



مقایسه روش‌های تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد آب (مورد مطالعه: سد مخزنی کالپوش)

حسن شکاری^{۱*}، احمد نظری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

*نویسنده مسئول: hasanshekarii@gmail.com

خلاصه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک علت عمده تلفات آب را می‌توان پدیده‌ای به نام تبخیر سطحی دانست که در دماهای پایین‌تر از نقطه جوشش آب اتفاق می‌افتد؛ بنابراین، یک پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر بوده و باتوجه به موقعیت و شرایط آب‌وهوایی کشورها، به‌عنوان یک عامل مهم در میزان تلفات منابع آبی در یک کشور، نقش ایفا می‌کند. در این پژوهش به برآورد میزان تبخیر در سد کالپوش پرداخته و با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و آب‌وهوایی و ... میزان تبخیر از روش‌های مختلف فرمول‌های تجربی و همچنین اندازه‌گیری بیلان آب محاسبه شده است. در ادامه بهینه‌ترین روش و ضریب تبخیر مناسب برای برآورد تبخیر انتخاب می‌گردد. باتوجه به محاسبات انجام شده روش تجربی ایوانف با کمترین میزان خطا بهترین همپوشانی را با میزان تبخیر از تشت داشته و ضریب مناسب تبخیر بین ۰/۶ تا ۰/۹ بررسی و ضریب ۰/۸۵ با کمترین خطا انتخاب گردید و سپس در مرحله بعد فرمول تجربی سازمان عمران آمریکا انتخاب گردید. روش‌های دیگر به علت محاسبه کمبود فشار بخار در آن فرمول‌ها و احتمال خطای محاسبات با مقدار واقعی قابل استفاده برای سد کالپوش نمی‌باشد.

کلمات کلیدی: ایوانف، تبخیر، تشت تبخیر، سد کالپوش، معادلات تجربی

مقدمه

بنابر آمارها، متوسط بارندگی سالانه جهان حدود ۸۵۰ میلی‌متر و این مقدار در ایران ۲۵۰ میلی‌متر و چیزی کمتر از یک سوم متوسط میزان بارندگی سالانه جهان است.

متوسط ظرفیت تبخیر سالانه در جهان ۷۰۰ میلی‌متر و در ایران برابر با ۲ هزار و ۱۰۰ میلی‌متر است و این آمار نشان می‌دهد که تبخیر سالانه در ایران سه برابر متوسط تبخیر سالانه جهانی است و می‌توان گفت محدودیت و کمبود منابع آبی در ایران نسبت به جهان بسیار جدی‌تر است [۱].

۷۰ درصد منابع آب ایران با تبخیر در دشت‌ها، کوه‌ها، پشت سدها هدر می‌رود. بر اساس برآورد سالانه نزدیک به سه تا پنج میلیارد مترمکعب از آب دریاچه ی پشت سدها تبخیر می‌شود و در حال حاضر کشور با معضل تبخیر شدید آب در پشت ۶۰۰ سد احداث شده در کشور مواجه است. یکی از مسائل مهم در بحث تبخیر محاسبه و برآورد مقدار تبخیر می



باشد. یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای اندازه‌گیری میزان تبخیر استفاده از تشت تبخیر می‌باشد. علاوه بر این استفاده از روش‌های تجربی و روابط ریاضی در محاسبه مقدار تبخیر رواج زیادی یافته است. محققین با کشف روابط و معادلات ریاضی دنبال روش‌های جایگزین و ساده‌تر در برآورد میزان تبخیر می‌باشند. روابط تجربی با در نظر گرفتن پارامترهای موثر در تبخیر شامل تابش خورشید، میانگین دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد سعی در کاهش میزان خطای برآورد میزان تبخیر دارند. از بین معادلات موجود رابطه ایوانف^۱ برای مناطق با اقلیم خشک توصیه می‌شود (ولایتی، ۱۳۹۰). زارع ابیانه و همکاران (۱۳۸۴) در مطالعه‌ای در سطح کشور ایران و با بررسی داده‌های حاصل از ۲۵ ایستگاه هواشناسی به محاسبه میزان تبخیر از روش فرمول‌های تجربی و مقایسه آن با داده‌های اندازه‌گیری شده از تشت تبخیر پرداختند که روش ایوانف، همخوانی قابل قبولی با داده‌های مشاهداتی داشت. یزدانی و همکاران (۱۳۹۰) از روابط تجربی برای برآورد تبخیر در اراضی شالیزار آمل در یک دوره ۱۲ ساله استفاده نمودند. در برآورد آنها روش ایوانف بهترین همبستگی را با مقادیر تشت تبخیر داشت. ستاری و همکاران (۱۳۹۳) تبخیر در سد علویان را بررسی نمودند که روش مایر^۲ نسبت به دیگر روش‌ها مناسب‌تر بود. جهرمی (۱۳۹۴) با بررسی میزان تبخیر در استان فارس به این نتیجه رسید که روش مایر و ایوانف دقت بالاتری نسبت به دیگر روش‌ها دارد. امامدوست و همکاران (۱۳۹۹) در مقاله‌ای به بررسی میزان تبخیر در سطح آزاد آب در دشت مازندران و مقایسه آن با روش‌های تجربی پرداختند. در این تحقیق روش ایوانف دارای دقت بالاتری است. حسنی (۱۳۹۹) روش‌های مختلف برآورد تبخیر از سطح آب را در سد الغدير ساوه، مورد بررسی قرار داد. نتایج او نشان داد که کمترین خطا مربوط به روابط پرستلی تیلور^۳، پنمن مونیت^۴ و انتقال جرم است. سد و شبکه آب شرب کالپوش در استان سمنان، شهرستان میامی و در حوالی روستای حسین‌آباد و بر روی رودخانه‌ای به همین نام واقع شده است. فاصله محل سد تا شهر شاهرود حدود ۱۸۰ کیلومتر و در عرض شمالی ۰۷' - ۳۷° و طول شرقی ۴۳' - ۵۵° و در ارتفاع ۱۳۱۲ متری از سطح دریا واقع شده است. نقش این سد تنظیم و مهار آب‌های هدر رونده حوضه و همچنین ذخیره سازی آب انتقالی از بند قوشه دگرمان به منظور افزایش پتانسیل منابع آب سطحی و بهبود آب شرب شهرستان شاهرود است. آب استحصال از سد توسط ایستگاه پمپاژ و مخزن ذخیره و خط انتقال اصلی به شبکه آب شرب شاهرود هدایت می‌شود که حدود ۱۰ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است. هزینه احداث مجموعه فوق بالغ بر ۱۷۵ میلیارد ریال بر اساس قیمت‌های سال ۸۶ است.

مواد و روش‌ها

به‌طور کلی روش‌های مورد استفاده در برآورد تبخیر از سطح آب را می‌توان به چهار دسته تقسیم نمود:

اندازه‌گیری با تشت تبخیر

روش بیلان آب

روش بیلان انرژی

روش انتقال جرم

^۱ Ivanov

^۲ Meyer

^۳ Penman Monteith

^۴ Prestley Taylor



در این فصل ابتدا به معرفی تبخیر با استفاده از تشت تبخیر پرداخته می‌شود و در ادامه میزان تبخیر با استفاده از فرمول‌های مختلف تجربی محاسبه خواهد شد.

در هیدرولوژی برآورد مقدار تبخیر از سطح آزاد آب معمولاً برای محاسبه تلفات آب در مخازن صورت می‌گیرد. در این فرایند فرض می‌شود که همیشه آب برای تبخیر وجود داشته باشد. یعنی موجودیت آب بیش از توان تبخیر محیط باشد.

روش‌های برآورد تبخیر:

تشت تبخیر

با استفاده از آمار اندازه گیری شده از تشت می‌توان مقدار تبخیر از سطح آب را طبق معادله زیر تخمین زد [۲].

$$E = K(E_{pan}) \quad (1)$$

در این معادله E_{pan} مقدار تبخیر از تشت و K ضریب ثابتی است که مقدار آن برای تشت تبخیر استاندارد کلاس A (امریکایی) بین ۰/۵۸ تا ۰/۷۸ (به طور متوسط ۰/۷) است.

مقادیر تبخیر روزانه سدکالپوش به طور دیجیتال از روی سنسور نصب شده بر روی تشت تبخیر سد واقع در ایستگاه هواشناسی سد قرائت می‌شود. مشخصات این تشت در جدول (۱) ذکر شده است.

جدول ۱- مشخصات تشت تبخیر سد کالپوش

نوع تشت تبخیر	تشت تبخیر کلاس A
شرکت سازنده	سیماب الکترونیک
شرکت نصاب	پروسانکو
استاندارد	WMO
ابعاد	ارتفاع: ۱۰ اینچ قطر: ۴۸ اینچ
دقت	۰/۱ میلیمتر

ضریب تشت تبخیر برای ماه‌های مختلف سال را می‌توان از جدول ۲ تخمین زد. ملاحظه می‌شود که مقدار ضریب تشت در ماه‌های زمستان کم و در ماه‌های گرم سال به دلیل جذب حرارت خورشید توسط توده آب دریاچه‌ها و در نتیجه بالارفتن مقدار تبخیر از سطح آزاد آب این ضریب بزرگ‌تر می‌شود که این تفاوت زیاد چشمگیر نمی‌باشد.

جدول ۲- ضرایب تشت تبخیر به تفکیک ماه [۳]

ماه	ضریب	ماه	ضریب
ژانویه	۰/۶۰	ژوئیه	۰/۷۷
فوریه	۰/۷۰	اوت	۰/۷۷
مارس	۰/۷۲	سپتامبر	۰/۷۷
آوریل	۰/۷۳	اکتبر	۰/۷۰
مه	۰/۷۴	نوامبر	۰/۶۳
ژوئن	۰/۷۶	دسامبر	۰/۶۰

بررسی داده های اقلیمی

در این تحقیق اطلاعات ثبت شده در ایستگاه هواشناسی سد کالپوش در طول روزهای سال ۱۴۰۰ استفاده گردید. این اطلاعات شامل تبخیر از تشت، میانگین دمای روزانه، رطوبت نسبی، سرعت باد می باشد. با بررسی این داده ها مشخص شد با توجه به شرایط اقلیمی منطقه کالپوش میانگین رطوبت نسبی هوا معادل ۷۸ درصد و متوسط سرعت باد نیز ۴/۸ متر بر ثانیه است که این داده ها می تواند بر روی انتخاب معادله متناسب با سد کالپوش موثر باشد. دمای هوا در این منطقه با حداقل منفی ۶ و حداکثر ۲۷ درجه سانتی گراد به ترتیب مربوط به دوم بهمن ماه و چهاردهم تیر ماه ثبت گردیده است [۴].

معادلات تجربی

کوشش های زیادی به عمل آمده است تا فرمول ها و معادلات عملی و ساده ای برای تخمین تبخیر از سطح آزاد آب ارائه شود. در این تحقیق چندین روش تجربی انتخاب شده و مورد استفاده و مقایسه قرار می گیرند. این روابط تجربی را می توان در جدول ۳ مشاهده نمود.

جدول ۳- روابط تجربی برآورد میزان تبخیر [۲].

نام رابطه	معادله رابطه
مایر	$E = \left(1 + \frac{U_2}{16}\right) \cdot C_s \cdot (e_s - e_a)$
مارسیانو	$E = 0.03 U_2 (e_s - e_a)$
شاهتین	$E = (0.116 + 0.017 U_2) (e_s - e_a)$
هتفر	$E = 0.028 U_2 (e_s - e_a)$
ایوانف	$E = 0.0018 (T + 25)^2 (100 - RH)$
تیچومیروف	$E = (e_s - e_a) \cdot (15 + 3 U_{10})$
سازمان عمران آمریکا (USBR)	$E = 0.883 (4.57 T + 43.3)$

که در معادلات مندرج در جدول فوق:

E: تبخیر از سطح آزاد آب بر حسب میلیمتر در روز

U_1 و U_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ و ۱۰ متری از سطح زمین بر حسب متر بر ثانیه

T: میانگین دمای هوا بر حسب درجه سانتیگراد

e_s و e_a : به ترتیب فشار بخار اشباع و فشار واقعی بخار آب در هوا بر حسب میلیمتر جیوه

RH: میانگین رطوبت نسبی هوا بر حسب درصد

C: ضریبی است که برای دریاچه‌های عمیق ۳۶/۰ و برای دریاچه‌های کم عمق ۵/۰ در نظر گرفته می‌شود

در تحقیق حاضر جهت ارزیابی روش‌های تجربی و تجزیه و تحلیل داده‌ها از روابط زیر استفاده می‌شود [۲].

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}))^2}{(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2)(\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{n-1}} \quad (3)$$

X_i مقدار مشاهده شده، Y_i مقدار برآورد شده و n تعداد داده‌ها است. در مقایسه مدل‌ها، مدلی که دارای ضریب تبیین (R^2) بیشتر و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) کمتری باشد مدل مطلوب‌تری است.

نتایج و بحث

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 دو آماره R^2 و RSME مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است: بر اساس جدول ۳ رابطه سازمان عمران آمریکا نسبت به دیگر روابط تجربی از دقت بالاتری در برآورد میزان تبخیر آب در سد کالپوش برخوردار است.

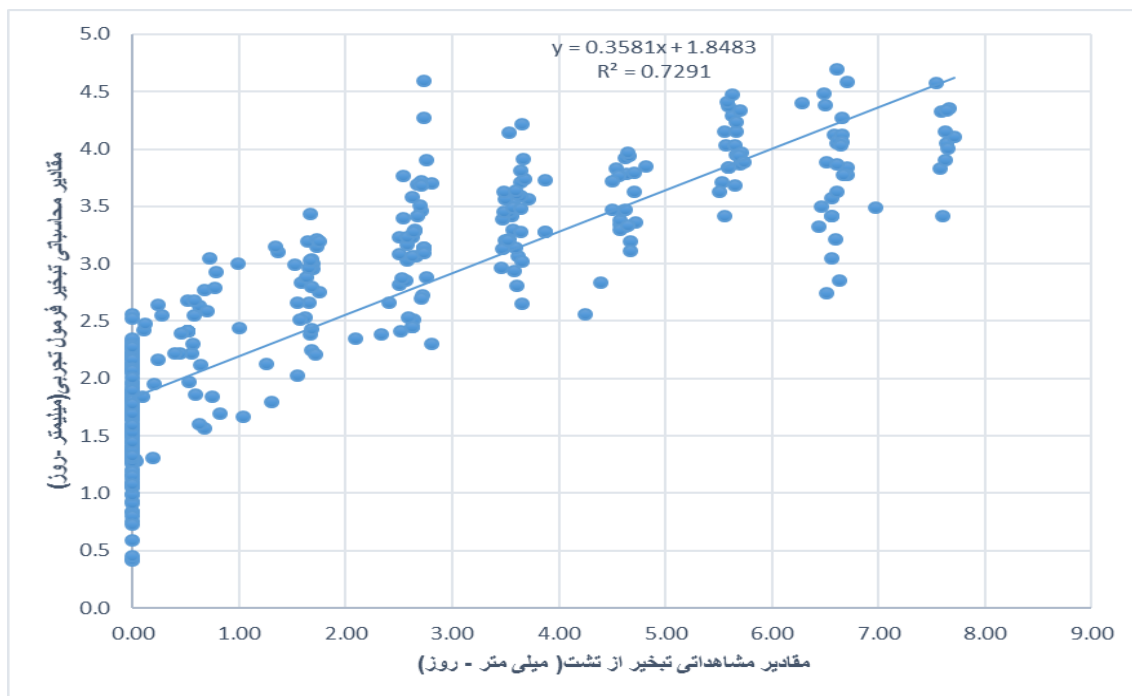
جدول ۴- نتایج حاصل از روابط تجربی

ردیف	نام رابطه تجربی	R^2	RSME
۱	سازمان عمران آمریکا	۰/۷۳	۱/۶۶
۲	مایر	۰/۴۵	۲/۱۸
۳	مارسیانو	۰/۲۴	۲/۴۸
۴	شاهتین	۰/۲۸	۲/۵۸
۵	هنفر	۰/۲۴	۲/۴۹
۶	ایوانف	۰/۴۹	۱/۹۶
۷	تیچومیرف	۰/۳۹	۲/۴۰

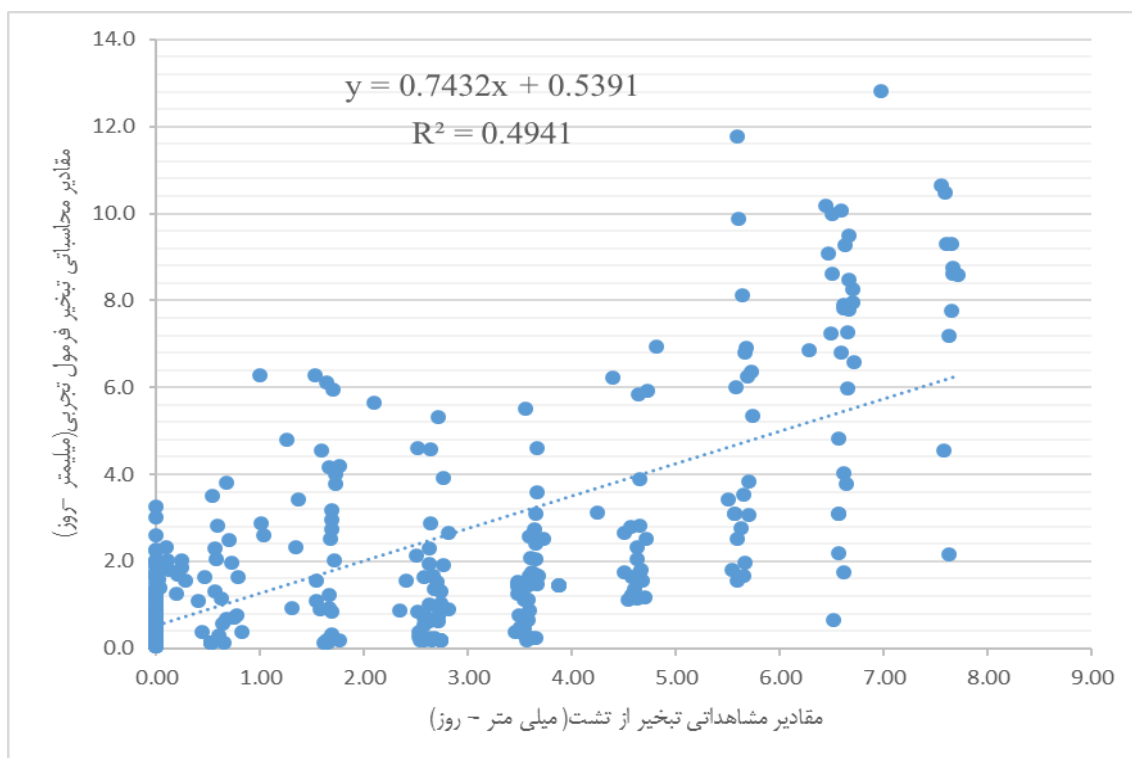
در شکل‌های زیر نمودار ضریب همبستگی پیرسون و نمودار پراکنش بین تبخیر از تشت و روابط تجربی سازمان عمران آمریکا و ایوانف ارائه گردیده است.



شکل ۱- ضریب همبستگی بین تبخیر حاصل از تشت و فرمول‌های تجربی



شکل ۲- مقایسه مقادیر تبخیر تشت با روش سازمان عمران آمریکا



شکل ۳- مقایسه مقادیر تبخیر تشت با روش ایوانف



نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی میزان تبخیر در سد کالپوش پرداخته شد. ابتدا با استفاده از تشت تبخیر، میزان تبخیر محاسبه گردید. سپس با استفاده از پارامترهای هواشناسی شامل رطوبت نسبی، دما، سرعت و جهت باد و با استفاده از هفت روش تجربی، برآوردی از میزان تبخیر روزانه سد انجام گرفت.

در ادامه این تحقیق با استفاده از روش‌های آماری به مقایسه هر کدام از این روش‌ها با تبخیر حاصل از تشت پرداخته شد که در این بین روش تجربی ایوانف با در نظر گرفتن ضریب تشت تبخیر، با کمترین خطا و ضریب همبستگی مناسب‌تر انتخاب گردید.

در تشت‌های تبخیر ضرایبی برای افزایش دقت و کاهش خطای آن در نظر گرفته می‌شود. ضرایب مختلف تبخیر برای تشت محاسبه و هر کدام از این محاسبات با روش ایوانف مقایسه گردید تا ضریب بهینه با کمترین خطا و بهترین همپوشانی انتخاب گردد که ضریب ۰/۸۵ شامل این خصوصیات بود.

میزان تبخیر در سد کالپوش در طول ماه‌های سال ۱۴۰۰ محاسبه و در مجموع به میزان ۸۰۷ میلیمتر محاسبه گردید. با استفاده از نمودار حجم سطح دریاچه سطح این میزان تبخیر معادل ۷۰۶ هزار مترمکعب است که می‌توان ضریب تبخیر ۰/۸۵ را نیز اعمال نمود تا خطای حاصل از تشت پوشش داده شود. میزان تبخیر با این تجدید محاسبه به میزان ۶۰۰ هزار مترمکعب معادل شش درصد کل آب مخزن در آن سال است.

تقدیر و تشکر

این مقاله از پایان نامه حسن شکاری، دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود با عنوان "برآورد مقدار هدررفت آب ناشی از تبخیر در سد کالپوش استان سمنان و بررسی روش‌های کاهش آن" با هدایت استاد راهنما دکتر احمد نظری استخراج شده است.

مراجع

۱. علیزاده، ا. (۱۳۹۴)، "اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ نهم"، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع) مشهد.
۲. نجفوند دریکوندی، م. اسلامی، ح. (۱۳۹۵)، "مقایسه روش‌های تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد آب"، فصلنامه علمی و تخصصی مهندسی آب، شوشتر.
۳. Pan coefficients for estimating open-water surface evaporation for a humid tropical monsoon climate region in India - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Pan-coefficients-obtained-using-various-pan-coefficient-models_tbl۳_۳۳۳۸۹۰۱۵۱
۴. مهندسان مشاور آب نیرو. نشریه شماره ۲۷۲- سازمان مدیریت و برنامه ریزی: "راهنمای مطالعات بهره برداری از مخازن سدها- دستورالعمل بهره برداری و نگهداری از سد کالپوش و اجزای وابسته" (۱۳۹۱)