دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

برآورد تبخیر از سطح آزاد آب در دشت مازندران (آب‌بندان دازمیرکنده) و مقایسه آن با هفت روش تجربی

شقایق امامدوست[۱]، علی شاهنظری[۲] و جانعلی تقوی[۳]

۱ و ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب و مربی گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، (نویسنده مسوول :aliponh@yahoo.com)
تاریخ دریافت: ۹۵/۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۲۴

چکیده

تبخیر یکی از فرآیندهای مهم و تأثیرگذار در چرخه آب است که سبب از بین رفتن حجم زیادی از آب آب‌بندان‌ها و دریاچه‌ها می‌گردد که اندازه‌گیری آن اهمیت زیادی در برنامه‌ریزی منابع آب دارد. در این پژوهش به وسیله تشت شناور مقدار تبخیر از سطح آب‌بندان دازمیرکنده در استان مازندران به مدت ٦ ماه (فروردین-شهریور سال ۱۳۹۵) به صورت روزانه اندازه‌گیری شد و مقدار تبخیر محاسبه شده از طریق فرمول‌های مایر، USBR، شاهتین، هفنر، پنمن، مارسیانو و ایوانف ایستگاه دشت ناز ساری مقایسه شد و با استفاده از معیارهای آماری مشخص شد روش ایوانف، USBR و شاهتین به ترتیب دارای دقت زیادی برای تعیین تبخیر از سطح آزاد در این منطقه می‌باشد. مقادیر جذر میانگین مربع خطا، انحراف نتایج و آزمون t در بهترین مدل به ترتیب ۱/۳٦، ۰/۱۸ و ۰/۹۵ می‌باشد. برای تعیین بهترین ضریب تشت با توجه به دقت فرمول ایوانف برای منطقه، از مقادیر روزانه تبخیر با ضرایب ۰/٦، ۰/۷، ۰/۷۵، ۰/۸، ۰/۸۵ و ۰/۹ استفاده شد. با توجه به نتایج آماری ضریب ۰/۷۵ با حداقل مقدار MBE, RMSE و t به عنوان بهترین ضریب برای تشت شناور انتخاب شد. نتایج حاصل نشان دهنده‌ی ۱۸ درصد تلفات تبخیر طی دوره پژوهش از حجم کل آب‌بندان می‌باشد که می‌توان با استفاده از بادشکن، اجسام شناور و برنامه‌ریزی صحیح منابع آب این مقدار را به حداقل رساند.

واژه‌های کلیدی: آب‌بندان، روش ایوانف، تبخیر از سطح آزاد، تشت تبخیر شناور، دشت ناز

مقدمه

کشور ایران در یک کمربند خشک و نیمه خشک واقع می‌باشد که از دیرباز آب به عنوان یک عنصر حیاتی و تعیین کننده برای پیشرفت جوامع در آن به حساب می‌آمد. یکی از مشکلاتی که همواره کشاورزان با آن مواجه بوده‌اند بحران کم آبی و اثرات منفی ناشی از آن بوده است که با توجه به شرایط جغرافیایی هر منطقه، تدبیر ویژه‌ای برای برون رفت از این مشکل اندیشیده می‌شود. به عنوان مثال حفر قنات در مناطق بیابانی و خشک از جمله این راهکارهاست (۲۱). در مناطق شمالی کشور با توجه به پایین بودن تبخیر نسبت به نواحی دیگر ایران استفاده از استخرهای روباز نظیر آب‌بندان توجیه پذیر است. در واقع آب‌بندان یک استخر خاکی ذخیره آب است که از خاک برداری یک محدوده، کوبیدن و ایجاد دیواره و حصار دور این محدوده به وجود می‌آید (۲۱). این سازه منحصر به فرد با توجه به سازگاری آن با محیط و قرار گرفتن در محدوده اراضی کشاورزی نقش عمده‌ای در تامین آب زراعی کشاورزان ایفا می‌کند. براساس اطلاعات موجود ساخت آب‌بندان‌ها از ۳ هزار سال پیش تاکنون در استان‌های شمالی رواج داشته که از حدود ۲۰۰ سال پیش تا کنون استفاده از آن به عنوان یکی از مهمترین منابع تامین آب زراعی توجه ویژه شده است. مساحت کل آب‌بندان‌های استان مازندران، گلستان و گیلان ۳۲ هزار و ۹۷۳ هکتار است که آب آبیاری ۸۱ هزار هکتار اراضی شالیزاری را تامین می‌کند (۲۱). آب‌بندان به واسطه سازگاری با محیط زیست، به عنوان زیستگاه پرندگان و حیات وحش و ایجاد منظرهای زیبا از یک سو و از سوی دیگر هزینه نسبتا پایین نگهداری و بهره‌برداری در مقایسه با حفر و تجهیز چاه عمیق و نیمه عمیق از دیرباز مورد توجه بوده است (۱۱). در حال حاضر ۷۰۰ قطعه آب بندان با مساحت بیش از ۱۷۰۰۰ هزار هکتار در مازندران وجود دارد که می‌تواند بیش از ۳۵۰ میلیون مترمکعب آب را در خود ذخیره کند و بیش از ۵۰٪ از تولیدات کشاورزی استان با آب‌بندان‌ها ارتباط دارد (۱۵). برنامه‌ریزی جهت استفاده بهینه از منابع آب موجود نیازمند شناخت اجزا مختلف بیلان آب می‌باشد. فرآیند تبخیر در دو شکل تبخیر از سطوح آزاد آب نظیر دریاچه‌ها و تبخیر از سطح خاک لخت اتفاق می‌افتد (۲۹). پیچیدگی فرآیند تبخیر از پیکره دریاچه های آبی مانند دریاچه و مخازن سدها، کمبود اطلاعات کافی و معتبر مورد نیاز و از طرفی عدم اتکاء مدیریت این منابع و مخازن به داده دقیق‌تر، موجب کند شدن پیشرفت‌های تحقیقاتی و کاربردی در این زمینه نسبت به سایر مولفه‌های هیدرولوژیکی شده است. مدیریت و بهره‌برداری از ذخایر سدها نیاز به برآوردهای مطمئن‌تری از تبخیر دارد (۱۸). در اغلب مناطق خشک و نیمه خشک بررسی‌ها نشان داده است که حجم قابل توجهی از ذخیره آب پشت سدها به‌صورت تبخیر تلف شده و از دسترس خارج می‌گردد (۲۵). برآورد تبخیر از دریاچه‌ها و مخازن سدها، به دلیل عوامل مختلف تاثیر گذار بر آن، فرآیند پیچیده‌ای می‌باشد. اصولا شدت تبخیر از پیکره‌های آبی بیشتر با انرژی در دسترس و مورد نیاز تبخیر و امکان پخشیدگی بخار آب به اتمسفر کنترل می‌گردد. روش‌های مختلفی بر اساس در نظر گرفتن عوامل مختلف موثر بر تبخیر، جهت برآورد آن توسعه داده شده است (۱). به‌طور کلی روش‌های مورد استفاده در برآورد تبخیر از

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.7.1]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.241]

سطح آب را می‌توان به چهار دسته تقسیم نمود: ۱) اندازه‌گیری با تشتک تبخیر ۲) بیلان آب ۳) بیلان انرژی ۴) انتقال جرم (۱۰). روش اندازه گیری با تشتک تبخیر به منظور برآورد ارتفاع تبخیر بیش از یک قرن است که کاربرد دارد در این روش مقدار تبخیر به طور مستقیم و با اندازه‌گیری تغییرات عمق و حجم آب در تشتک صورت می‌گیرد (۲۰). تشت تبخیر به‌علت سهولت تفسیر داده‌های آن در سراسر دنیا به عنوان شاخصی برای تعیین تبخیر از دریاچه‌ها و مخازن استفاده می‌شود (۱۲). برای محاسبه تبخیر از داده‌های تشت باید از ضریبی موسوم به ضریب تشت استفاده نمود (۲۸). ضریب تشت به عنوان یک عامل ضروری به پارامترهایی نظیر میانگین سرعت باد روزانه، شرایط رطوبتی و فاصله‌ای از تشت که دارای پوشش گیاهی است بستگی دارد (۷). عمدتا برآوردهای تبخیر در دریاچه و مخازن سدها بر داده‌های حاصل از تشت متکی است، این در حالی است که عدم قطعیت در این داده‌ها مورد تاکید بسیاری از محققان است (۲۳). امروزه استفاده از روش‌های ریاضی و روابط تجربی در علوم و فنون مهندسی رواج بیشتری یافته است. بیشتر محققین با اصلاح روش‌های تجربی موجود و کشف روابط جدید، سعی در یافتن رابطه‌ی ساده و در عین حال با دقت زیاد، جهت جایگزینی روش‌های میدانی هستند (۲۵). محققان توانسته‌اند با به‌کارگیری روش‌های ریاضی، تجربی و یا ترکیبی از هر دو روش، پارامتر تبخیر را تحلیل کنند (۱۶ و ۹، ۶، ۴، ۳). نتایج محققین حاکی از ارتباط بین تبخیر و پارامترهای هواشناسی در هر منطقه با اقلیمی خاص است. روابط تجربی ارائه شده برای تخمین تبخیر از سطوح آزاد با در نظر گرفتن پارامترهای هواشناسی به عنوان ورودی، دارای تنوع زیاد است (۲۶). مهم‌ترین پارامترهای هواشناسی درگیر در تبخیر شامل سرعت باد، رطوبت نسبی و دما می‌باشند. روابط تجربی ارائه شده با مد نظر قرار دادن هر یک از این پارامترها سعی در کاهش خطای برآورد تبخیر دارند (۲۹). هریک از روابط تجربی بنا به شرایط آب و هوایی هر منطقه مورد تایید قرار گرفته است به عنوان مثال زارع ابیانه و همکاران (۳۰) با استفاده از اطلاعات ۶۱ ایستگاه هواشناسی در سطح کشور، مقادیر تبخیر را از ۹ روش برآورد کردند. مقایسه تبخیر برآوردی با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی تشت تبخیر کلاس A نشان داد روش ایوانف در بین روش‌های مورد مطالعه هم‌خوانی خوبی با داده‌های اندازه‌گیری نشان داده است. مجیدی و همکاران (۱۸) به ارزیابی روش‌های برآورد تبخیر از سطح آب و مقایسه‌ی آن با بیلان انرژی دریاچه سد دوستی پرداختند. در نهایت از بین ۱۹ روش برآورد تبخیر بر اساس بیلان انرژی روش‌های جنسن- هیز، مک کینگ و پنمن نتایج مطلوب‌تری نسبت به سایر روش‌ها برآورد کرد. ویندهام و استال (۲۸) نشان دادند به‌کار گیری مدل هفنر در تبخیر سنجی دریاچه ایلی نویز منجر به ارائه نتایج مناسبی نشد. بورن و هسچ (۵) روش تجربی مایر را به دلیل سادگی و عدم نیاز به داده تابش، منسب‌ترین روش بررسی روند تبخیر در کانادا معرفی نمودند. مورتون (۲۲) استفاده از آمار باد را سبب افزایش خطا در تخمین تبخیر اعلام کرد. در تحقیقاتی که یزدانی و همکاران (۲۹) و جلالی کوتنایی و همکاران (۱۴) برای محاسبه‌ی تبخیر از سطح آزاد آب انجام دادند فرمول ایوانف بهترین روش تجربی برای برآورد تبخیر از سطح آزاد آب در مناطق مرطوب انتخاب شد. از آنجایی که شرایط آب و هوایی هر منطقه متفاوت است، لذا تعیین مناسب‌ترین روش تجربی برای تخمین تبخیر که کمترین اختلاف را با نتایج تشت داشته باشد. امری اجتناب ناپذیر است (۲۹). در این پژوهش به‌وسیله تشت شناور مقدار تبخیر از سطح آزاد آب‌بندان دازمیرکنده در استان مازندران به مدت ۶ ماه (فروردین-شهریور سال ۱۳۹۵) به صورت روزانه اندازه‌گیری شد و با استفاده از داده‌های حاصل از ایستگاه هواشناسی دشت ناز مقدار تبخیر از طریق فرمول‌های مایر، USBR، شاهتین، هفنر، پنمن، مارسیانو و ایوانف محاسبه شد. هدف این پژوهش برآورد تبخیر از آب‌بندان، تعیین ضریب تشت شناور و مقایسه مقادیر تبخیر اندازه‌گیری شده از تشت شناور با مقادیر برآورد شده از فرمول‌های تجربی می‌باشد.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در ۱۷ کیلومتری شمال شهرستان ساری، در آب‌بندان روستای دازمیرکنده انجام شده است. طول و عرض جغرافیایی منطقه به ترتیب ۳۶ درجه و ۷۱ دقیقه شمالی و ۵۳ درجه و ۷ دقیقه شرقی بوده و ارتفاع متوسط منطقه ۱۴ متر پایین‌تر از سطح دریای آزاد است. این آب‌بندان در سال ۱۳۶۸ توسط جهاد کشاورزی ساخته شد. عمق متوسط آب‌بندان ۳/۵ متر و مساحت آن ۳۰ هکتار می‌باشد. کل اراضی تحت پوشش آن ۱۱۰ هکتار می‌باشد که ۷۰ هکتار آن را زمین‌های شالیزاری تشکیل می‌دهد به منظور استفاده بهینه از آب‌بندان به‌صورت تلفیقی برای پرورش ماهی نیز از آن استفاده می‌شود. طبق آمار هواشناسی ایستگاه سینوپتیک دشت ناز که در فاصله ۱۰ کیلومتری از آب‌بندان قرار دارد میانگین بارندگی روزانه طی دوره‌ی پژوهش ۱/۶۹ میلی‌متر و میانگین دمای هوا ۲۳/۴ درجه سانتی‌گراد و میانگین رطوبت نسبی ۷۴/۶ درصد و دارای اقلیم مرطوب است. خلاصه‌ای از آمار بلند مدت پارامترهای هواشناسی طی سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۸۰ در ایستگاه هواشناسی دشت ناز در جدول ۱ نشان داده شده است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.7.1]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.241]

جدول ۱- میانگین پارامترهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک دشت ناز طی سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۸۰
Table 1. Average of Meteorological Parameters in Dashte-e- naz synoptic station

دما (درجه سانتی‌گراد)	رطوبت نسبی (درصد)	ساعات آفتابی	تبخیر (میلی متر)	بارندگی (میلی‌متر)	سرعت باد (متر بر ثانیه)
۱۷/۵	۷۳/۷	۵/۸	۳/۱	۱/۷	۰/۷

رابطه (۱) $E=(1+\frac{U_2}{16})*C*(e_s-e_a)$

رابطه (۲) $E= 0.03*U_2*(e_s-e_a)$

رابطه (۳) $E= (0.116+0.017U_2)*(e_s-e_a)$

رابطه (۴) $E= 0.028*(e_s-e_a)$

رابطه (۵) $E= 0.35*(e_s-e_a)*(0.5+\frac{U_2}{100})$

رابطه (۶) $E= 0.833*(4.57*\bar{T}+43.3)$

رابطه (۷) $E=0.0018*(\bar{T}+25)^2*(100-RH)$

اندازه‌گیری تبخیر از تشت شناور

تشت تبخیر

برای اندازه‌گیری تبخیر از تشت تبخیر استفاده می‌شود که معمولاًاز جنس آهن گالوانیزه و دارای ابعاد مختلف است. تشت تبخیر را می‌توان داخل خاک، روی سطح خاک و یا بصورت شناور در آب نصب کرد. یکی از علل عمده اختلاف تبخیر از تشت نصب شده در خشکی با تبخیر از دریاچه یا مخزن عمیق اختلاف ذخیره گرما می‌باشد. قسمتی از گرمایی که به وسیله سطح دریاچه یا مخزن عمیق در فصل تابستان و بهار گرفته می‌شود، برای گرم کردن آب در اعماق به‌کار می‌رود و فورا نمی‌تواند به عنوان منبع انرژی تبخیر مصرف شود. به علت کم بودن آب در تشت قدرت ذخیره کردن گرما در آن کم است و نتیجه آن این است که اندازه‌گیری‌ها مستقیما به تامین گرما بستگی دارد. تشت‌های شناور اغلب برای کم کردن این اختلاف به‌کار می‌رود (۱۷). برای اندازه‌گیری تبخیر از سطح آب‌بندان از تشت شناور استفاده شد. این تشت دارای ابعاد ۵۰*۵۰*۵۰ سانتی‌متر و جنس آن از ورق گالوانیزه با ضخامت ۲ میلی‌متر و سفید رنگ می‌باشد. بخشی از آن در آب مستغرق و لبه‌ی آن تقریبا ۷ سانتی‌متر از سطح آب بالاتر می‌باشد. کف آن کاملا بسته و آب بندی شده می‌باشد. سطح آبدر داخل تشت با سطح آب خارج تشت برابر است و مقدار تبخیر با توجه میزان آبی که به تشت اضافه می‌شود تا به شاخص برسد تعیین می‌گردد. برای جلوگیری از کم شدن امواج آب داخل تشت از صفحات سوراخ شده در چهار طرف آن استفاده شد. داده برداری به صورت روزانه راس ساعت ۹ صبح طی ۶ ماه (فروردین-شهریور سال ۱۳۹۵) انجام شد.

فرمول‌های تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد

برای محاسبه تبخیر از سطح آزاد توسط فرمول‌های تجربی از آمار و اطلاعات ایستگاه هواشناسی دشت ناز استفاده شد. آمار روزانه ایستگاه هواشناسی دشت ناز شامل دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی (حداقل و حداکثر)، سرعت باد و ساعات آفتابی می‌باشد. معادلات تجربی مورد استفاده در این پژوهش به صورت زیر است: (۱ معادله مایر، ۲ معادله مارسیانو، ۳ معادله شاهتین، ۴ معادله هنفر، ۵ پنمن، ۶ USBR و ۷ ایوانف) که به منظور ارزیابی نتایج تشت تبخیر شناور استفاده شد.

در معادلات ایوانف و USBR مقدار تبخیر از سطح آزاد بر حسب میلی‌متر در ماه است که برای همسانی با سایر معادلات به مقدار روزانه تبدیل شد. E تبخیر (میلی‌متر بر روز)، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (کیلومتر بر ساعت e_s فشار بخار اشباع (میلی‌متر جیوه)، e_a فشار بخار واقعی (میلی‌متر جیوه)، $\bar{T}$ میانگین روزانه دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)، RH میانگین روزانه رطوبت نسبی (درصد)، Rs تابش خورشیدی (لانگلی) و C ضریبی است که برای دریاچه‌های عمیق ۰/۳۶و برای دریاچه‌های کم عمق ۰/۵ درنظر گرفته می‌شود (۱۹). زارع ابیانه و همکاران (۳۰) و مجیدی و همکاران (۱۸) برای برآورد تبخیر از سطح شالیزار ضریب C را در فرمول مایر برای یک دریاچه کم عمق درنظر گرفتند. شایان ذکر است که در این پژوهش میزان تبخیر از سطح آزاد برای یک دریاچه عمیق (آب‌بندان با متوسط عمق ۳/۵ متر)محاسبه شده است. به دلیل اینکه مقادیر فشار بخار اشباع و فشار واقعی هوا و تابش خورشیدی در این ایستگاه محاسبه نشده است لذا توسط روابط زیر محاسبه شدند.

رابطه (۸) $e_s(T_x) = 0.6018 \exp(\frac{17.27*T_x}{T_x+237.3})$

رابطه (۹) $e_s(T_n) = 0.6018 \exp(\frac{17.27*T_n}{Tn+237.3})$

رابطه (۱۰) $e_a= 0.6018 \exp(\frac{\frac{RH_x+RH_n}{2}}{\frac{50}{e_s(T_x)}+\frac{50}{e_s(T_x)}})$

رابطه (۱۱) $R_s= R_a*(a+b\frac{n}{N})$

در معادلات فوق $e_s(T_n)$ و $e_s(T_x)$ به ترتیب مقدار فشار بخار اشباع در دمای ماکزیمم و مینیمم است. e_a نیز معرف فشار بخار واقعی هوا است (۲۸). n تعداد واقعی ساعات آفتابی مشاهده شده در طول ماه و N حداکثر ساعات آفتابی ممکن یا قابل مشاهده در ماه مورد نظر می‌باشد که مقدار آن بستگی به عرض جغرافیایی منطقه و ماه مورد نظر دارد. a و b ضرایب تجربی هستند که بترتیب مقادیر آن‌ها ۰/۲۳ و ۰/۴۸ می‌باشد. R_a تابش برون زمینی (مگا ژول بر متر مربع در روز) می‌باشد (۲). همان‌طور که در معادلات فوق نیز مشخص است تمام روش‌ها به جز USBR از چند پارامتر برای محاسبه تبخیر استفاده کردند وجود پارامترهای مختلف در هر روش

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.7.1]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.241]

می‌تواند معیاری برای ارزیابی اهمیت پارامترهای هواشناسی برای محاسبه تبخیر از سطح آزاد باشد (۲۹).

تعیین ضریب تشت شناور

در این پژوهش مقدار تبخیر توسط فرمول ایوانف با استفاده از پارامترهای هواشناسی ایستگاه دشت ناز محاسبه شد و با مقادیر قرائت شده از تشت شناور در زمان مشابه به صورت روزانه (فروردین–شهریور) مقایسه شد و با رگرسیون گیری بین مقادیر تبخیر بدست آمده از روش ایوانف و مقادیر قرائت شده از تشت شناور با ضرایب ۰/۶، ۰/۷، ۰/۷۵، ۰/۸، ۰/۸۵ و ۰/۹ نتایج حاصله مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی ضریب تشت شناور از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، انحراف نتایج (MBE) و آزمون t استفاده شد.

مقایسه تبخیر از تشت شناور با فرمول‌های تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد

از آنجایی که هدف این پژوهش ارزیابی فرمول‌های برآورد تبخیر از سطح آزاد است، درنتیجه تبخیر اندازه‌گیری شده توسط تشت شناور با مقادیر برآوردی از هر روش تجربی مقایسه شد و برای ارزیابی دقت هر روش ضریب همبستگی پیرسون (r) جذر میانگین مربع خطا (RMSE)، انحراف نتایج (MBE) و ضریب باقیمانده جرم (CRM) محاسبه شد.

$$RMSE=\sqrt{\frac{(\sum(E_{si}-E_{oi})^2)}{n-1}} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$MBE=(\sum_{i=1}^{n}(E_{oi}-E_{si}))/n \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$r=\frac{\frac{\sum xy}{n-1}}{\sqrt{\sum\frac{x^2}{n-1}*\sum\frac{Y^2}{n-1}}} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$CRM=\frac{\sum_{i=1}^{n}E_{oi}-\sum_{i=1}^{n}E_{si}}{\sum_{i=1}^{n}E_{oi}} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$t=\sqrt{\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2-MBE^2}} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

پارامتر MBE نشان می‌دهد که اولا آیا مدل مقدار متغیر مورد نظر را کم یا زیاد برآورد می‌کند و ثانیا مقدار کمی آن چقدر است. زمانی که MBE برابر صفر است، مشخص می‌شود که مدل فضای مطالعه شده را خوب برآورد کرده و هیچ‌گونه انحرافی وجود ندارد (۲۹). مقدار پارامتر آماری CMR میزان کم یا زیاد برآورد کردن مدل را تعیین می‌کند. اگر مقدار CMR منفی باشد یعنی مدل پیشنهادی مقادیر تبخیر را از مقادیر مورد انتظار بیشتر برآورد کرده است. مقدار مثبت این پارامتر نشان از برآورد کم تبخیر نسبت به مقادیر مورد انتظار است. مقدار پارامتر t ترکیبی از دو معیار MBE و RMSE می‌باشد که مقدار کمتر آن نشان دهنده‌ی دقت بیشتر آن می‌باشد (۱۳).

نتایج و بحث

در جدول ۲ مقادیر تبخیر تجمعی روزانه اندازه‌گیری شده توسط تشت شناور نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲ ازماه فروردین تا مرداد نرخ تبخیر سیر صعودی داشته و در ماه مرداد به بالاترین مقدار معادل ۱۷۶/۱ می‌رسد. ولی در ماه شهریور تبخیر کمتر می‌شود که این موضوع با توجه میانگین دما توجیه پذیر است.

تعیین بهترین فرمول تجربی برای برآورد تبخیر از سطح آزاد

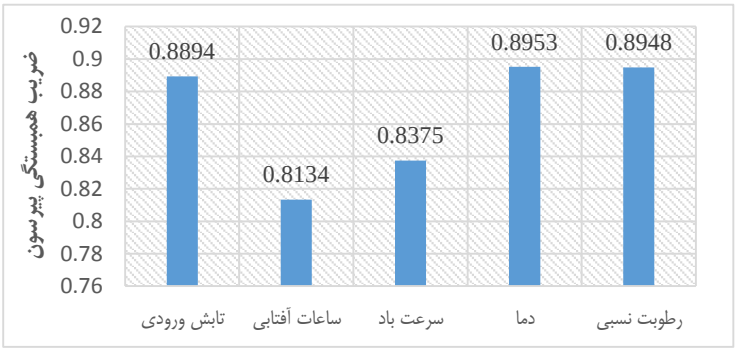
برای بدست آوردن ارتباط بین پارامترهای موثر بر تبخیر، ضریب همبستگی پیرسون بین دما، رطوبت نسبی، تابش ورودی، ساعات آفتابی و سرعت باد نسبت به تبخیر از تشت شناور محاسبه شد (شکل ۱). همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است دما بیشترین، سرعت باد و ساعت آفتابی کمترین ضریب همبستگی با تبخیر از تشت شناور را دارند. ترز و ارول کسکن (۲۴) نیز به تاثیر کم سرعت باد در ارتفاع ۲ متری بر تبخیر از سطح آزاد نسبت به ثایر پارامترها اشاره داشتند. مقدار ضریب همبستگی کلیه پارامترها با تبخیر از تشت شناور زیاد است اما با توجه به نتایج پارامترهای هواشناسی دما و رطوبت نسبی از تاثیر گذاری بیشتری در فرآیند تبخیر در منطقه مورد پژوهش برخوردار می‌باشند. مقدار تبخیر از سطح آزاد با استفاده از اطلاعات هواشناسی ایستگاه دشت ناز و بر اساس معادله‌های فوق محاسبه شدند و مقادیر آن‌ها نسبت به تبخیر اندازه‌گیری شده توسط تشت تبخیر و نسبت به بهترین خط برازش داده شده، ارزیابی شد (شکل ۲). سپس با توجه به روابط ذکر شده (۱۶و ۱۵ ،۱۴ ، ۱۳ ،۱۲) شاخص‌های آماری محاسبه شد. نتایج حاصل از شاخص‌های آماری روش‌های مختلف در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۲- میانگین تبخیر اندازه‌گیری شده از تشت شناور طی ماه‌های فروردین- شهریور

Table 2. Average of measured evaporation from the floating pan in April to September

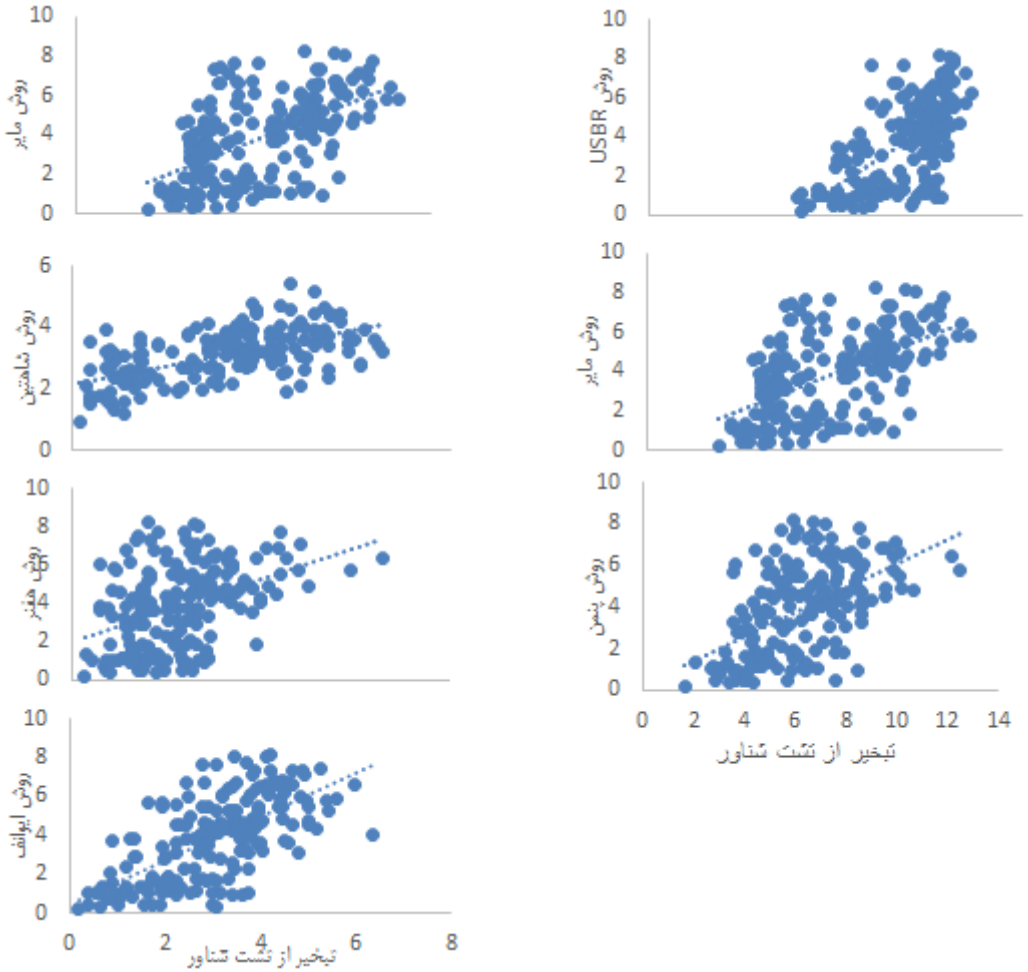
	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
تبخیر تجمعی ماهانه (میلی‌متر)	۵۱/۸	۱۱۶/۸	۱۴۶/۴	۱۵۱/۸	۱۷۶/۱	۱۳۳/۳

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.7.1]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.241]



شکل ۱- ضریب همبستگی بین پارامترهای هواشناسی و تبخیر از تشت شناور

Figure 1. Correlation coefficient between meteorological parameters and evaporation from floating pan



شکل ۲- نمودار همبستگی بین مقادیر تبخیر از سطح آزاد روزانه توسط فرمول‌های تجربی در مقابل مقدار تبخیر روزانه از تشت شناور طی ۶ ماه (فروردین-شهریور)

Figure 2. Correlation graph between evaporation values from daily free surface by experimental formulas versus daily evaporation amount from floating pan for 6 months (April-September)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.7.1]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.241]

جدول ۳- نتایج حاصل از شاخص‌های آماری روش‌های مختلف تبخیر از سطح آزاد نسبت به تبخیر از تشت شناور
Table 3. The results of statistical indices in several methods of evaporation from free surface versus evaporation from floating pan

روش	شیب	عرض از مبدا	CRM	R^2	MBE	t	RMSE
ایوانف	۱/۱	۰/۴۶	۰/۲	۰/۴۳	۰/۲۶	۲/۱	۱/۷
هفنر	۰/۸۲	۲	۰/۴۴	۰/۱۶	۱/۶	۱۰/۱	۲/۶
مایر	۰/۲	۰/۱۸	−۲/۳۶	۰/۳۰	−۸/۷	۳۳	۹/۴
مارسیانو	۰/۹۶	۲	۰/۵۳	۰/۱۴	۱/۹	۱۲/۱	۲/۸
شاهتین	۰/۲۳	۲/۱۴	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۷	۵/۲	۲/۱
پنمن	۰/۵۸	۰/۲۲	−۰/۶۴	۰/۲۹	−۲/۳	۱۶/۱	۳
USBR	۲/۱۳	−۴/۷۸	۰/۲۳	۰/۴	−۰/۴	۲/۸	۱/۹

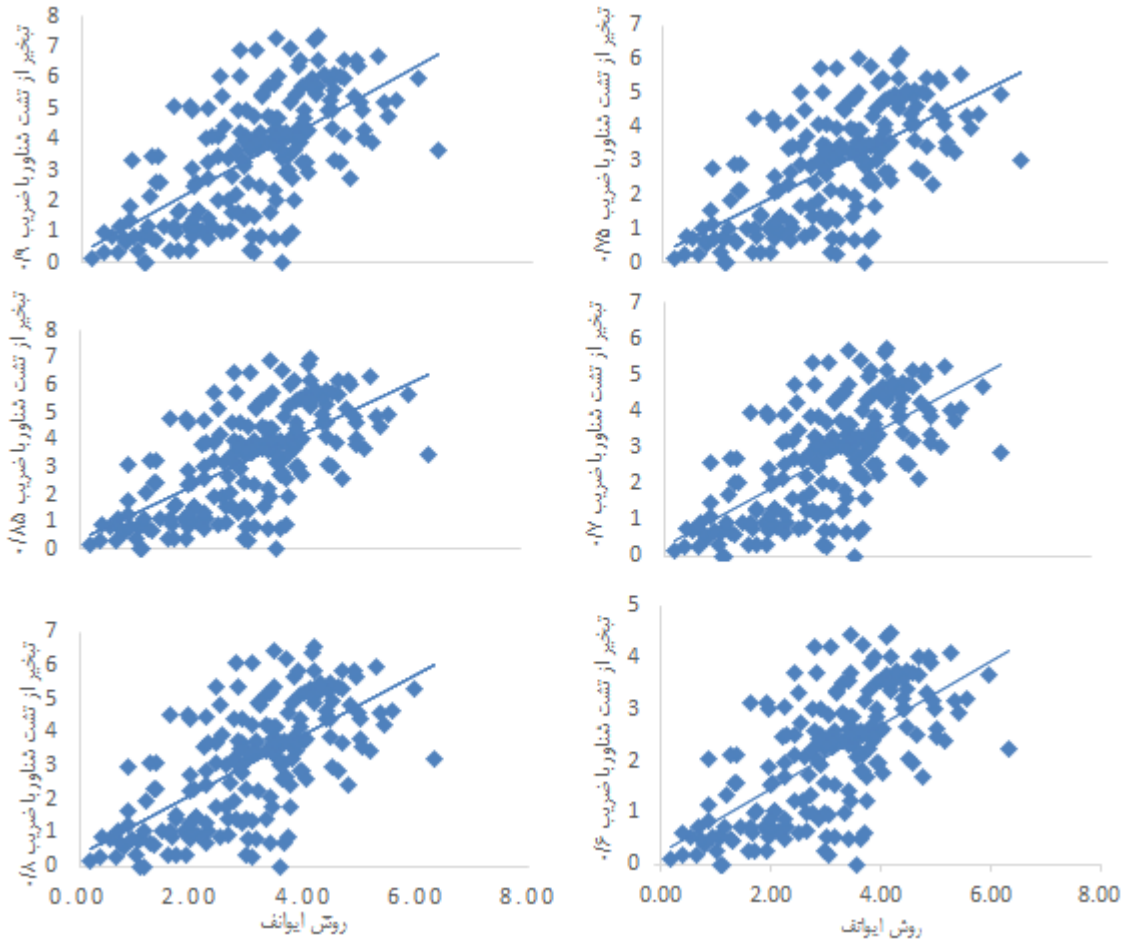
در شکل ۲ مقادیر تبخیر از سطح آزاد روزانه محاسبه شده توسط روش‌های فوق در مقابل تبخیر اندازه‌گیری شده روزانه برای آب‌بندان دازمیرکنده ترسیم شد و بهترین خط برازش داده شد. مطابق شکل و نتایج رگرسیونی و آماری در جدول ۲ می‌توان گفت روش USBR و مایر به ترتیب دارای بیشترین و کمترین شیب بوده است. نتایج موجود در جدول ۲ نشان می‌دهد که روش ایوانف کمترین مقدار t، MBE و RMS را دارد. آشکار است که هرچه RMSE و t کوچکتر باشد برآورد حاصل دقیق‌تر است. که نشان دهنده‌ی دقت بالای این روش در مناطق مرطوب است و با نتایج یزدانی و همکاران (۲۹)، جلالی کوتنایی و همکاران (۱۴) و زارع ابیانه و همکاران (۳۰) مطابقت دارد. همچنین با توجه به معادله ۷ مشاهده می‌شود که روش ایوانف برای اندازه‌گیری تبخیر از سطح آزاد به پارامتر دما و رطوبت نسبی بستگی دارد و این دو پارامتر در ایستگاه هواشناسی به راحتی قابل اندازه‌گیری است و با توجه به شکل ۲ این دو پارامتر بیشترین همبستگی را با تبخیر دارد.

روش مایر بیشترین مقدارRMSE, MBE و t را داراست معادله‌ی مایر مقدار تبخیر برآوردی را تقریبا دو برابر سایر معادلات تخمین میزند (۲). با توجه به ضرایب موجود در جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت برای محاسبه تبخیر از سطح آزاد در منطقه ساری و مناطق دارای آب و هوای مشابه به ترتیب معادله ایوانف، USBR و شاهتین با کمترین مقادیر RMSE، MBE و t مناسب اند. همانظور که قبلا ذکر شد مقادیر فشار بخار اشباع و فشار واقعی هوا طبق روابط تجربی محاسبه شد، شاید یکسان نبودن مقدار محاسباتی با مقادیر واقعی فشار بخار باعث کارایی کمتر سایر روش‌ها نسبت به روش ایوانف شده است (۲۹).

تعیین بهترین ضریب تشت شناور

مقادیر روزانه تبخیر محاسبه شده به روش ایوانف در مقابل مقادیر روزانه تبخیر اندازه‌گیری شده با ضرایب ۰/۶، ۰/۷، ۰/۷۵، ۰/۸، ۰/۸۵و ۰/۹ترسیم و بهترین خط برازش داده شد و مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۳). مطابق این شکل و نتایج آماری در جدول ۳ می‌توان گفت ضریب ۰/۶ و ۰/۹ دارای بیشترین و کمترین شیب است. بیشترین مقادیر پارامترهای آماری MBE, RMSE و t مربوط به ضریب ۰/۹ می‌باشد و کمترین آن مربوط به ضریب ۰/۷۵ می‌باشد. با استناد به ضرایب موجود در جدول ۴ می‌توان نتیجه گرفت بهترین ضریب تشت شناور ۰/۷۵ می‌باشد که علیزاده (۲) بهترین ضریب را بین ۰/۶ تا ۰/۸ بیان کرده است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.7.1]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.241]



شکل ۳- همبستگی مقادیر تبخیر بدست آمده از روش ایوانف با مقادیر اندازه‌گیری شده از تشت شناور با ضرایب مختلف
Figure 3. Correlation of the evaporation values obtained from the Ivanof method with the measured

جدول ۴- نتایج حاصل از شاخص‌های آماری روش ایوانف نسبت به تبخیر از تشت شناور با ضرایب مختلف
Table 4. The results of the statistical indices of Ivanov's method against evaporation from the floating pan with different coefficients

	شیب	عرض از مبدا	RMSE	MBE	t	R^2
تبخیر از تشت با ضریب ۰/۹	۱/۰۱	۰/۳۶	۱/۵	۰/۴	۱۴/۱	۰/۴۲
تبخیر از تشت با ضریب ۰/۸۵	۰/۹۵	۰/۳۴	۱/۴	۰/۲	۲/۱۳	۰/۴۲
تبخیراز تشت با ضریب ۰/۸	۰/۹	۰/۳۲	۱/۳	۰/۲	۲/۱	۰/۴۲
تبخیراز تشت با ضریب ۰/۷۵	۰/۸۴	۰/۳	۱/۲	−۰/۱۶	۱/۸	۰/۴۲
تبخیر از تشت با ضریب ۰/۷	۰/۷۹	۰/۲۸	۱/۲	−۰/۳۵	۴/۱۵	۰/۴۲
تبخیر از تشت با ضریب ۰/۶	۰/۶۲	۰/۲۲	۱/۴	−۰/۹	۱۱/۴۲	۰/۴۲

در این مقاله مقادیر تبخیر اندازه‌گیری شده از تشت شناور با هفت روش تجربی برآورد تبخیر از سطوح آزاد آب مقایسه شد. روش ایوانف در مقایسه با سایر روش‌های برآورد تبخیر دارای خطای کمتری بوده است و قابل توصیه در مناطق مرطوب می‌باشد. پارامترهای هواشناسی با تبخیر از سطح آزاد در ارتباط هستند که در این پژوهش به ترتیب دمای هوا، رطوبت نسبی، تابش ورودی، ساعت آفتابی و سرعت باد به ترتیب بیشترین ضریب همبستگی را با تبخیر از سطح آزاد دارند. حجم کل آب‌بندان دازمیرکنده ۱۲۵۰۰۰۰ متر مکعب و مقدار تبخیر تجمعی اندازه‌گیری شده توسط تشت شناور طی دوره ۶ ماهه برابر با ۷۷۶ میلی‌متر می‌باشد که با توجه به سطح ۳۰ هکتاری آب‌بندان تقریبا ۲۳۰۰۰۰ متر مکعب آب طی دوره‌ی کشت برنج تبخیر شد. تقریبا ۱۸ درصد از حجم آب موجود در آب‌بندان به صورت تبخیر سطحی از دسترس خارج شده است که می‌توان با برنامه ریزی صحیح و اتخاذ تصمیمات درست از مقدار تلفات تبخیر کم کرد. با توجه به سیر صعودی تبخیر طی دوره‌ی پژوهش بهتر است با بهبود برنامه ریزی صحیح استفاده از منابع آب مثل تغییر در الگوی کشت و استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی میزان تبخیر کاهش داده شود. با توجه به تاثیر سرعت باد و تابش ورودی بر روی تبخیر می‌توان با استفاده از بادشکن‌های گیاهی و کاشت درختان بلند روی دیواره آب‌بندان با ایجاد

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.7.1]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.241]

سایه و کاهش سرعت باد، تبخیر از سطح را کاهش داد. یکی دیگر از راهکارهای کاهش تبخیر از سطح استفاده از مواد کاهش‌دهنده تبخیر و توپ‌های شناور است که استفاده از آن‌ها نیاز به بررسی و تجزیه و تحلیل اقتصادی دارد.

منابع

1. Alizadeh, A., M.J. Khanjani, H. Taraz and M. Rahnavard. 2006. The study of the effects of temperature data correction on the accuracy of evaporation and perspiration calculations. Journal of Geography and Regional Development Research Journal, (6): 91-100 (In Persian).
2. Alizadeh, A. 2010. Principles of applied hydrology. 30, 5, University of Emam Reza, Mashhad, Iran, 991 pp (In Persian).
3. Brutsaert, M. and M.B. Parlange. 1998. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. Nature. 396(30): 100-120.
4. Burman, R.D. 1976. Intercontinental comparison of evaporation estimates. ASCE. Journal of Irrigation Journal of the Irrigation and Drainage Division. 102:109-118.
5. Burn, D.H. and N.M. Hesch. 2007. Trends in evaporation for the Canadian Prairies. Journal of Hydrology, 336: 61-73.
6. Coulomb, C.V., D. Legesse., F. Gasse and T. chernet. 2001. Lake evaporation estimates in tropical Africa (Lake Ziway, Ethiopia). Journal of Hydrology, (245): 1-18.
7. Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper. FAO Rome, Italy, (24): 156 pp.
8. Frevert, D.K., R.W. Hill and B.C. Braaten. 1983. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. Journal of Irrigation Drain. Eng. ASCE, 109(2): 265-270.
9. Gavin, H. and C.A. Agnew. 2004. Modeling actual, reference and equilibrium from a temperate wet grassland. Journal of Hydrology, 18: 229-246.
10. Gianniou, S.K. and V.Z. Antonopoulos. 2007. Evaporation and energy budget in lake vegoritis, greece. Journal of Hydrology, (345): 212-223.
11. Hoseyni Khesht Masjedi, H. and M. Hoseyni. 2009. Role of northern abbandan in development. Journal of Environmental, (114): 5-12
12. Irmak, S., D.Z. Haman and J.W. Jones. 2002. Evaluation of class A pance coefficients for estimating reference evapotranspiration in humid location. Journal of Irrigation and Drain, 128(3): 153-159.
13. Jacovides, C.P. 1997. Reply to comment on statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models. Agriculture Water Management, (3): 95-97
14. Jalali Koutenai, N. and A.A. Naseri. 2010. Study the most appropriate method to determine the potential evapotranspiration (In paddy fields). The first national conference on costal land water resources management, Sari, Iran, (In Persian).
15. Kamali. K. and M.H. Mahdian. 2011. Restoring abbandan: a strategy for coping with drought in the northern region of iran. The first national conference of examining ways to dealing with the water crisis, 378-403., Zabol, Iran (In Persian).
16. Linarce, E.T. 1967. Climate and the evaporation from crops. Journal of Irrigation and Journal of the Irrigation and Drainage Division, 93: 61-79.
17. Mahdavi Ardebili, M.H. 1957. Hydrology. 1, Tehran,Iran, 538 pp (Anonymous) (In Persian).
18. Majidi, M., A. Alizadeh., M. Vazifeh doust and A. Farid Hoseyni. 2015. Lake and reservoir evaporation estimation: sensitivity analysis and ranking existing methods. Journal of Water and Soil, 29(2): 350-373. (In Persian).
19. Meyer, A.F. 1942. Evaporation from lakes and reservoirs: Minnesota resources comm. St. Paul, minn.
20. Mojtahedi, F.F., S. Saravani, E. Jalilvand, S. Sima and M. Tajrishi. 2015. Estimate the evaporation rate of urmia lake surface in the maximum water level. The tenth international congress of civil engineering, Tabriz, Iran (In Persian).
21. Moradi. J., H. Shahnazari and M. Nemati Koutenai. 2010. The role of abbandan in groundwater recharge. The first national conference on costal land water resources management, Sari, Iran (In Persian).
22. Morton, F.L.1983. Operational estimates of aerial evapotranspiration and their significance to the science and practicle of hydrology. Journal of Hydrology, 66: 1-76.
23. Stauffer, R.E.1991. Testing lake energy budget models under varying atmospheric stability conditions. Journal of Hydrology, (128): 115-135.
24. Terzo, O. and M. Erol Keskn. 2005. Modeling of Daily Pan Evaporation. Journal of Applied Sciences, 5(2): 368-372.
25. Torres, E.A. and A. Calera. 2010. Bare soil evaporation under high evaporation demand: a proposed modification to the FAO-56 model. Hydrological Sciences Journal, 55(3): 303-315.
26. Vanzyl, W.H., J.M. De Jager and C.J. Maree. 1989. The relationship between daylight evaporation from short vegetation and the USWB Class A pan. Agriculture and Forest Meteorology, (46): 107-118.
27. Velayati, s. 1995. Geography of water and water resources management. khorasan publications, Ferdowsi of university of Mashhad, Mashhad, Iran.358 pp (In Persian).
28. Windham, J.R. and J.B. Stall. 1967. Lake evaporation in Illinois. Report of Investigation 57. State of Illinois. Department of Registration and Education.
29. Yazdani, V., B. Ghahraman and K. Davari. 2010. Determination of the best experimental method for estimating the evaporation for the free surface of Amol paddy based on sensitivity analysis and comparison of it with the result of artificial neural network. Iran Water Research Journal, (7): 47-58 (In Persian).
30. Zare Abyaneh, H., A. Moghaddamnia, M. Bayat Varkeshi, A. Ghasemi and M. Shadmani. 2010. Spatial variability of pan evaporation in Iran and its estimation using several empirical models. Journal of Science of Soil and Water, 1(4): 113-129 (In Persian).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.7.1]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.241]

Determination of Evaporation from Free Surface Water in Mazandaran Plain (Dazmirkandeh Abbandan) and Compared with Seven Experimental Methods

Shaghayegh Imam Dost[1], Ali Shahanzari[2] and Janali Taghavi[3]

1 and 2- M.Sc. Student in water resources and Instructors of Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
2- Associate Professor of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
(Corresponding Author: aliponh@yahoo.com)
Received: December 10, 2016 Accepted: February 12, 2017

Abstract

Evaporation is one of the important and effective processes in water cycle that causes loss of large volumes of lake and Abbandan's water wich its measurement has great importance in water resources planning. In this research, the amount of evaporation in six months (from April to September in 2016) from the free surface of Dazmirkande Abbandan located at Mazandaran Province has been measured by floating evaporation pan and amount of evaporation has been calculated by Meyer, USBR, Shahthin, Hefner, Penman, Marciano and Ivanov formulas with Dashte-e-Naz station data compared. It was found that by using statistical criteria Ivanov methods, USBR and shahthin provides high precision for determining evaporation from the free surface in this region. Root mean square errors values, deviation and t-test results in the best models are 1/36, 0/18 and 0/95, respectively. Due to the accuracy of Ivanov formula for humid areas, the amounts of daily evaporation have been calculated based on Ivanov formula. For determination of pan coefficient, According to Ivanov formula for this region, amounts of daily evaporation measured with 0/6, 0/7, 0/75, 0/8, 0/85 and 0/9 coefficient. Due to the statistical results, the coefficient of 0/75 with minimum amount of RMSE and MBE and t, has been chosen as the best coefficient for floating evaporation pan. The results indicate a 18 percent of the total volum of Abbandan reservoir evaporation in the study period. Minimizing of evaporation it could be used a wind break, floating objects or proper planning of water resources change to minimize the amount.

Keywords: Abbandan, Dasht-e-Naz, Free surface evaporation, Floating evaporation Pan, Ivanov method

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.7.1]

[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.241]