

بررسی پتانسیل استفاده از گوی‌های شناور در کاهش تبخیر و افزایش ذخایر آبی سدهای خراسان رضوی

غلامرضا ممدوحی^۱، رضا استیلایی^۲، آوا احمدزاده^۳، احمد فرزادفرد^۴، حمیدرضا رفتار علی‌آبادی^۵

۱- معاون حفاظت و بهره‌برداری شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی، mamdoohi_1974@yahoo.com

۲- مدیر بهره‌برداری و نگهداری از تاسیسات آبی شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی، rezaestilaei@gmail.com

۳- کارشناس بهره‌برداری و نگهداری از تاسیسات آبی شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی، ava.ahmadzade1993@gmail.com

۴- رییس گروه بهره‌برداری و نگهداری از تاسیسات آبی شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی، ahmadfarzad50@gmail.com

۵- کارشناس بهره‌برداری و نگهداری از تاسیسات آبی شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی، h.rft63@gmail.com

خلاصه

تبخیر زیاد از سطح مخازن در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یکی از چالش‌های جدی در مدیریت منابع آب محسوب می‌شود. در این پژوهش، با بهره‌گیری از نتایج تجربی مقالاتی مرجع در زمینه‌ی نرخ مهار تبخیر توسط گوی‌های شناور پلی‌اتیلن با چگالی بالا در چهار سطح پوشش مختلف (۱۸/۷۴، ۳۷/۴۹، ۵۶/۲۳ و ۷۴/۹۸) به بررسی و تحلیل سناریوی استفاده از این روش برای کاهش تلفات تبخیر در چهار سد استان خراسان رضوی شامل سدهای دوستی، بار، قره‌تیکان و چهچهه پرداخته شد. نتایج نشان داد که رابطه‌ی بین درصد پوشش و نرخ مهار تبخیر به‌صورت غیرخطی بوده و نرخ مهار همواره کمتر از درصد پوشش است؛ به‌طوری که پوشش ۵۶/۲۳ درصد به‌طور میانگین ۴۷ درصد و پوشش ۷۴/۹۸ درصد به‌طور میانگین ۵۸ درصد از تبخیر را مهار می‌کنند. حجم مطلق آب ذخیره‌شده تابع مستقیمی از ابعاد مخزن و میزان تبخیر سالانه است؛ به‌گونه‌ای که سد دوستی با پوشش ۷۴/۹۸ درصد به‌طور میانگین سالانه ۲۶/۳ میلیون مترمکعب آب ذخیره می‌کند، در حالی که این مقدار برای سدهای بار، قره‌تیکان و چهچهه به‌ترتیب ۰/۶۹۴، ۰/۵۳۳ و ۰/۵۵۶ میلیون مترمکعب است. اجرای این روش در سال‌های خشک و گرم با تبخیر بالا، بیشترین بازدهی را دارد. از نظر اقتصادی، پوشش ۵۶/۲۳ درصد به‌عنوان گزینه‌ی بهینه از نظر نسبت ذخیره‌سازی به هزینه برای تمام سدها پیشنهاد می‌شود. در نهایت، استفاده از گوی‌های سفید رنگ با ضریب جذب حرارت کمتر و بررسی تأثیر اندازه‌ی ظروف تبخیر بر نتایج، به‌عنوان پیشنهادات اصلی برای پژوهش‌های آینده ارائه شده است.

کلمات کلیدی: مهار تبخیر، گوی‌های شناور، خراسان رضوی، سد دوستی، مدیریت منابع آب، پوشش سطحی.

۱. مقدمه

مناطق خشک و نیمه‌خشک بخش قابل توجهی از مساحت کره زمین را به خود اختصاص داده‌اند. این مناطق با بارندگی سالانه اندک و پتانسیل تبخیر بسیار بالا مشخص می‌شوند که این امر منجر به کمبود شدید منابع آب شده و توسعه‌ی اقتصادی و اجتماعی این نواحی را با چالش جدی مواجه ساخته است [1, 2]. در چنین شرایطی، مخازن سدها به عنوان مهم‌ترین سازه‌های تأمین و تنظیم آب، نقش کلیدی در تأمین نیازهای شرب، کشاورزی و صنعت ایفا می‌کنند. با این حال، حجم عظیمی از آب ذخیره‌شده در این مخازن، به‌ویژه در فصول گرم سال، از طریق تبخیر از سطح آزاد آب تلف می‌شود. بر اساس برآوردهای جهانی، نزدیک به ۱۶/۷ میلیون مخزن در سراسر جهان وجود دارد که مقدار قابل توجهی از آب آن‌ها به دلیل تبخیر از دست می‌رود [۳]. در برخی مناطق خشک، این تلفات می‌تواند تا نیمی از ظرفیت مفید مخزن را شامل شود [۴، ۵]. این مسئله در استان‌های خشک و نیمه‌خشک ایران نظیر خراسان رضوی که با بحران جدی کم‌آبی مواجه هستند، از اهمیت دوچندانی برخوردار است. تبخیر زیاد از سطح مخازن این استان، نه تنها راندمان ذخیره‌سازی آب را کاهش می‌دهد، بلکه برنامه‌ریزی برای تأمین پایدار آب در بخش‌های مختلف را با مشکل روبه‌رو می‌سازد. بنابراین، ارائه‌ی راهکارهایی مؤثر برای کاهش تلفات تبخیر از مخازن، گامی ضروری در جهت افزایش بهره‌وری و پایداری منابع آب در این مناطق به‌شمار می‌رود. برای مقابله با تلفات تبخیر از سطح آب، روش‌های متنوعی توسط پژوهشگران ارائه و بررسی شده است که به طور کلی در سه دسته شیمیایی، زیستی و فیزیکی طبقه‌بندی می‌شوند [۶، ۷]. در روش‌های شیمیایی، با تشکیل یک لایه‌ی مولکولی بر روی سطح آب، از انتشار مولکول‌های بخار آب به جو جلوگیری می‌شود. به‌عنوان مثال، استفاده از مخلوط الکل‌های سفید و استئاریل تبخیر را تا ۱۹/۲۶ درصد کاهش داده است [۸]، و لایه‌های تک‌مولکولی نیز می‌توانند تا ۴۰ درصد تبخیر را مهار کنند [۹]. با این وجود، نرخ مهار تبخیر و دوام این پوشش‌ها محدود بوده و امکان کاربرد گسترده آن‌ها در مخازن بزرگ با چالش مواجه است [۷]. روش‌های زیستی شامل اقداماتی نظیر کشت درختان بادشکن در حاشیه مخازن برای کاهش تلاطم جو یا استفاده از گیاهان شناور برای کاهش تماس مستقیم آب و هواست. مطالعات نشان داده است که بادشکن‌ها تبخیر را بین ۱۵ تا ۳۰ درصد [۱۰]، گیاهان آبزی بین ۱۰ تا ۳۰ درصد [۱۱]، و برگ‌های نخل تا ۵۵ تا ۵۸ درصد [۱۲] کاهش می‌دهند. هرچند این روش‌ها کم‌هزینه هستند، اما کارایی و دوام آن‌ها در بلندمدت و در شرایط محیطی متنوع، چالش‌برانگیز است [۷]. روش‌های فیزیکی به دلیل کارایی بالاتر و دوام بیشتر، مؤثرترین راهکار محسوب می‌شوند. پوشش‌های فیزیکی به دو دسته‌ی پوشش‌های معلق (سقف‌های شناور) و پوشش‌های شناور تقسیم می‌شوند. پوشش‌های معلق که با استفاده از سازه‌های چوبی یا فلزی بر روی سطح آب نصب می‌شوند، می‌توانند تا ۸۵ تا ۹۰ درصد تبخیر را مهار کنند [۱۳-۱۵]. با این حال، هزینه‌ی بالا و نیاز به سازه‌های مقاوم در برابر باد و موج، از محدودیت‌های اصلی این روش است [۱۵، ۱۶]. پوشش‌های شناور، به دلیل قابلیت نصب آسان و هزینه‌ی کمتر، گزینه عملی‌تری محسوب می‌شوند [۶، ۱۷]. این پوشش‌ها به دو نوع پیوسته (مانند صفحات پلی‌استایرن) و مدولار (عناصر مستقل شناور مانند گوی‌ها) تقسیم می‌شوند. پوشش‌های پیوسته می‌توانند تا ۹۵ درصد تبخیر را مهار کنند، اما مانع از نفوذ نور و تبادل گاز شده و کیفیت آب را تحت تأثیر منفی قرار می‌دهند [۱۸، ۱۹]. در مقابل، پوشش‌های مدولار مانند گوی‌های شناور پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) به دلیل وجود فضاهای خالی بین گوی‌ها، امکان نفوذ نور و تبادل گاز را فراهم می‌کنند و تأثیر کمتری بر اکوسیستم آبی دارند [۲۰]. پژوهش‌ها نشان داده است که این گوی‌ها می‌توانند تبخیر را بین ۶۹ تا ۷۵ درصد کاهش دهند [۶، ۱۹]. علاوه بر این، ساختار منحنی و وزن مناسب آن‌ها باعث می‌شود در شرایط باد و تلاطم، از سطح آب پراکنده نشوند و پوشش مؤثری حفظ شود [۶]. با توجه به عمر طولانی و نگهداری ساده، این گوی‌ها به‌عنوان یکی از گزینه‌های مقرون‌به‌صرفه برای مهار تبخیر در مخازن شناخته می‌شوند [۲۱، ۲۲].

با وجود مزایای ذکر شده، بیشتر پژوهش‌های انجام شده بر روی پوشش کامل سطح آب با گوی‌های شناور متمرکز بوده و تأثیر پوشش جزئی بر روی نرخ تبخیر، بیلان انرژی و کیفیت آب کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات اندک موجود نشان می‌دهد که رابطه‌ی بین درصد پوشش و نرخ مهار تبخیر غیرخطی است و عواملی مانند اثرات هم‌بستن انرژی سطحی، انتشار بخار از فضاها و خالی و برهم‌کنش با باد، کارایی واقعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۵، ۲۳]. از سوی دیگر، پوشش کامل سطح آب علاوه بر هزینه اولیه زیاد، می‌تواند با تغییر در رژیم دمایی، نفوذ نور و تبادل گازها، کیفیت آب و حیات آبزیان را تحت تأثیر قرار دهد [۱۹، ۲۴]. بنابراین، انتخاب درصد پوشش بهینه نیازمند بررسی هم‌زمان ابعاد هیدرولوژیکی، زیست‌محیطی و اقتصادی است.

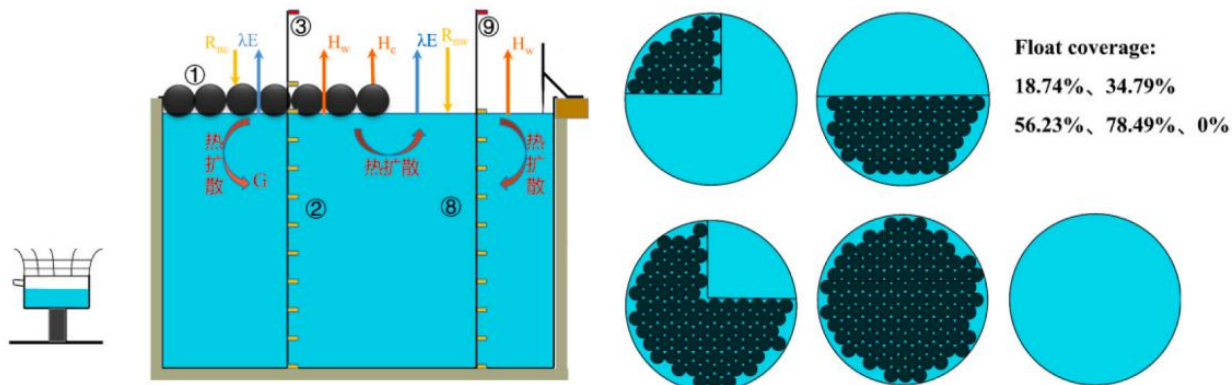
در ایران، به‌ویژه در استان خراسان رضوی که مخازن سدها نقش اساسی در تأمین آب شرب و کشاورزی دارند، تلفات تبخیر یکی از چالش‌های جدی محسوب می‌شود. با این حال، تاکنون مطالعه‌ی جامعی در مورد تأثیر استفاده از گوی‌های شناور بر روی کاهش تبخیر در مخازن این منطقه انجام نشده است. از این رو، بررسی این فناوری در شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی خراسان رضوی، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت بهینه‌ی منابع آب این استان فراهم آورد. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر استفاده از گوی‌های شناور با درصدهای مختلف پوشش بر روی نرخ مهار تبخیر آب در چهار مخزن سد واقع در استان خراسان رضوی طراحی شده است.

۲. روش شناسی تحقیق

به منظور بررسی تأثیر درصدهای مختلف پوشش سطح آب توسط گوی‌های شناور بر میزان تبخیر، آزمایشی میدانی در منطقه‌ای با اقلیم فراخشک (با میانگین دمای سالانه ۱۵/۷ درجه سانتی‌گراد و تبخیر پتانسیل سالانه حدود ۱۵۰۹ میلی‌متر) طراحی و اجرا گردید [۲۵]. در این آزمایش، پنج حوضچه استوانه‌ای از جنس پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) به قطر ۱/۲ متر و ارتفاع ۰/۸ متر، در بالای سد مخزنی نصب شدند. بر روی سطوح این حوضچه‌ها، تعداد متفاوتی از گوی‌های شناور سیاه رنگ HDPE با قطر ۱۰ سانتی‌متر، ضخامت ۲ میلی‌متر و وزن ۵۰ گرم قرار داده شد تا به ترتیب پوشش‌هایی معادل صفر (حوضچه شاهد بدون پوشش)، ۱۸/۷۴٪، ۳۷/۴۹٪، ۵۶/۲۳٪ و ۷۴/۹۸٪ درصد از سطح آب را بپوشانند. برای کنترل دقیق سطح پوشش، از صفحات جداساز متحرک پی‌وی‌سی استفاده گردید. به منظور اندازه‌گیری دقیق تبخیر روزانه، از یک پروب اندازه‌گیری سطح آب با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر در هر یک از حوضچه‌ها استفاده شد و آب تبخیر شده، هر هفت روز یک بار تا تراز اولیه تکمیل می‌گردید. همچنین، یک حوضچه تبخیر استاندارد با قطر ۲۰ سانتی‌متر در مجاورت حوضچه‌ها نصب گردید تا به روش وزنی، تبخیر از سطح آزاد آب اندازه‌گیری شده و امکان تصحیح اثر ابعاد حوضچه‌ها فراهم شود. داده‌های بارندگی نیز با استفاده از باران‌سنجی با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر ثبت گردید. در نهایت، نرخ مهار تبخیر برای هر یک از درصدهای پوشش از طریق مقایسه تبخیر حوضچه‌های پوشش داده شده با حوضچه شاهد و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد [۱۹، ۲۳].

$$\varepsilon = 1 - \frac{E_c}{E} \quad (1)$$

که در این رابطه E مقدار تبخیر کل، E_c مقدار تبخیر سطح پوشیده شده است. برای نمایش شماتیک چیدمان آزمایشگاهی، و نحوه توزیع گوی‌های شناور بر روی سطوح حوضچه‌ها، شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱ آزمایش جلوگیری از تبخیر با استفاده از گوی های شناور [۲۵].

۳. سد های مورد مطالعه

سد دوستی در شمال شرق ایران-مرز ایران و ترکمنستان واقع شده است. نوع سد خاکی سنگریزه‌ای با هسته سیلتی بوده و هدف از احداث آن تأمین بخشی از آب شهر مشهد و سرخس و کشاورزی می‌باشد. سال بهره برداری ۱۳۸۴ و نام رودخانه هریود است. طول تاج ۶۵۵ متر، عرض تاج ۱۵ متر و ارتفاع از پی ۷۹ متر می‌باشد. حجم مفید مخزن ۹۵۰ میلیون متر مکعب است.

سد اصلی بار در ۲۳ کیلومتری شمال غرب شهرستان نیشابور و شمال شرق شهرستان فیروزه در مجاورت روستای حسین آباد واقع شده است. نوع سد خاکی با هسته رسی و همراه پرده آب بند بوده و هدف از احداث آن تأمین آب شرب-صنعت-کشاورزی-مهارسیلاب می باشد. سال بهره برداری در حال اجرا و نام رودخانه بار است. طول تاج ۱۵۰۰ متر، عرض تاج ۱۰ متر و ارتفاع از پی ۵/۳۵ متر می باشد. حجم مفید مخزن ۶/۱۸ میلیون متر مکعب است.

سد سرود کلات (قره‌تیکان) در ۱۰۰ کیلومتری شمال شرقی مشهد-در مجاورت روستای قره تیکان حوزه کلات واقع شده است. نوع سد خاکی سنگریزه‌ای با هسته رسی بوده و هدف از احداث آن کشاورزی-مهارسیلاب-اشتغال-جلوگیری از مهاجرت می باشد. سال بهره برداری در حال اجرا و نام رودخانه سرود است. طول تاج ۳۳۰ متر، عرض تاج ۱۰ متر و ارتفاع از پی ۵۷ متر می‌باشد. حجم مفید مخزن ۵/۱۷ میلیون متر مکعب است.

سد چهچهه در ۱۱۰ کیلومتری شمال شرقی مشهد-در پایین دست روستای اسماعیل بیک حوزه کلات واقع شده است. نوع سد خاکی سنگریزه‌ای با هسته رسی بوده و هدف از احداث آن کشاورزی-مهارسیلاب-اشتغال-جلوگیری از مهاجرت می باشد. سال بهره‌برداری در حال اجرا و نام رودخانه چهچهه است. طول تاج ۲۵۰ متر، عرض تاج ۱۰ متر و ارتفاع از پی ۶۱ متر می‌باشد. حجم مفید مخزن ۹/۱۹ میلیون متر مکعب است.

۴. بررسی نتایج

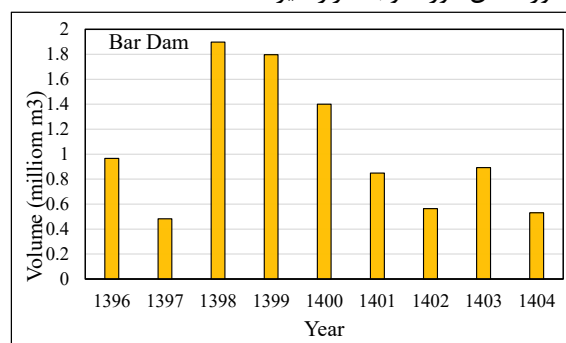
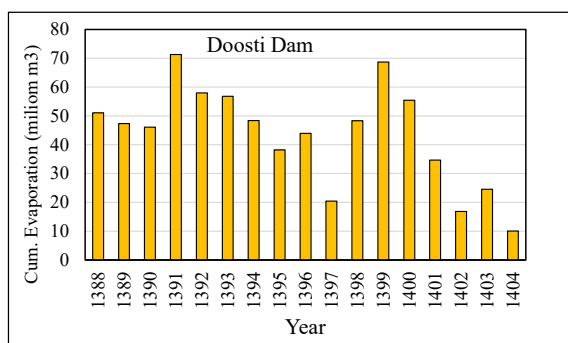
۱.۴. تبخیر سالانه

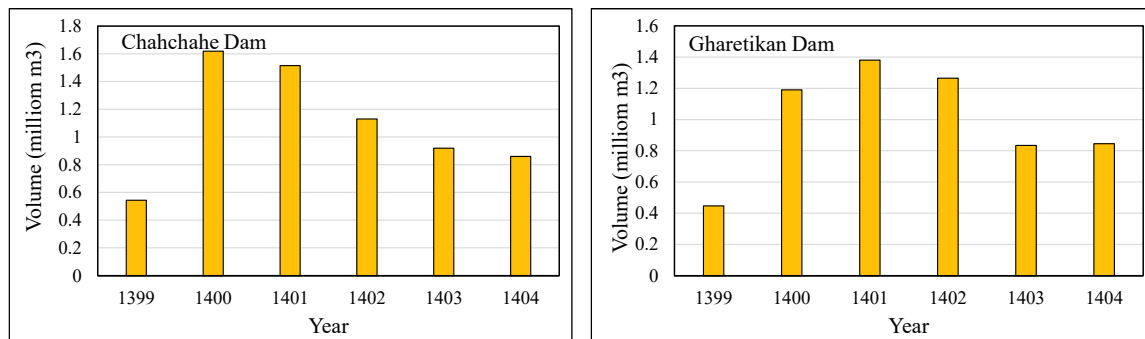
جدول (۱) آمار توصیفی تبخیر سالانه شامل میانگین، حداقل و حداکثر (بر حسب میلیون مترمکعب) را برای چهار سد مورد مطالعه شامل سد دوستی، سد بار، سد چهچهه و سد قره تیکان را ارائه می دهد.

جدول ۱ مقادیر تبخیر در سدهای مورد بررسی

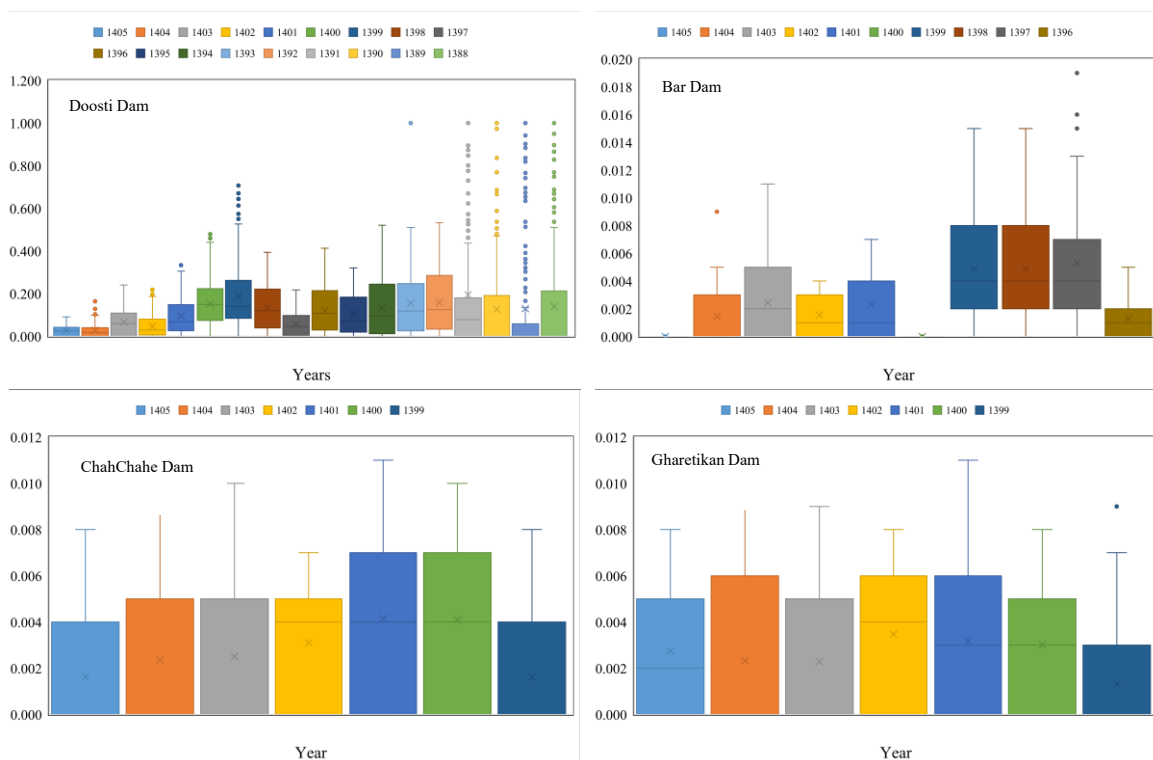
سد	مقدار تبخیر (million m ³)			
	حداقل	حداکثر	میانگین	تجمعی کل دوره
سد دوستی	۱۰/۰۷	۷۱/۲۷	۴۳/۵۳	۷۴۰/۰
سد بار	۰/۴۸	۱/۹۰	۱/۰۴۲	۹/۴
سد چهچهه	۰/۵۴	۱/۶۲	۱/۰۹۸	۶/۶
سد قره تیکان	۰/۴۵	۱/۳۸۱	۰/۹۹۴	۵/۹

بررسی مقادیر تبخیر ثبت شده در سدهای مورد مطالعه نشان می‌دهد که هر سد دارای الگوی مشخصی از نوسانات سالانه است که در چارچوب دوره آماری خود قابل تحلیل می‌باشد (شکل های ۲ و ۳). در شکل ۳، داده های سال ۱۴۰۵ فقط برای مقایسه آمده است و مبنای محاسبات قرار نگرفته است زیرا دیتای آن کامل نیست. برای سد دوستی با دوره آماری ۱۷ ساله، میانگین تبخیر ۴۳/۵۳ میلیون مترمکعب برآورد شده در حالی که این مقدار بین حداقل ۱۰/۰۷ و حداکثر ۷۱/۲۷ میلیون مترمکعب در نوسان بوده که دامنه ای به گستردگی حدود ۶۱ میلیون مترمکعب را نشان می‌دهد و حکایت از تغییرات قابل توجه بین سال های مختلف دارد. در سد بار با دوره ۹ ساله، میانگین تبخیر ۱/۰۴۲ میلیون مترمکعب ثبت شده و مقادیر حداقل و حداکثر به ترتیب به ۰/۴۸ و ۱/۹۰ میلیون مترمکعب می‌رسد که دامنه نوسان حدود ۱/۴ میلیون مترمکعب را شامل می‌شود. برای سد چهچهه با دوره آماری ۶ ساله، میانگین ۱/۰۹۸ میلیون مترمکعب بوده و کمترین و بیشترین مقدار به ترتیب ۰/۵۴ و ۱/۶۲ میلیون مترمکعب گزارش شده که نوسانی در حدود ۱/۱ میلیون مترمکعب را تجربه کرده است. همچنین سد قره تیکان نیز با همان دوره ۶ ساله، میانگین ۰/۹۹۴ میلیون مترمکعب و دامنه ای بین ۰/۴۵ تا ۱/۳۸۱ میلیون مترمکعب داشته که اختلافی حدود ۰/۹ میلیون مترمکعب بین سال های کم تبخیر و پر تبخیر را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه حجم مخزن سد دوستی به مراتب بیشتر از سایر سدها بوده، طبیعتاً مقادیر مطلق تبخیر در این سد در سطح بالاتری قرار دارد و این امر صرفاً بازتابی از مقیاس بزرگتر این مخزن است. نکته حائز اهمیت آنکه در تمامی سدها، نسبت حداکثر به میانگین بین ۱/۵ تا ۱/۸ متغیر است که نشان از تکرارپذیری الگوی فصلی تبخیر در همه موارد دارد، هرچند دامنه نوسان مطلق تابعی از ابعاد مخزن و شرایط محلی هر منطقه می‌باشد. در مجموع، داده های موجود برای هر سد به صورت جداگانه نمایانگر وجود روند نوسانی معنادار در تبخیر سالانه است که می‌بایست در مدیریت بهره برداری از هر مخزن به طور خاص مورد توجه قرار گیرد.





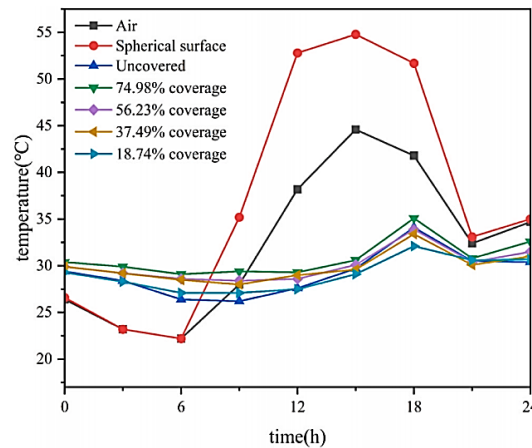
شکل ۲ مقدار تبخیر تجمعی سالانه برای سد های مختلف مورد بررسی.



شکل ۳ گراف های جعبه‌ای برای سد های مختلف در سال های مختلف مورد بررسی.

۲.۴. تاثیر گوی های شناور بر دمای آب

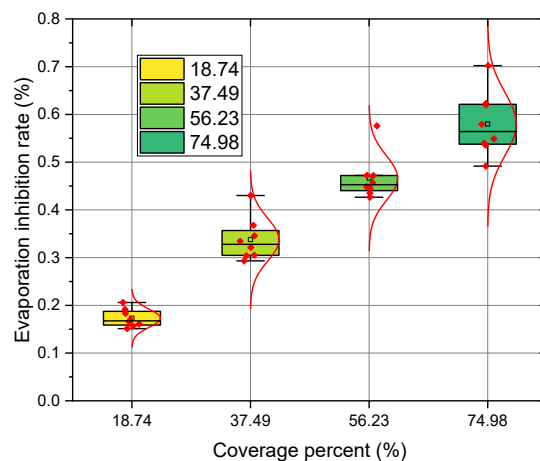
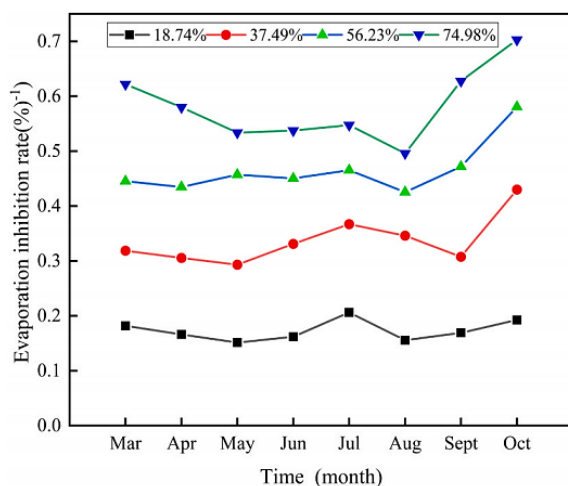
در مقیاس روزانه، دمای هوا (T_a)، دمای سطح گوی‌های شناور (T_c) و دمای سطح آب (T_w) روند کلی مشابهی دارند، اما به دلیل ظرفیت گرمایی متفاوت، تغییرات آن‌ها با تأخیر زمانی همراه است. از نیمه‌شب تا ۸ صبح، $T_w > T_a > T_c$ بوده و سطح تبخیر کننده گرما را به بیرون انتشار می‌دهد. از ۸ صبح تا ۲۰، $T_c > T_a > T_w$ بوده و سطح تبخیر کننده گرما جذب می‌نماید. به دلیل ظرفیت گرمایی بالای آب (بیشتر از هوا و گوی‌ها)، دمای سطح آب با تأخیر نسبت به هوا و گوی‌ها تغییر می‌کند و بیشترین دمای سطح آب در حوالی ساعت ۱۸ بعد از ظهر رخ می‌دهد. این روند در شکل ۴ به خوبی نمایش داده شده است که روند تغییرات دمای هوا، دمای سطح گوی‌ها و دمای سطح آب را در طول شبانه‌روز برای گروه‌های مختلف پوشش نشان می‌دهد [۲۵].



شکل ۴ توزیع دمای هوا، دمای گوی شناور، سطح بدون پوشش و سطح دارای پوشش [۲۵].

۳.۴. روند کلی تبخیر و نرخ مهار آن

میزان تبخیر ماهانه در شکل ۵ نشان داده شده است و مشاهده می‌شود که با افزایش درصد پوشش گوی‌های شناور، میزان تبخیر به‌طور مداوم کاهش می‌یابد. در کل دوره‌ی آزمایش، بیشترین میزان تبخیر در گرم‌ترین ماه و کمترین میزان آن در ماه‌های خنک ثبت شده است [۲۵]. مقدار حداقل، حداکثر و میانگین نرخ مهار تبخیر در طول کل دوره آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. این به منظور این است که مشخص شود محدوده نرخ مهار تبخیر برای ماه‌های مختلف چه میزان است تا یک محدوده آماری برای سد‌های مورد مطالعه بدست آید و صرفاً یک عدد تک بعدی به کل دوره تبخیر سدها اختصاص داده نشود.



شکل ۵ نرخ مهار تبخیر در ماه‌های مختلف سال و منحنی جعبه‌ای آنها.

بر اساس جدول ۲ و شکل ۵ دیده می‌شود که نرخ مهار تبخیر با افزایش درصد پوشش سطح آب توسط گوی‌های شناور، روند صعودی قابل‌توجهی را نشان می‌دهد، اما این افزایش به‌صورت خطی نبوده و همواره کمتر از درصد پوشش است. به‌عنوان مثال، پوشش ۱۸/۷۴ درصد به‌طور میانگین ۱۷ درصد از تبخیر را مهار می‌کند، در حالی که پوشش ۷۴/۹۸ درصد با وجود افزایش چشمگیر سطح پوشش، میانگین مهار تبخیر آن به ۵۸ درصد می‌رسد که نشان‌دهنده رابطه‌ی غیرخطی بین پوشش

و مهار تبخیر است. این پدیده به دلیل اثرات هم‌بستگی انرژی سطحی، انتشار بخار از فضاهای خالی بین گوی‌ها و برهم‌کنش با باد رخ می‌دهد که باعث می‌شود افزایش پوشش، به‌طور کامل به افزایش متناظر در مهار تبخیر منجر نشود [۱۹، ۲۳].

جدول ۲ خصوصیات آماری نرخ مهار تبخیر برای درصد پوشش‌های مختلف.

نرخ مهار تبخیر (%)			درصد پوشش سطح (%)
میانگین	حداکثر	حداقل	
۱۷	۲۱	۱۵	۱۸/۷۴
۳۴	۴۳	۲۹	۳۷/۴۹
۴۷	۵۸	۴۳	۵۶/۲۳
۵۸	۷۰	۴۹	۷۴/۹۸

دامنه‌ی تغییرات نرخ مهار تبخیر (اختلاف حداقل و حداکثر) نشان می‌دهد که با افزایش درصد پوشش، این دامنه نیز گسترده‌تر می‌شود، به‌گونه‌ای که برای پوشش ۱۸/۷۴ درصد دامنه تغییرات حدود ۶ درصد است، در حالی که برای پوشش ۷۴/۹۸ درصد این دامنه به ۲۱ درصد می‌رسد. این موضوع حاکی از آن است که پوشش‌های بالاتر، نوسانات بیشتری در عملکرد خود داشته و تأثیرپذیری بیشتری از شرایط محیطی متغیر (مانند دما، شدت تابش و سرعت باد) دارند [۲۵]. به عبارت دیگر، در شرایط مساعد (دمای پایین‌تر و تابش کمتر)، پوشش‌های بالا می‌توانند به حداکثر کارایی خود (۷۰ درصد) نزدیک شوند، اما در شرایط نامساعد (دمای بالا و تابش شدید)، عملکرد آن‌ها به‌شدت کاهش یافته و به حداقل (۴۹ درصد) می‌رسد [۲۵، ۲۶].

بررسی نسبت مهار تبخیر به درصد پوشش نشان می‌دهد که کارایی نسبی پوشش‌های پایین و متوسط (۱۸/۷۴ و ۳۷/۴۹ درصد) حدود ۹۱ درصد است، به این معنا که هر واحد افزایش پوشش، تقریباً ۰/۹۱ واحد مهار تبخیر را به همراه دارد. در مقابل، برای پوشش‌های بالاتر (۵۶/۲۳ و ۷۴/۹۸ درصد)، این نسبت به ترتیب به ۸۴ و ۷۷ درصد کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش بازدهی پوشش در سطوح بالاست. به عبارت دیگر، افزایش پوشش از ۵۶ به ۷۵ درصد، اگرچه ۱۹ درصد پوشش اضافی ایجاد می‌کند، اما تنها ۱۱ درصد مهار تبخیر بیشتری (از ۴۷ به ۵۸ درصد) به همراه دارد که این امر از نظر اقتصادی ممکن است توجیه‌پذیر نباشد و نشان می‌دهد که پوشش‌های متوسط، از نظر نسبت مهار به پوشش، اقتصادی‌ترین گزینه محسوب می‌شوند.

۴.۴. مهار تبخیر در سدهای مورد بررسی

۴.۴.۱. سد دوستی

بر اساس داده‌های ارائه شده برای سد دوستی (شکل ۶)، حجم آب جلوگیری‌شده از تبخیر با استفاده از گوی‌های شناور در چهار سطح پوشش (۱۸/۷۴٪، ۳۷/۴۹٪، ۵۶/۲۳٪ و ۷۴/۹۸٪) محاسبه شده است. این محاسبات با اعمال میانگین نرخ مهار تبخیر مربوط به هر درصد پوشش، به ترتیب ۱۷٪، ۳۴٪، ۴۷٪ و ۵۸٪ بر روی حجم تبخیر سالانه‌ی هر سال انجام شده است. نتایج نشان‌دهنده پتانسیل قابل‌توجه این روش در ذخیره‌سازی آب در مخزن سد دوستی است، هرچند که میزان این صرفه‌جویی به‌شدت تحت تأثیر نوسانات سالانه‌ی تبخیر قرار دارد.

روند کلی افزایش حجم آب ذخیره‌شده با افزایش پوشش

در تمامی سال‌های مورد بررسی، حجم آب جلوگیری‌شده از تبخیر با افزایش درصد پوشش، به‌طور مستقیم افزایش یافته است. به‌عنوان مثال، در سال ۱۴۰۰ با حجم تبخیر ۵۵ میلیون مترمکعب، پوشش ۱۸/۷۴٪ منجر به ذخیره‌سازی ۹/۴۳ میلیون مترمکعب، پوشش ۳۷/۴۹٪ منجر به ۱۸/۸۶ میلیون مترمکعب، پوشش ۵۶/۲۳٪ منجر به ۲۶/۰۶ میلیون مترمکعب و پوشش ۷۴/۹۸٪ منجر به ۳۲/۱۷ میلیون مترمکعب آب شده است. این افزایش خطی نیست و متناسب با نرخ مهار تبخیر هر پوشش بوده است که نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین پوشش و ذخیره‌سازی آب است.

تأثیر نوسانات سالانه‌ی تبخیر بر حجم آب ذخیره شده

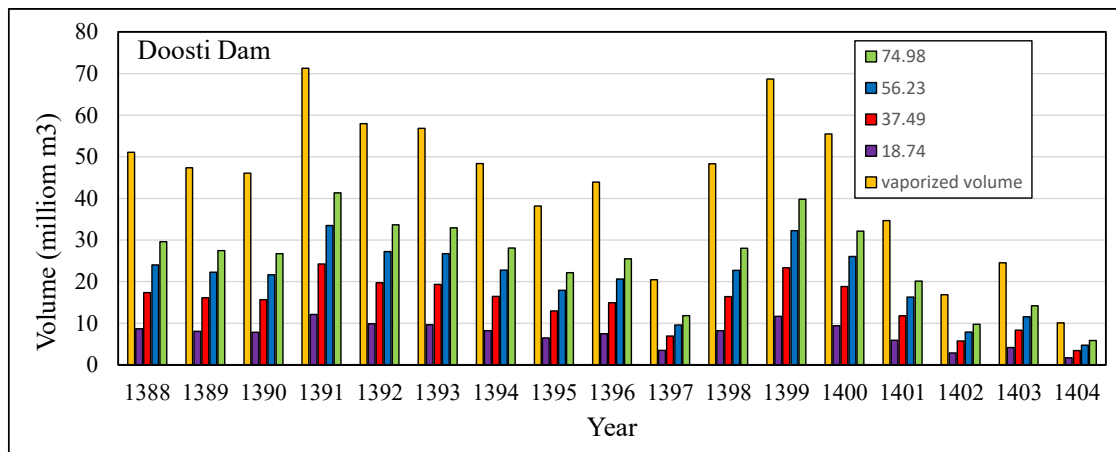
حجم آب جلوگیری‌شده از تبخیر در سال‌های مختلف، بازتاب‌دهنده‌ی نوسانات اقلیمی و تغییرات حجم تبخیر سالانه در سد دوستی است. بیشترین حجم تبخیر در سال ۱۳۹۱ با ۷۱ میلیون مترمکعب ثبت شده است که در این سال، پوشش ۷۴/۹۸٪ توانسته ۴۱ میلیون مترمکعب آب ذخیره کند. در مقابل، کمترین حجم تبخیر در سال ۱۴۰۴ با ۱۰ میلیون مترمکعب ثبت شده که پوشش ۷۴/۹۸٪ تنها ۱/۲۹ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است. این اختلاف چشمگیر (نسبت بیش از ۳۲ برابری) نشان می‌دهد که کارایی این روش به‌شدت به حجم تبخیر سالانه وابسته است و در سال‌های خشک‌تر و گرم‌تر که تبخیر بیشتری رخ می‌دهد، پتانسیل ذخیره‌سازی آب نیز به‌طور متناسبی افزایش می‌یابد.

مقایسه‌ی عملکرد پوشش‌های مختلف در طول دوره آماری

بررسی میانگین ۱۷ ساله (۱۳۸۸ تا ۱۴۰۴) نشان می‌دهد که پوشش ۱۸/۷۴٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۷/۷ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۱۷٪ تبخیر سالانه است. پوشش ۳۷/۴۹٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۱۵/۴ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۳۴٪ تبخیر سالانه است. پوشش ۵۶/۲۳٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۲۱/۳ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۴۷٪ تبخیر سالانه است. پوشش ۷۴/۹۸٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۲۶/۳ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۵۸٪ تبخیر سالانه است.

شناسایی سال‌های خشک و تأثیر آن بر حجم ذخیره‌سازی

سال‌های با تبخیر بالا (مانند ۱۳۹۱، ۱۳۹۳، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰) به‌وضوح پتانسیل بیشتری برای ذخیره‌سازی آب دارند. در این سال‌ها، پوشش ۷۴/۹۸٪ توانسته به‌طور متوسط بیش از ۳۵ میلیون مترمکعب آب ذخیره کند، در حالی‌که در سال‌های با تبخیر متوسط (مانند ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶) این مقدار به حدود ۲۵ میلیون مترمکعب کاهش یافته و در سال‌های با تبخیر کم (مانند ۱۴۰۴) به کمتر از ۲ میلیون مترمکعب رسیده است. این موضوع نشان می‌دهد که اجرای این روش در سال‌های خشک و گرم، بیشترین بازدهی را دارد و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مقابله با خشکسالی در مخازن مناطق خشک مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۶ مقدار تبخیر سالانه و همچنین مقدار تبخیر جلوگیری شده برای حالت‌های بدون پوشش و پوشش درصدهای مختلف برای سد دوستی.

۲.۴.۴. سد بار

بر اساس داده‌های ارائه‌شده برای سد بار (شکل ۷)، حجم آب جلوگیری‌شده از تبخیر با استفاده از گوی‌های شناور در چهار سطح پوشش محاسبه شده است. این محاسبات با اعمال میانگین نرخ مهار تبخیر مربوط به هر درصد پوشش بر روی حجم تبخیر سالانه هر سال انجام شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی پتانسیل این روش در ذخیره‌سازی آب در مخزن سد بار است، هرچند که به دلیل حجم بسیار کوچک‌تر تبخیر نسبت به سد دوستی، میزان آب ذخیره‌شده نیز به مراتب کمتر می‌باشد.

روند کلی افزایش حجم آب ذخیره‌شده با افزایش پوشش

در تمامی سال‌های مورد بررسی، حجم آب جلوگیری‌شده از تبخیر با افزایش درصد پوشش، به طور مستقیم افزایش یافته است. به عنوان مثال، در سال ۱۳۹۸ با حجم تبخیر ۱/۸۹ میلیون مترمکعب، پوشش ۱۷/۷۴٪ منجر به ذخیره‌سازی ۰/۳۲۳ میلیون مترمکعب، پوشش ۳۷/۴۹٪ منجر به ۰/۶۴۵ میلیون مترمکعب، پوشش ۵۶/۲۳٪ منجر به ۰/۸۹۲ میلیون مترمکعب و پوشش ۷۴/۹۸٪ منجر به ۱/۱ میلیون مترمکعب آب شده است. این افزایش خطی نیست و متناسب با نرخ مهار تبخیر هر پوشش بوده است که نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی مستقیم بین پوشش و ذخیره‌سازی آب است.

تأثیر نوسانات سالانه‌ی تبخیر بر حجم آب ذخیره‌شده

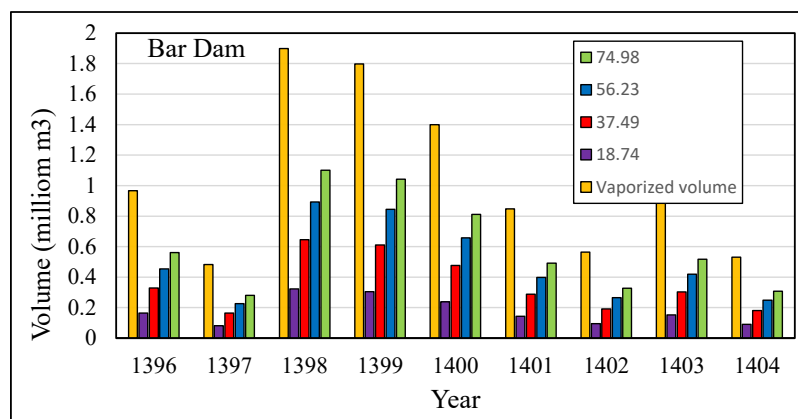
حجم آب جلوگیری‌شده از تبخیر در سال‌های مختلف، بازتاب‌دهنده نوسانات اقلیمی و تغییرات حجم تبخیر سالانه در سد بار است. بیشترین حجم تبخیر در سال ۱۳۹۸ با ۱/۸۹۸ میلیون مترمکعب ثبت شده است که در این سال، پوشش ۷۴/۹۸٪ توانسته ۱/۱ میلیون مترمکعب آب ذخیره کند. در مقابل، کمترین حجم تبخیر در سال ۱۳۹۷ با ۰/۴۸۳ میلیون مترمکعب ثبت شده که پوشش ۷۴/۹۸٪ تنها ۰/۲۸ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است. این اختلاف چشمگیر (نسبت بیش از ۴ برابری) نشان می‌دهد که کارایی این روش به شدت به حجم تبخیر سالانه وابسته است و در سال‌های خشک‌تر و گرم‌تر که تبخیر بیشتری رخ می‌دهد، پتانسیل ذخیره‌سازی آب نیز به طور متناسبی افزایش می‌یابد.

مقایسه‌ی عملکرد پوشش‌های مختلف در طول دوره‌ی آماری

بررسی میانگین ۹ ساله (۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴) نشان می‌دهد که پوشش ۱۸/۷۴٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۰/۲۰۳ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۱۷٪ تبخیر سالانه است. پوشش ۳۷/۴۹٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۰/۴۰۶ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۳۴٪ تبخیر سالانه است. پوشش ۵۶/۲۳٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۰/۵۶۲ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۴۷٪ تبخیر سالانه است. پوشش ۷۴/۹۸٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۰/۶۹۴ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۵۸٪ تبخیر سالانه است. افزایش پوشش از ۵۶/۲۳٪ به ۷۴/۹۸٪ (افزایش ۱۸/۷۵ درصدی پوشش) منجر به افزایش تنها ۰/۱۳۲ میلیون مترمکعب ذخیره‌سازی (افزایش ۲۳٪ در حجم ذخیره) شده است که نشان‌دهنده‌ی کاهش بازدهی اقتصادی در پوشش‌های بالاست. به‌عبارت دیگر، دو برابر کردن پوشش از ۳۷/۴۹٪ به ۷۴/۹۸٪، حجم ذخیره‌سازی را تنها ۷۰٪ افزایش می‌دهد، در حالی که هزینه‌ی پوشش دو برابر می‌شود.

شناسایی سال‌های خشک و تأثیر آن بر حجم ذخیره‌سازی

سال‌های با تبخیر بالا (مانند ۱۳۹۸، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰) به‌وضوح پتانسیل بیشتری برای ذخیره‌سازی آب دارند. در سال ۱۳۹۸، پوشش ۷۴/۹۸٪ توانسته ۱/۱ میلیون مترمکعب آب ذخیره کند، در حالی که در سال ۱۳۹۷ با تبخیر پایین، این مقدار به ۰/۲۸ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که اجرای این روش در سال‌های خشک و گرم، بیشترین بازدهی را دارد و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مقابله با خشکسالی در مخازن کوچک مناطق خشک مورد استفاده قرار گیرد. داده‌های سد بار نشان می‌دهد که استفاده از گوی‌های شناور با پوشش ۵۶/۲۳٪ می‌تواند به‌طور میانگین سالانه حدود ۰/۵۶ میلیون مترمکعب آب ذخیره کند که معادل ۴۷٪ تبخیر سالانه است. این میزان در سال‌های خشک به بیش از ۰/۸۹ میلیون مترمکعب نیز می‌رسد. با توجه به کاهش بازدهی اقتصادی در پوشش‌های بالاتر (۷۴/۹۸٪)، به‌نظر می‌رسد پوشش ۵۶/۲۳٪ گزینه‌ی متعادل‌تری از نظر نسبت ذخیره‌سازی به هزینه باشد، هرچند که در شرایط خشکسالی شدید، پوشش ۷۴/۹۸٪ می‌تواند حداکثر ذخیره‌سازی (تا ۱/۱۰ میلیون مترمکعب در سال‌های پربارش) را فراهم آورد.



شکل ۷ مقدار تبخیر سالانه و همچنین مقدار تبخیر جلوگیری شده برای حالت‌های بدون پوشش و پوشش درصدهای مختلف برای سد بار.

۳.۴.۴. سد قره تیگان

بر اساس داده‌های ارائه‌شده برای سد قره‌تیکان (شکل ۸)، حجم آب جلوگیری‌شده از تبخیر با استفاده از گوی‌های شناور در چهار سطح محاسبه شده است. این محاسبات با اعمال میانگین نرخ مهار تبخیر مربوط به هر درصد پوشش بر روی حجم تبخیر سالانه‌ی هر سال انجام شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی پتانسیل این روش در ذخیره‌سازی آب در مخزن سد قره‌تیکان است، هرچند که حجم آب ذخیره‌شده به‌دلیل کوچک بودن مخزن، محدود می‌باشد.

روند کلی افزایش حجم آب ذخیره‌شده با افزایش پوشش

در تمامی سال‌های مورد بررسی، حجم آب جلوگیری‌شده از تبخیر با افزایش درصد پوشش، به‌طور مستقیم افزایش یافته است. به‌عنوان مثال، در سال ۱۴۰۱ با حجم تبخیر ۱/۳۸۱ میلیون مترمکعب، پوشش ۱۸/۷۴٪ منجر به ذخیره‌سازی ۰/۲۳۵ میلیون مترمکعب، پوشش ۳۷/۴۹٪ منجر به ۰/۴۷ میلیون مترمکعب، پوشش ۵۶/۲۳٪ منجر به ۰/۶۴۹ میلیون مترمکعب و پوشش ۷۴/۹۸٪ منجر به ۰/۸۰۱ میلیون مترمکعب آب شده است. این افزایش متناسب با نرخ مهار تبخیر هر پوشش بوده است که نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی مستقیم بین پوشش و ذخیره‌سازی آب است.

تأثیر نوسانات سالانه‌ی تبخیر بر حجم آب ذخیره‌شده

حجم آب جلوگیری‌شده از تبخیر در سال‌های مختلف، بازتاب‌دهنده‌ی نوسانات اقلیمی و تغییرات حجم تبخیر سالانه در سد قره‌تیکان است. بیشترین حجم تبخیر در سال ۱۴۰۱ با ۱/۳۸۱ میلیون مترمکعب ثبت شده است که در این سال، پوشش ۷۴/۹۸٪ توانسته ۰/۸۰۱ میلیون مترمکعب آب ذخیره کند. در مقابل، کمترین حجم تبخیر در سال ۱۳۹۹ با ۰/۴۴۷ میلیون مترمکعب ثبت شده که پوشش ۷۴/۹۸٪ تنها ۰/۲۶ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است. این اختلاف چشمگیر (نسبت بیش از ۴ برابری) نشان می‌دهد که کارایی این روش به‌شدت به حجم تبخیر سالانه وابسته است و در سال‌های خشک‌تر و گرم‌تر که تبخیر بیشتری رخ می‌دهد، پتانسیل ذخیره‌سازی آب نیز به‌طور متناسبی افزایش می‌یابد.

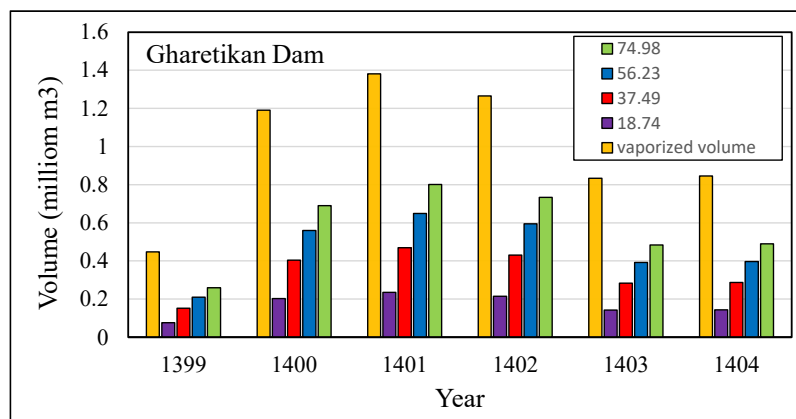
مقایسه‌ی عملکرد پوشش‌های مختلف در طول دوره‌ی آماری

بررسی میانگین ۶ ساله (۱۳۹۹ تا ۱۴۰۴) نشان می‌دهد که پوشش ۱۸/۷۴٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۰/۱۵۶ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۱۷٪ تبخیر سالانه است. پوشش ۳۷/۴۹٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۰/۳۱۲ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۳۴٪ تبخیر سالانه است. پوشش ۵۶/۲۳٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۰/۴۳۲ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۴۷٪ تبخیر سالانه است. پوشش ۷۴/۹۸٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۰/۵۳۳ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۵۸٪ تبخیر سالانه است. افزایش پوشش از ۵۶/۲۳٪ به ۷۴/۹۸٪ (افزایش ۱۸/۷۵ درصدی پوشش) منجر به افزایش تنها ۰/۱۰۱ میلیون مترمکعب ذخیره‌سازی (افزایش ۲۳٪ در حجم ذخیره) شده است که نشان‌دهنده‌ی کاهش بازدهی اقتصادی در پوشش‌های بالاست. به‌عبارت دیگر، دو برابر کردن پوشش از ۳۷/۴۹٪ به ۷۴/۹۸٪، حجم ذخیره‌سازی را تنها ۷۰٪ افزایش می‌دهد، در حالی که هزینه‌ی پوشش دو برابر می‌شود.

شناسایی سال‌های خشک و تأثیر آن بر حجم ذخیره‌سازی

سال‌های با تبخیر بالا (مانند ۱۴۰۰، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) به‌وضوح پتانسیل بیشتری برای ذخیره‌سازی آب دارند. در سال ۱۴۰۱، پوشش ۷۴/۹۸٪ توانسته ۰/۸۰۱ میلیون مترمکعب آب ذخیره کند. این موضوع نشان می‌دهد که اجرای این روش در سال‌های خشک و گرم، بیشترین بازدهی را دارد و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مقابله با خشکسالی در مخازن کوچک مناطق خشک مورد استفاده قرار گیرد. داده‌های سد قره‌تیکان نشان می‌دهد که استفاده از گوی‌های شناور با پوشش ۵۶/۲۳٪ می‌تواند

به‌طور میانگین سالانه حدود ۰/۴۳۲ میلیون مترمکعب آب ذخیره کند که معادل ۴۷٪ تبخیر سالانه است. این میزان در سال‌های خشک به بیش از ۰/۶۴۹ میلیون مترمکعب نیز می‌رسد. با توجه به کاهش بازدهی اقتصادی در پوشش‌های بالاتر (۷۴/۹۸٪)، به‌نظر می‌رسد پوشش ۵۶/۲۳٪ گزینه‌ی متعادل‌تری از نظر نسبت ذخیره‌سازی به هزینه باشد، هرچند که در شرایط خشکسالی شدید، پوشش ۷۴/۹۸٪ می‌تواند حداکثر ذخیره‌سازی (تا ۰/۸ میلیون مترمکعب در سال‌های پربارش) را فراهم آورد.



شکل ۸ مقدار تبخیر سالانه و همچنین مقدار تبخیر جلوگیری شده برای حالت‌های بدون پوشش و پوشش درصد‌های مختلف برای سد قره تیکان.

۴.۴.۴. سد چهچه

بر اساس داده‌های ارائه‌شده برای سد چهچه (شکل ۹)، حجم آب جلوگیری‌شده از تبخیر با استفاده از گوی‌های شناور در چهار سطح پوشش محاسبه شده است. این محاسبات با اعمال میانگین نرخ مهار تبخیر مربوط به هر درصد پوشش بر روی حجم تبخیر سالانه‌ی هر سال انجام شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی پتانسیل این روش در ذخیره‌سازی آب در مخزن سد چهچه است که از نظر حجم تبخیر، مشابه سد قره‌تیکان می‌باشد.

روند کلی افزایش حجم آب ذخیره‌شده با افزایش پوشش

در تمامی سال‌های مورد بررسی، حجم آب جلوگیری‌شده از تبخیر با افزایش درصد پوشش، به‌طور مستقیم افزایش یافته است. به‌عنوان مثال، در سال ۱۴۰۰ با حجم تبخیر ۱/۶۱۹ میلیون مترمکعب، پوشش ۱۸/۷۴٪ منجر به ذخیره‌سازی ۰/۲۷۶ میلیون مترمکعب، پوشش ۳۷/۴۹٪ منجر به ۰/۵۵۱ میلیون مترمکعب، پوشش ۵۶/۲۳٪ منجر به ۰/۷۶۱ میلیون مترمکعب و پوشش ۷۴/۹۸٪ منجر به ۰/۹۳۹ میلیون مترمکعب آب شده است. این افزایش متناسب با نرخ مهار تبخیر هر پوشش بوده است که نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی مستقیم بین پوشش و ذخیره‌سازی آب است.

تأثیر نوسانات سالانه‌ی تبخیر بر حجم آب ذخیره‌شده

حجم آب جلوگیری‌شده از تبخیر در سال‌های مختلف، بازتاب‌دهنده‌ی نوسانات اقلیمی و تغییرات حجم تبخیر سالانه در سد چهچه است. بیشترین حجم تبخیر در سال ۱۴۰۰ با ۱/۶۱۹ میلیون مترمکعب ثبت شده است که در این سال، پوشش ۷۴/۹۸٪ توانسته ۰/۹۳۹ میلیون مترمکعب آب ذخیره کند. در مقابل، کمترین حجم تبخیر در سال ۱۳۹۹ با ۰/۵۴۳ میلیون مترمکعب ثبت شده که پوشش ۷۴/۹۸٪ تنها ۰/۳۱ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است. این اختلاف چشمگیر (نسبت

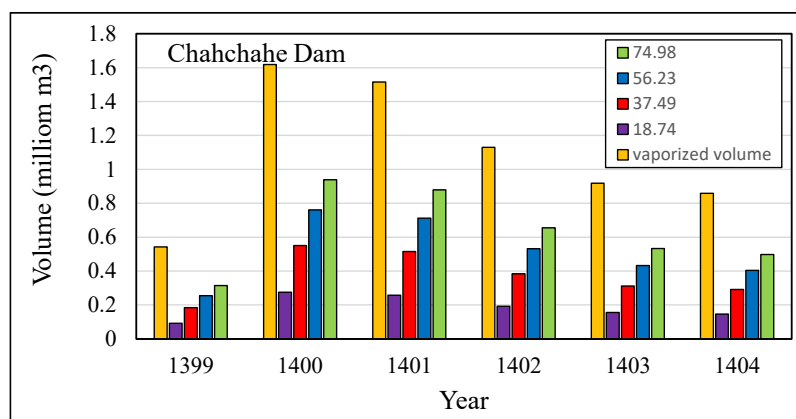
بیش از ۴/۵ برابری) نشان می‌دهد که کارایی این روش به‌شدت به حجم تبخیر سالانه وابسته است و در سال‌های خشک‌تر و گرم‌تر که تبخیر بیشتری رخ می‌دهد، پتانسیل ذخیره‌سازی آب نیز به‌طور متناسبی افزایش می‌یابد.

مقایسه‌ی عملکرد پوشش‌های مختلف در طول دوره‌ی آماری

بررسی میانگین ۶ ساله (۱۳۹۹ تا ۱۴۰۴) نشان می‌دهد که پوشش ۱۸/۷۴٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۰/۱۶۳ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۱۷٪ تبخیر سالانه است. پوشش ۳۷/۴۹٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۰/۳۲۶ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۳۴٪ تبخیر سالانه است. پوشش ۵۶/۲۳٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۰/۴۵۱ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۴۷٪ تبخیر سالانه است. پوشش ۷۴/۹۸٪ به‌طور میانگین سالانه حدود ۰/۵۵۶ میلیون مترمکعب آب ذخیره کرده است که معادل ۵۸٪ تبخیر سالانه است. افزایش پوشش از ۵۶/۲۳٪ به ۷۴/۹۸٪ (افزایش ۱۸/۷۵ درصدی پوشش) منجر به افزایش تنها ۰/۱۰۵ میلیون مترمکعب ذخیره‌سازی (افزایش ۲۳٪ در حجم ذخیره) شده است که نشان‌دهنده‌ی کاهش بازدهی اقتصادی در پوشش‌های بالاست. به‌عبارت دیگر، دو برابر کردن پوشش از ۳۷/۴۹٪ به ۷۴/۹۸٪، حجم ذخیره‌سازی را تنها ۷۰٪ افزایش می‌دهد، در حالی که هزینه‌ی پوشش دو برابر می‌شود.

شناسایی سال‌های خشک و تأثیر آن بر حجم ذخیره‌سازی

سال‌های با تبخیر بالا (مانند ۱۳۹۹، ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱) به‌وضوح پتانسیل بیشتری برای ذخیره‌سازی آب دارند. در سال ۱۴۰۰، پوشش ۷۴/۹۸٪ توانسته ۰/۹۳۹ میلیون مترمکعب آب ذخیره کند. این موضوع نشان می‌دهد که اجرای این روش در سال‌های خشک و گرم، بیشترین بازدهی را دارد و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مقابله با خشکسالی در مخازن کوچک مناطق خشک مورد استفاده قرار گیرد. داده‌های سد چهچهه نشان می‌دهد که استفاده از گوی‌های شناور با پوشش ۵۶/۲۳٪ می‌تواند به‌طور میانگین سالانه حدود ۰/۴۵۱ میلیون مترمکعب آب ذخیره کند که معادل ۴۷٪ تبخیر سالانه است. این میزان در سال‌های خشک به بیش از ۰/۷۱۲ میلیون مترمکعب نیز می‌رسد. با توجه به کاهش بازدهی اقتصادی در پوشش‌های بالاتر (۷۴/۹۸٪)، به‌نظر می‌رسد پوشش ۵۶/۲۳٪ گزینه‌ی متعادل‌تری از نظر نسبت ذخیره‌سازی به هزینه باشد، هرچند که در شرایط خشکسالی شدید، پوشش ۷۴/۹۸٪ می‌تواند حداکثر ذخیره‌سازی (تا ۰/۹۴ میلیون مترمکعب در سال‌های پربارش) را فراهم آورد.



شکل ۹ مقدار تبخیر سالانه و همچنین مقدار تبخیر جلوگیری شده برای حالت‌های بدون پوشش و پوشش درصدهای مختلف برای سد چهچهه.

۵. پیشنهاد و امکان سنجی

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش و بررسی پتانسیل استفاده از گوی‌های شناور در مهار تبخیر از مخازن استان خراسان رضوی، پیشنهادهای زیر برای بهبود کارایی، کاهش هزینه‌ها و امکان‌سنجی اجرایی این روش ارائه می‌شود:

- استفاده از گوی‌های پلاستیکی سفید رنگ به جای گوی‌های سیاه‌رنگ مورد استفاده در مقاله مرجع، می‌تواند به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در کاهش جذب حرارت و افزایش کارایی مهار تبخیر مدنظر قرار گیرد. با توجه به نتایج مقاله مرجع که نشان داد گوی‌های سیاه‌رنگ در هوای گرم، دمای بالایی پیدا کرده و هوای محبوس بین گوی‌ها و سطح آب را گرم می‌کنند، این امر باعث افزایش فشار بخار آب در فضای زیر پوشش و تشدید نیروی محرکه‌ی تبخیر می‌شود. در مقابل، گوی‌های سفید رنگ با ضریب جذب حرارت کمتر، می‌توانند دمای سطح پوشش را در تابستان کاهش داده و از گرم‌شدن هوای زیر گوی‌ها جلوگیری نمایند. این موضوع به‌ویژه در مناطق گرم و خشک نظیر خراسان رضوی که تابستان‌های طولانی و گرمی دارد، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در افزایش نرخ مهار تبخیر، به‌ویژه در ماه‌های گرم سال داشته باشد. همچنین، کاهش دمای سطح گوی‌ها می‌تواند از انتقال حرارت به لایه‌های بالایی آب جلوگیری کرده و از ایجاد لایه‌بندی دمایی و افزایش دمای سطح آب که در مقاله مرجع به‌عنوان یکی از عوامل کاهش کارایی پوشش در تابستان شناسایی شده است، بکاهد.
- بررسی امکان استفاده از ظرف‌های تبخیر با اندازه‌های مختلف به‌عنوان یکی دیگر از پیشنهادها مهم این پژوهش مطرح می‌شود. با توجه به اینکه آزمایش‌های مقاله مرجع در حوضچه‌هایی با قطر ۱/۲ متر و ارتفاع ۰/۸ متر انجام شده است، این سؤال مطرح می‌شود که آیا اندازه‌ی ظرف تبخیر و نسبت سطح به عمق آن، تأثیری بر میزان تبخیر و نرخ مهار آن توسط گوی‌های شناور دارد یا خیر. بررسی این موضوع از آن جهت حائز اهمیت است که مخازن واقعی دارای ابعاد بسیار بزرگ‌تری هستند و ممکن است پدیده‌های مقیاس (Scale Effects) در نتایج تأثیرگذار باشند. به‌عنوان مثال، در مخازن بزرگ، اثرات لبه‌ای (Edge Effects)، الگوهای جریان و تلاطم، توزیع حرارت و رطوبت در سطح آب و همچنین نحوه‌ی چیدمان و چگالی گوی‌ها در مقیاس بزرگ، می‌تواند با شرایط آزمایشگاهی تفاوت داشته باشد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود با استفاده از ظرف‌های تبخیر با قطرهای و ارتفاع‌های مختلف (به‌عنوان مثال، ظروف با قطر ۰/۵، ۱، ۲ و ۵ متر با عمق‌های ثابت و متغیر)، تأثیر ابعاد بر میزان تبخیر، نرخ مهار، و الگوی توزیع دما در آب مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، مقایسه‌ی نتایج حاصل از ظروف با نسبت سطح به حجم متفاوت، می‌تواند به تعیین ضریب تصحیحی برای تبدیل نتایج آزمایشگاهی به شرایط مخازن واقعی کمک کند و امکان برآورد دقیق‌تر حجم آب ذخیره‌شده در سدهای بزرگ را فراهم آورد.
- علاوه بر موارد فوق، پیشنهاد می‌شود مطالعات تکمیلی در زمینه‌های زیر نیز انجام شود: بررسی تأثیر رنگ‌های مختلف گوی‌ها (سفید، خاکستری، نقره‌ای و ...) بر میزان جذب و انعکاس تابش خورشیدی و در نتیجه بر نرخ مهار تبخیر؛ انجام آزمایش‌های پایلوت در یکی از مخازن کوچک‌تر استان خراسان رضوی (نظیر سد بار یا قره‌تیکن) به‌منظور ارزیابی عملکرد روش در شرایط واقعی و بررسی تأثیرات زیست‌محیطی آن بر کیفیت آب و اکوسیستم مخزن؛ بررسی اقتصادی استفاده از گوی‌های شناور با در نظر گرفتن هزینه‌های تولید، حمل‌ونقل، نصب و نگهداری در مقایسه با ارزش اقتصادی آب ذخیره‌شده در منطقه؛ و در نهایت، مطالعه‌ی تأثیر ترکیب این روش با سایر راهکارهای مهار تبخیر نظیر پوشش‌های شیمیایی یا استفاده از سایه‌بان‌های معلق، به‌منظور دستیابی به حداکثر

کارایی و کاهش هزینه‌ها. اجرای این پیشنهادها می‌تواند به توسعه‌ی دانش فنی مرتبط با مهار تبخیر در مخازن کمک کرده و زمینه‌ساز ارائه‌ی راهکارهای عملی و مقرون‌به‌صرفه برای مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران گردد.

۶. نتایج

در این پژوهش، با بهره‌گیری از نتایج تجربی مقاله مرجع در زمینه‌ی نرخ مهار تبخیر توسط گوی‌های شناور پلی‌اتیلن با چگالی بالا در چهار سطح پوشش مختلف، به بررسی و تحلیل سناریوی استفاده از این روش برای کاهش تلفات تبخیر در چهار سد استان خراسان رضوی شامل سدهای دوستی، بار، قره‌تیکان و چهچهه پرداخته شد. نتایج حاصل از این مطالعه‌ی تحلیلی نشان می‌دهد که استفاده از گوی‌های شناور با هر یک از سطوح پوشش مورد بررسی، می‌تواند به‌طور مؤثری از حجم قابل‌توجهی از تبخیر سالانه در مخازن جلوگیری نماید، به‌گونه‌ای که پوشش ۵۶/۲۳ درصد با میانگین نرخ مهار ۴۷ درصد و پوشش ۷۴/۹۸ درصد با میانگین نرخ مهار ۵۸ درصد، بیشترین پتانسیل را در کاهش تلفات آب دارا هستند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که اگرچه درصد مهار تبخیر برای تمام سدها یکسان است، اما حجم مطلق آب ذخیره‌شده تابع مستقیمی از ابعاد مخزن و میزان تبخیر سالانه می‌باشد و اجرای این روش در سال‌های خشک و گرم با تبخیر بالا، بیشترین بازدهی را داشته و می‌تواند به عنوان یک راهکار مقابله با کم‌آبی در شرایط بحرانی مورد استفاده قرار گیرد. از منظر اقتصادی و عملکردی، پوشش ۵۶/۲۳ درصد به‌عنوان گزینه‌ی متعادل از نظر نسبت ذخیره‌سازی به هزینه‌ی پوشش، برای تمام سدهای مورد مطالعه پیشنهاد می‌گردد، هرچند که در شرایط خشکسالی شدید، پوشش ۷۴/۹۸ درصد با تحمل هزینه‌ی بیشتر، می‌تواند حداکثر حجم آب ذخیره‌سازی را فراهم آورد. اجرای این روش می‌تواند گامی مؤثر در جهت افزایش امنیت آبی استان خراسان رضوی، کاهش وابستگی به منابع آب زیرزمینی، و تحقق اهداف توسعه‌ی پایدار در حوزه‌ی منابع آب و آبخیزداری باشد.

۱. رابطه‌ی بین درصد پوشش و نرخ مهار تبخیر به‌صورت غیرخطی بوده و نرخ مهار همواره کمتر از درصد پوشش است؛ به‌طوری که پوشش ۵۶/۲۳ درصد به‌طور میانگین ۴۷ درصد و پوشش ۷۴/۹۸ درصد به‌طور میانگین ۵۸ درصد از تبخیر را مهار می‌کنند.

۲. حجم مطلق آب ذخیره‌شده تابع مستقیمی از ابعاد مخزن و میزان تبخیر سالانه است؛ به‌گونه‌ای که سد دوستی با پوشش ۷۴/۹۸ درصد به‌طور میانگین سالانه ۲۶/۳ میلیون مترمکعب آب ذخیره می‌کند، در حالی که این مقدار برای سدهای بار، قره‌تیکان و چهچهه به‌ترتیب ۰/۵۳۳، ۰/۵۵۶ و ۰/۵۵۶ میلیون مترمکعب است.

۳. اجرای این روش در سال‌های خشک و گرم با تبخیر بالا، بیشترین بازدهی را دارد؛ به‌گونه‌ای که در سد دوستی، در سال‌های با تبخیر بالا، پوشش ۷۴/۹۸ درصد توانسته بیش از ۳۵ میلیون مترمکعب آب ذخیره کند، در حالی که در سال‌های با تبخیر کم، این مقدار به کمتر از ۲ میلیون مترمکعب کاهش یافته است.

۴. از نظر اقتصادی، پوشش ۵۶/۲۳ درصد با نسبت ذخیره‌سازی به هزینه‌ی مناسب‌تر، به‌عنوان گزینه‌ی بهینه برای تمام سدهای مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود، هرچند که در شرایط بحران آبی، پوشش ۷۴/۹۸ درصد می‌تواند حداکثر ذخیره‌سازی را فراهم آورد.

۵. استفاده از این روش می‌تواند سهم قابل‌توجهی در تأمین آب کشاورزی، شرب و صنعت خراسان رضوی داشته باشد و با کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی، به بهبود وضعیت آبخوان‌ها و تحقق اهداف آبخیزداری و توسعه‌ی پایدار کمک نماید.

۶. مراجع

1. Craig I (2008) Loss of storage water through evaporation with particular reference to arid and semi-arid zone pastoralism in Australia (Working paper no. 19, the WaterSmart™ Literature Reviews). Desert Knowledge CRC
2. Battisi DS, Naylor RL (2009) Historical Warnings of Future Food Insecurity with Unprecedented Seasonal Heat, Science. J Sci 323:240–244
3. Lehner B, Liermann CR, Revenga C, et al (2011) High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. Front Ecol Environ 9:494–502
4. Mao HaiTao MH, Wang ZhengCheng WZ, Wang XiaoJu WX, et al (2018) Establishment of water surface evaporation model and determination of key parameters for plain reservoir in Northern Xinjiang.
5. Assouline S, Narkis K, Or D (2010) Evaporation from partially covered water surfaces. Water Resour Res 46:
6. Han K-W, Shi K-B, Yan X-J (2020) Evaporation loss and energy balance of agricultural reservoirs covered with counterweighted spheres in arid region. Agric Water Manag 238:106227
7. Waheeb Youssef Y, Khodzinskaya A (2019) A review of evaporation reduction methods from water surfaces. In: E3S web of conferences. EDP Sciences, p 5044
8. Panjabi K, Rudra R, Goel P (2016) Evaporation retardation by monomolecular layers: An experimental study at the Aji reservoir (India). Open J Civ Eng 6:346
9. Mozafari A, Mansouri B, Chini SF (2019) Effect of wind flow and solar radiation on functionality of water evaporation suppression monolayers. Water Resour Manag 33:3513–3522
10. Hipsey MR, Sivapalan M, Clement TP (2004) A numerical and field investigation of surface heat fluxes from small wind-sheltered waterbodies in semi-arid Western Australia. Environ Fluid Mech 4:79–106
11. Linacre ET, Hicks BB, Sainty GR, Grauze G (1970) The evaporation from a swamp. Agric Meteorol 7:375–386
12. Alam S, AlShaikh AA (2013) Use of palm fronds as shaded cover for evaporation reduction to improve water storage efficiency. J King Saud Univ Sci 25:55–58
13. Alvarez VM, Baille A, Martínez JMM, González-Real MM (2006) Efficiency of shading materials in reducing evaporation from free water surfaces. Agric Water Manag 84:229–239
14. Gallego-Elvira B, Baille A, Martin-Gorriz B, et al (2011) Energy balance and evaporation loss of an irrigation reservoir equipped with a suspended cover in a semiarid climate (south-eastern Spain). Hydrol Process 25:1694–1703
15. Finn N (2007) The benefits of shade-cloth covers for potable water storages
16. Alvarez VM, Leyva JC, Valero JFM, Górriz BM (2009) Economic assessment of shade-cloth covers for agricultural irrigation reservoirs in a semi-arid climate. Agric Water Manag 96:1351–1359
17. Zhang H, Lemckert C, Brook A, Schouten P (2010) Evaporation reduction by suspended and floating covers: overview, modelling and efficiency
18. El Baradei S, Al Sadeq M (2020) Effect of solar canals on evaporation, water quality, and power production: An optimization study. Water 12:
19. Rezazadeh A, Akbarzadeh P, Aminzadeh M (2020) The effect of floating balls density on evaporation suppression of water reservoirs in the presence of surface flows. J Hydrol 591:125323
20. Han K-W, Shi K-B, Yan X-J, Cheng Y-Y (2019) Water savings efficiency of counterweighted spheres covering a plain reservoir in an arid area. Water Resour Manag 33:1867–1880
21. Haghighi E, Madani K, Hoekstra AY (2018) The water footprint of water conservation using shade balls in California. Nat Sustain 1:358–360
22. Shalaby MM, Nassar IN, Abdallah AM (2021) Evaporation suppression from open water surface using various floating covers with consideration of water ecology. J Hydrol 598:126482
23. Aminzadeh M, Lehmann P, Or D (2018) Evaporation suppression and energy balance of water reservoirs covered with self-assembling floating elements. Hydrol Earth Syst Sci 22:4015–4032
24. El Baradei SA, Al Sadeq M (2019) Optimum coverage of irrigation canals to minimize evaporation and maximize dissolved oxygen concentration: case study of Toshka, Egypt. Int J Environ Sci Technol 16:4223–4230
25. Hao G, Han K, Shi K (2023) Effect of floating balls on evaporation inhibition, surface energy balance and biological water quality parameters at different coverage fractions. Agric Water Manag 287:108460

26. Lehmann P, Aminzadeh M, Or D (2019) Evaporation suppression from water bodies using floating covers: laboratory studies of cover type, wind, and radiation effects. Water Resour Res 55:4839–4853