشان می‌دهد (Birge, 1941).

جدول ۱. مقادیر نفوذ بخار آب در هوا در دماهای مختلف (Birge, 1941)

دما (°C)	-۲۰	-۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰
نفوذ جرمی ( $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ )	۰/۱۹۷	۰/۲۱۱	۰/۲۲۶	۰/۲۴۱	۰/۲۵۷	۰/۲۷۳	۰/۲۸۹

عدد لوئیس در واقع نسبت سرعت نفوذ حرارت به نفوذ ذرات را نشان می‌دهد. در بسیاری از مدل‌های تبخیر، فرض می‌شود تمامی ذرات با سرعت یکسان نفوذ می‌کنند و در این صورت عدد لوئیس واحد در نظر گرفته می‌شود (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۲).

#### • بررسی داده‌های اقلیمی

در تحقیق حاضر اطلاعات هواشناسی که به صورت ماهیانه به مدت ده سال (از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷) در ایستگاه سد ثبت شده است، استفاده می‌گردد. در این مطالعه، داده‌های میانگین روزانه ایستگاه هواشناسی به عنوان داده‌های مشاهداتی بکار گرفته شدند و این اطلاعات شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، سرعت باد و شدت تابش بودند. داده‌های ده‌ساله مورد استفاده مطابق جدول ۲ است:

جدول ۲. میانگین داده‌های هواشناسی از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷

سال	دمای حداکثر	دمای حداقل	دمای میانگین	سرعت باد	شدت تابش	مجموع تبخیر
۲۰۰۸	۳۳/۷۷	۲۱/۰۳	۲۶/۹۴	۱/۴۰	۲۵۹	۲۲۹۶
۲۰۰۹	۳۴/۴۵	۲۱/۷۰	۲۷/۶۰	۱/۱۱	۲۵۹	۲۳۴۶
۲۰۱۰	۳۵/۱۴	۲۰/۴۳	۲۷/۳۷	۱/۰۴	۲۴۲	۲۶۱۴
۲۰۱۱	۳۴/۲۹	۲۰/۸۵	۲۷/۵۸	۱/۰۹	۲۸۰	۲۱۰۹
۲۰۱۲	۳۴/۸۶	۲۱/۲۹	۲۹/۶۶	۱/۶۱	۲۷۰	۲۴۶۰
۲۰۱۳	۳۳/۶۱	۲۱/۵۰	۲۸/۸۸	۱/۶۱	۲۵۹	۲۲۴۶
۲۰۱۴	۳۴/۰۱	۲۱/۴۰	۲۹/۱۴	۱/۷۲	۲۵۱	۲۳۱۴
۲۰۱۵	۳۴/۹۰	۲۲/۲۴	۳۰/۰۴	۱/۸۳	۲۶۶	۲۲۴۳
۲۰۱۶	۳۴/۹۱	۲۱/۱۷	۲۹/۱۴	۱/۵۴	۲۷۷	۲۱۳۰
۲۰۱۷	۳۵/۷۱	۲۱/۰۷	۲۷/۹۲	۱/۲۶	۲۶۱	۲۳۸۱

بر اساس تحلیل داده‌های ده‌ساله، متوسط دمای ده‌ساله منطقه مورد مطالعه ۲۸/۴۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. شدت، مدت و کیفیت انرژی ورودی خورشید به‌طور مستقیم بر میزان تبخیر آب سطحی تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق ابتدا داده‌های تبخیر از تشت را از داده‌های روزانه به صورت ماهانه جمع و سپس به صورت سالانه محاسبه نموده و این روال را برای سال‌های مورد نظر انجام و در جدول ۳ ثبت شده است. پس از آن مقادیر  $\alpha$  و  $D_{ab}$  را با روش درون‌یابی از جدول ترمودینامیکی و جدول ۱ برای دماهای مورد نظر محاسبه شده است. با محاسبه دو مقدار مذکور مقدار لوئیس قابل محاسبه بوده و در جدول ۳ ثبت گردید.

#### جدول ۳. مقادیر استخراج شده از گزارش ماهانه هواشناسی جهت رابطه تجربی

سال	تبخیر تشت	$\alpha$ میانگین	$D_{ab}$ میانگین	لوئیس سالانه	نسبت تشت به لوئیس	میانگین نسبت تشت به لوئیس $\times$ لوئیس	میزان خطا
۲۰۰۸	۲۲۹۶	$2/220E-$ ۰۵	$2/680E-05$	۰/۸۲۸	۲۷۷۲	۲۳۱۳	۱
۲۰۰۹	۲۳۴۶	$2/231E-$ ۰۵	$2/691E-05$	۰/۸۲۹	۲۸۲۹	۲۳۱۵	۱
۲۰۱۰	۲۶۱۴	$2/227E-$ ۰۵	$2/687E-05$	۰/۸۲۹	۳۱۵۳	۲۳۱۴	۱۱
۲۰۱۱	۲۱۰۹	$2/228E-$ ۰۵	$2/690E-05$	۰/۸۲۸	۲۵۴۷	۲۳۱۱	۱۰
۲۰۱۲	۲۴۶۰	$2/261E-$ ۰۵	$2/725E-05$	۰/۸۳۰	۲۹۶۴	۲۳۱۷	۶
۲۰۱۳	۲۲۴۶	$2/250E-$ ۰۵	$2/711E-05$	۰/۸۳۰	۲۷۰۶	۲۳۱۷	۳
۲۰۱۴	۲۳۱۴	$2/252E-$ ۰۵	$2/715E-05$	۰/۸۲۹	۲۷۹۰	۲۳۱۵	۰
۲۰۱۵	۲۲۴۳	$2/265E-$ ۰۵	$2/724E-05$	۰/۸۳۱	۲۶۹۸	۲۳۲۱	۳
۲۰۱۶	۲۱۳۰	$2/235E-$ ۰۵	$2/715E-05$	۰/۸۲۳	۲۵۸۷	۲۲۹۸	۸
۲۰۱۷	۲۳۸۱	$2/237E-$ ۰۵	$2/696E-05$	۰/۸۳۰	۲۸۶۹	۲۳۱۶	۳
میانگین نسبت تشت به لوئیس ۲۷۹۱							

به ازای هر سال نسبت تشت به مقدار لوئیس محاسبه گردید و پس از آن میانگین ده ساله برابر با ۲۷۹۱ در نظر گرفته شد. با ضرب مقدار میانگین به دست آمده در مقادیر لوئیس هر سال مقدار تبخیر محاسبه گردید که این مقدار نسبت به تشت دارای خطای کم بوده و می‌توان به عنوان رابطه تخمین تبخیر به صورت زیر در نظر گرفت:

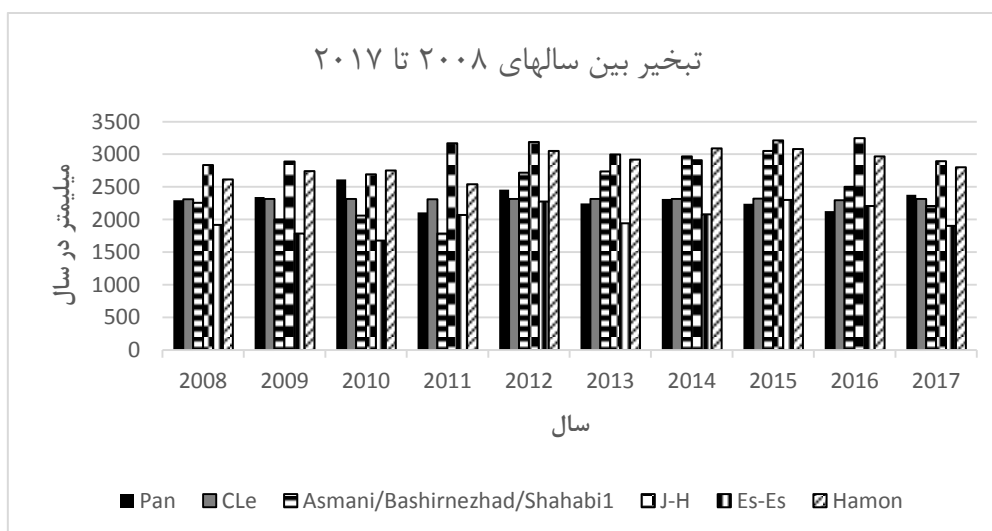
$$E = C \times Le \quad (C=2791) \quad (7)$$

با در نظر گرفتن رابطه فوق به عنوان رابطه تخمین تبخیر و روابط اسمی-بشیرنژاد-شهابی ۱، جنسن-هیز، استیفنز-استوارت و هامون مقادیر تبخیر محاسبه و در جدول ۴ تجمیع گردید (شکل ۲).

جدول ۴. میزان تبخیر بر اساس روابط تجربی مختلف

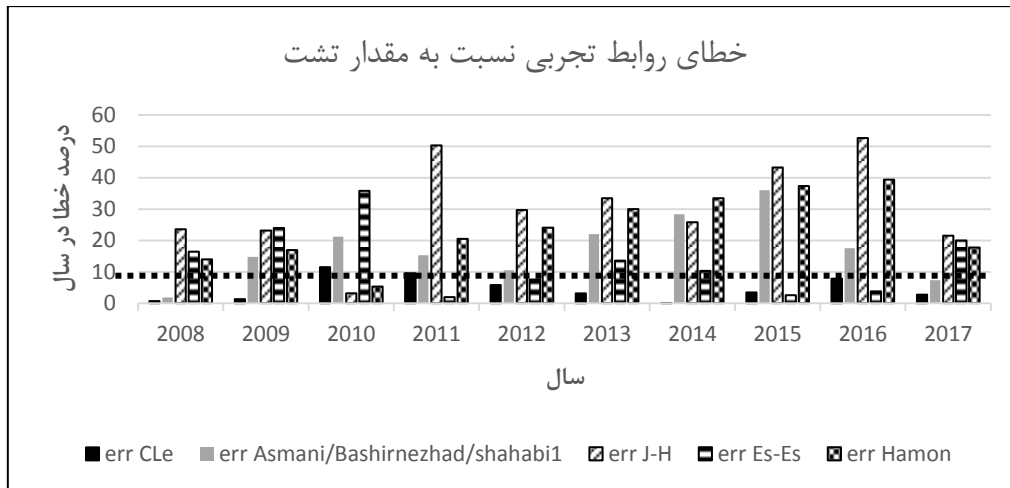
سال	تبخیر جنسن	$C \times Le$	خطای رابطه شهابی ۱	تبخیر سالانه اسمی-بشیرنژاد-	خطای رابطه اسمی-بشیرنژاد-شهابی	تبخیر سالانه جنسن - هیز	خطای رابطه جنسن - هیز	استوارت	تبخیر سالانه رابطه استیفنز - استوارت	خطای رابطه استیفنز - استوارت	تبخیر سالانه رابطه هامون	خطای رابطه هامون
۲۰۰۸	۲۲۹۶	۲۳۱۳	۱	۲۲۵۵	۲	۲۸	۲۳	۱۹۲۰	۱۶	۲۶۱۶	۱۴	

						۳۶						
۲۰۰۹	۲۳۴۶	۲۳۱۵	۱	۱۹۹۹	۱۵	۲۸	۲۳	۱۷۸۴	۲۴	۲۷۴۲	۱۷	۸۸
۲۰۱۰	۲۶۱۴	۲۳۱۴	۱۱	۲۰۶۰	۲۱	۲۶	۳	۱۶۷۹	۳۶	۲۷۵۲	۵	۹۵
۲۰۱۱	۲۱۰۹	۲۳۱۱	۱۰	۱۷۸۶	۱۵	۳۱	۵۰	۲۰۶۹	۲	۲۵۴۲	۲۱	۶۸
۲۰۱۲	۲۴۶۰	۲۳۱۷	۶	۲۷۱۷	۱۰	۳۱	۳۰	۲۲۷۶	۷	۳۰۵۲	۲۴	۹۰
۲۰۱۳	۲۲۴۶	۲۳۱۷	۳	۲۷۳۹	۲۲	۲۹	۳۳	۱۹۴۱	۱۴	۲۹۱۸	۳۰	۹۷
۲۰۱۴	۲۳۱۴	۲۳۱۵	۰	۲۹۷۰	۲۸	۲۹	۲۶	۲۰۷۷	۱۰	۳۰۸۸	۳۳	۱۱
۲۰۱۵	۲۲۴۳	۲۳۲۱	۳	۳۰۵۱	۳۶	۳۲	۴۳	۲۳۰۱	۳	۳۰۸۱	۳۷	۱۳
۲۰۱۶	۲۱۳۰	۲۲۹۸	۸	۲۵۰۳	۱۷	۳۲	۵۳	۲۲۰۹	۴	۲۹۶۸	۳۹	۵۰
۲۰۱۷	۲۳۸۱	۲۳۱۶	۳	۲۲۰۵	۷	۲۸	۲۱	۱۹۰۴	۲۰	۲۸۰۱	۱۸	۹۲
میانگین	۲۳۱۴	۲۳۱۳	۵	۲۴۲۹	۱۷	۳۰	۳۱	۲۰۱۶	۱۴	۲۸۵۶	۲۴	۰۴



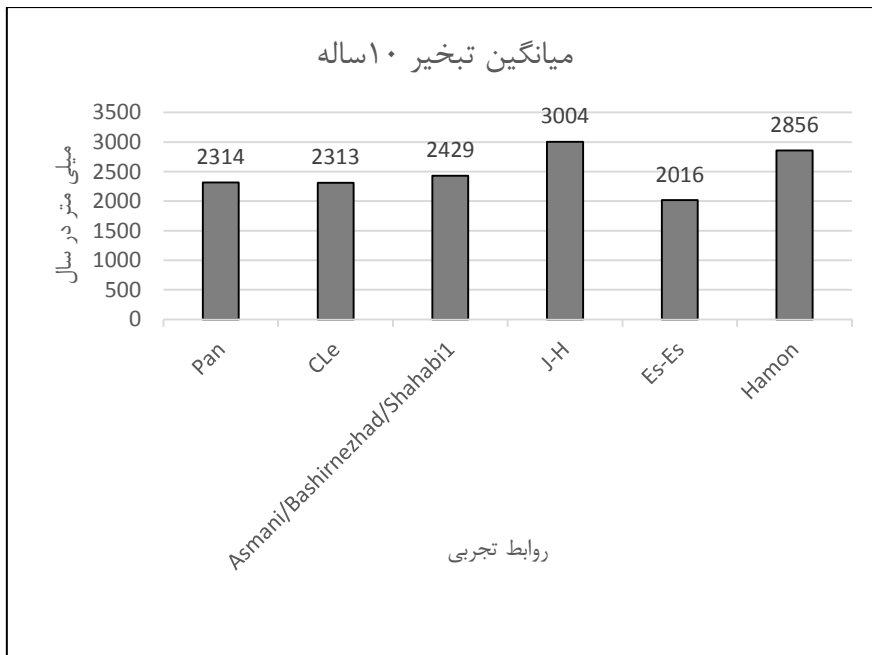
شکل ۲. تبخیر سالیانه روابط تجربی از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷

با توجه به داده‌های جدول فوق و مقایسه آن‌ها با میزان تبخیر سالانه از تشت تبخیر می‌توان خطای هر رابطه را مطابق نمودار زیر در نظر گرفت (شکل ۳).



شکل ۳. درصد خطای روابط تجربی در سال‌های مختلف

نمودار زیر بیان‌کننده میزان تبخیر بر اساس میانگین ده‌ساله می‌باشد و جهت روابط تجربی مختلف ترسیم گردیده است و مشاهده می‌گردد که رابطه تجربی بر اساس عدد بی‌بعد لوئیس دارای دقت مناسبی می‌باشد (شکل ۴).



شکل ۴. میانگین ده‌ساله تبخیر روابط تجربی مختلف

• اعتبار سنجی و دقت رابطه

مقدار تبخیر از سطح آزاد آب با استفاده از روابط تجربی محاسبه و با مقدار تبخیر از تشت مورد مقایسه قرار گرفتند. عملکرد روابط تجربی بر اساس پنج آماره  $RMSE$ ،  $MAD$ ،  $MSE$ ،  $MAPE$  و  $R$  ارزیابی گردید که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است:

جدول ۵. نتایج حاصل از روابط تجربی

ردیف	نام رابطه تجربی	RMSE	MAD	MSE	MAPE	R
۱	تحقیق فعلی (C×Le)	۱۳۹/۹۵۹	۱۰۷/۴۰۶	۱۹۵۸۸/۶۱۵	۴/۶۱۵	۰/۴۲
۲	اسمنی-بشیرنژاد-شهابی ۱	۴۵۷/۵۹۲	۴۰۲/۶۲۴	۲۰۹۳۹۰/۸۰۷	۱۷/۴۶۸	- ۰/۰۷
۳	جنسن - هیز	۷۵۰/۰۴۶	۶۹۰/۳۳۲	۵۶۲۵۶۹/۵۲۸	۳۰/۶۲۴	- ۰/۶۵



۴	استفنز - استوارت	۴۱۸/۴۴۹	۳۲۵/۰۶۳	۱۷۵۰۹۹/۲۰۹	۱۳/۵۵۴	- ۰/۴۹
۵	هامون	۵۸۷/۲۸۸	۵۴۲/۲۴۳	۳۴۴۹۰۶/۸۱۹	۲۳/۸۴۷	۰/۰۷

بر اساس جدول ۵ رابطه تحقیق فعلی با مقادیر خطای چهارگانه کمتر و ضریب همبستگی مناسب، رابطه دقیق تر بوده و پس از رابطه مذکور می توان رابطه تجربی اسمنی - بشیرنژاد - شهابی (Asmani et al., 2020) را دارای دقت قابل قبول دانست. ضریب همبستگی مربوط به میزان تبخیر برآورد شده توسط مدل های تجربی تحقیق فعلی، اسمنی - بشیرنژاد - شهابی ۱، جنسن - هیز، استفنز - استوارت و هامون با میزان مشاهده ای به ترتیب برابر با ۰/۴۲، ۰/۰۷، -۰/۶۵، -۰/۴۹ و ۰/۰۷ محاسبه شدند.

### نتیجه گیری

تبخیر از سطح آزاد آب در مدیریت منابع آبی و حفظ این منابع بخصوص در مخازن پشت سدها و دریاچه ها اهمیت فراوانی دارد و در برنامه ریزی جهت توسعه پایدار حایز اهمیت است. نکته دیگر اینکه ایران در منطقه خشک و نیمه خشک دنیا قرار داشته و اصولاً میزان تبخیر بالاست و در منطقه مورد مطالعه با توجه به مقدار بارش ده ساله ۱۹۰۵ میلی متر، مقدار تبخیر سالانه به طور متوسط برابر با 23138 خواهد بود که به عبارت دیگر 12 برابر میزان بارش، تبخیر سطحی وجود دارد که بیش از حد مجاز است.

در این تحقیق رابطه تجربی جدیدی به دست آمد (رابطه ۷) که در این تحقیق عملکرد روابط تجربی بر اساس پنج آماره RMSE، MAD، MSE، MAPE و R مورد ارزیابی قرار گرفته و نشان داد که رابطه تحقیق فعلی (۱۳۹/۹۵۹، ۱۰۷/۴۰۶، ۱۹۵۸۸/۶۱۵، ۴/۶۱۵ و ۰/۴۲) نسبت به سایر روش های تجربی از دقت بالاتری در برآورد تبخیر از سطح آزاد آب برخوردار است. در رتبه بعدی معادله اسمنی - بشیرنژاد - شهابی ۱ (۴۵۷/۵۹۲، ۴۰۲/۶۲۴، ۴۶۸/۸۰۷، ۱۷/۲۰۹۳۹۰ و -۰/۰۷) قرار می گیرد. صحت داده ها و انطباق مناسب این دو روش تجربی بهینه (تحقیق فعلی و اسمنی - بشیرنژاد - شهابی ۱) از معیارهای ارزیابی عملکرد سنجیده شده و حاکی از این بود که روش تحقیق فعلی با توجه به خطای کمتر، قابل اعتمادتر می باشد. روابط تجربی جنسن - هیز، استفنز - استوارت و هامون هم از دقت متوسطی در برآورد تبخیر از سطح آزاد آب برخوردارند.

### منابع

- امیدوار، ا.، مهریار، ر.، مهدوی، ا. (۱۳۹۲). ارزیابی فرض عدد لوئیس واحد در مدلسازی رفتار تبخیری قطرات آب و سوخت، نشریه علمی - پژوهشی سوخت و احتراق شماره ششم، جلد شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۲.
- بیدآبادی، م.، بابازاده، ح.، سرائی تبریزی، م. (۱۳۹۸). ارزیابی نیاز آبی پتانسیل گیاهان (مطالعه موردی: سایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران)، مجله محیط زیست و مهندسی آب، جلد ۵، ۳۶-۴۶.
- توکلی، ا.، قهرمان، ب.، داوری، ک.، انصاری، ح. (۱۳۹۲). برآورد تبخیر و تعرق در شرایط کمبود داده (مطالعه موردی: استان خراسان شمالی)، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال ۱۷، شماره ۶۲، ۳۳-۴۵.
- دانشکار آراسته، پ.، تجریشی، م.، میرلطیفی، س. م. (۱۳۸۶). بررسی اثر سرعت وزش باد بر تبخیر از سطح مخزن چاه نیمه سیستان به روش دالتونی، فصلنامه علمی پژوهشی شریف، شماره ۳۷، ۱۳.

سالاریان، م.، نجفی، م.، داوری، ک.، اسلامیان، س. س.، حیدری، م. (۱۳۹۲). مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر تعرق پتانسیل در شرایط کمبود داده‌های هواشناسی در ماه‌های گرم و سرد سال. مطالعه موردی شهرستان اصفهان، نشریه آبیاری و زهکشی ایران شماره ۸، ۶۲-۷۳.

سبزی پرور، ع.، تفضیلی، ف.، زارع ابیانه، ح.، بانژاد، ح.، موسوی بایگی، م.، غفوری، م.، محسنی موحد، ا. ا. و مریجانی، ز. (۱۳۸۷). مقایسه چند مدل برآورد تبخیر تعرق گیاه مرجع در یک اقلیم سرد نیمه خشک، به منظور استفاده بهینه از مدل‌های تابش، آب و خاک، جلد ۲۲، شماره ۲، ۳۲۹-۳۳۹.

ظهوریان پردل، م.، جوانمردی، م.، مکاری، م. (۱۳۹۴). تاثیر شرایط اقلیمی بر کشت گندم در شهرستان دزفول، فصلنامه علمی-پژوهشی جغرافیا(برنامه ریزی منطقه‌ای) / سال پنجم / شماره چهار، ۲۵-۳۴  
 علیزاده، و. و شریفیان، ح. (۱۳۸۸). ارزیابی روش‌های دمایی و تشعشعی در برآورد حداکثر تبخیر-تعرق با احتمالات مختلف (مطالعه موردی: منطقه گرگان)، آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۳، ۱-۹.

فولادمند، ح. ر. و صالحونی، م. (۱۳۹۳). اصلاح معادله جنسن-هیز برای تخمین تعرق در استان فارس، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال چهارم، شماره شانزدهم، ۹۴-۱۰۳.

قبادیان، ر.، یعقوبی، م.، طالب حیدری، م. (۱۳۸۷). تهیه مدل پیش‌بینی تبخیر از سطح آزاد در محدوده شهر کرمانشاه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه با روابط تجربی موجود، در سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، تهران.  
 مدیری، ا.، براری تازی، د.، امیری، ا.، نیک نژاد، ی.، فلاح، ه.، خزایی، م. (۱۳۹۷). ارزیابی و برآورد میزان تبخیر و تعرق گیاه برنج در استان‌های مالی کشور، فصلنامه علمی-پژوهشی جغرافیا(برنامه ریزی منطقه‌ای) / سال نهم / شماره یک، ۵۷۲-۵۶۱

معروفی، م. ش. و. ص. (۱۳۹۰). مقایسه چند روش برآورد تبخیر روزانه از تشت - مطالعه موردی منطقه کرمان، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک / سال پانزدهم / شماره پنجاه و پنجم، ۶۹-۸۳.  
 نجفوند دریکوندی، م.، اسلامی، م. (۱۳۹۸). مقایسه روش‌های تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد آب، دو فصلنامه علمی تخصصی آب، ص ۶۶.

یزدانی، و.، قهرمان، ب.، داوری، ک. (۱۳۹۰). تعیین بهترین روش تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد آب در اراضی شالیزاری آمل بر پایه آنالیز حساسیت و مقایسه آن با نتایج شبکه عصبی، پژوهش آب ایران، ۴۰-۵۶.

Al-Shalan, A. A. M. A. S. (1987). Evapotranspiration estimation in extremely arid areas, *J. Irrig. Drain. Eng.*, pp. 565-574.

Asmani, M., K. Bashirnezhad, and P. BashiShahabi, Determining the Empirical Equation for Estimating the Evaporation from Open Water Surfaces. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 2020. **13**(4): p. 1091-1103.

Baptista da Silvia, A. C. S., Bellini da Cunha Neto, J. A., Lamberts, R. (2005). Computer Simulation of Evaporative Cooling of Buildings by Water Spray Vaporization, *Ninth International IBPSA Conference*, Montreal, Canada.

Birge, R. (1941). The general physical constants; as of August 1941 with detail on the velocity of light only., *Reports on progress in physics*, 8, pp. 90-134.

Clayton, L. H. (1989). Prediction of class A pan evaporation in south Idaho, *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE*, **115**(2), pp. 166-171.

- Collin, A., Boulet, P., Parent, G., Vetrano, M. R., Buchlin, J. M. (2008). Dynamic and Thermal Behaviour of Water Sprays ,*International Journal of Thermal Sciences*, 47, pp. 399-407.
- Fooladmand, H. (2012). Comparing reference evapotranspiration using actual and estimated sunshine hours in south of Iran ,*Afric. J. Agric. Res.* 7(7), pp. 1164-1169.
- Goel, A. (2009). Application of SVMs Algorithms for Prediction of Evaporation in Reservoirs ,*World Environmental and Water Resources Congress*.
- Guye, P. (1917). Sur les variations de la densite de l'air et la loi de Loomis-Morley, *J. Chim,phys.*, 15, pp. 561-576.
- Hamon, W. R. (1963). Computation of direct runoff amounts from storm rainfall ,*Int Assoc Sci Hydrol Publ* 63 ,p. 52-62.
- Jensen, M. A. H. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation ,*Irrig. Drain ASCE* 89 ,pp. 15-41.
- Kim, S., Ryou, H. (2003). An Experimental and Numerical Study on Fire Suppression using a Water Mist in an Enclosure ,*Buildng and Environment*, 38, pp. 1309-1316.
- Kouchakzadeh, M., Bahmani, A. (2005). Assessment of artificial neural networks revenue in reducing required parameters for estimation of reference evapotranspiration ,*J Agri. Sci* ,(4)11, pp. 87-97.
- Li, Y. F., Chow, W. K. (2008). Study of Water Droplet Behavior in Hot Air Layer in Fire Extinguishment, *Fire Technology* ,*Fire Technology*, 44, pp. 351-381.
- M. M., A. A., A. F., Vazifedoust, M. (2015). Estimating Evaporation from Lakes and Reservoirs ,*Water Resour Manage* ,pp. 1025-1047.
- Montgomery, R. B. (1947). Viscosity and Thermal Conductivity of Air and diffusivity of Water Vapor in Air ,*Journal of Meteorology*,4, pp. 193-197.
- Rahimi Khoob, A., Seyyed Behbahani, M., Nazarifar, M. (2006). Evaluation of using minimum meteorological data for Penman Montieth equation-Case study Khuzestan provine ,*J Agri. Sci* , 3(12), pp. 591-600.
- Rosenberry, D. D. S. C. T. a. M. M. (2004). Comparison of 13 equations for determining evapotranspiration from a prairie wetland, Cottonwood lake area, north Dakota, USA ,*Wetland Sci.* 24(3), pp. 483-497.
- Sentelhas, P., Gillespie, T., Santos, E. (2010). Evaluation of FAO Penman Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada , *Agricultural Water Management*, 97, pp. 635-644.
- Shirai, K., Matsui, S., Shinjo, A. (1971). On the Temperature Change of Sprayed Water Drops I: Theoretical Study ,*Transaction of the Japanese Society of Irregation, Drainage and Reclamation Engineering*, 35, pp. 24-29.
- Shirai, K., Matsui, S., Shinjo, A. (1971). On the Temperature Change of Sprayed Water Drops II: Experimental Study ,*Transaction of the Japanese Society of Irregation, Drainage and Reclamation Engineering*, 35, pp. 30-35.

- Stephens, S. E. JC. (1963). A comparison of procedures for computing evaporation and evapotranspiration ,Publication 62, International association of scientific hydrology. International Union of Geodynamics and ,pp. 123-133.
- Sudheer, K. (2000). Modeling hydrological processes using neural computing technique. PhD thesis, Indian nstitute of Technology, Delhi.
- Xing, Z., Chow, L., Meng, F., Rees, H., Stevens, L., Monteith, J. (2008). Validating evapotranspiration equations using Bowen Ratio in New Brunswick,*Maritime Canada. Sensors*, 8, p. 412-428.
- Yanli, L., Jianyun, Z., Guoqing, W., Gaoxu, W., Junliang, J., Cuishan, L., Sicheng, W., Ruimin, H. (2020). How do natural climate variability, anthropogenic climate and basin underlying surface change affect streamflows? A three-source attribution framework and application ,*Journal of Hydro-environment Research*, 28, pp. 57-66.
- Yao, C. I. H. (2005). Determining spatially-distributed annual water balances for ungauged locations on , *Hydrol Sci J* 50 ,p. 245-263.
- Yoshida, T., Hyodo, T. (1970). Evaporation of Water in Air, Humid Air and Superheated Steam , *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 2, pp. 207-214.