

Evaluation of the Performance of an Evaporation Reducing Materials and Assessment of Its Quantity and Quality Effects in Water Resources (Semi-Industrial Study)

Abstract

Background and Objectives: Due to its arid and semi-arid climate, Iran experiences high rates of evaporation from open water bodies, leading to the annual loss of substantial volumes of water. In this context, the application of novel technologies to reduce evaporation has emerged as an important strategy for sustainable water resource management. The objective of this study is to evaluate the performance of a silica-based evaporation-reducing agent at a semi-industrial scale and to investigate its quantitative and qualitative effects on surface water resources

Research Methodology: The experiments were conducted in the Shamil and Nian Dam area in Hormozgan Province using two experimental ponds, one serving as a control and the other treated with the silica-based evaporation-reducing agent. Evaporation rates were monitored over a three-month period using both manual and digital methods. To assess the impact of the agent on water quality, periodic sampling was performed and parameters were measured.

Findings: The results indicated that the silica-based evaporation-reducing agent led to an average reduction of approximately 15% in evaporation compared to the control pond. From a water quality perspective, no significant changes were observed in most physical and chemical parameters.

Conclusion: The findings demonstrate that the silica-based evaporation-reducing agent can be an effective tool for reducing evaporation from open water resources. Although no significant adverse effects on water quality were detected, the observed changes in color and algal growth suggest that environmental monitoring and optimization of the agent's formulation are necessary for large-scale applications.

Keywords: Evaporation reduction, silica-based evaporation-reducing agent, surface water resources, water quality, arid and semi-arid regions

ارزیابی عملکرد مواد کاهنده تبخیر و بررسی آثار کمی و کیفی آن در منابع آبی (مقیاس نیمه صنعتی)

چکیده

اهداف و زمینه‌ها: ایران به دلیل قرارگیری در اقلیم خشک و نیمه‌خشک با نرخ بالای تبخیر از منابع روباز آبی مواجه است که سالانه موجب اتلاف حجم قابل توجهی از آب می‌شود. در این راستا، استفاده از فناوری‌های نوین برای کاهش تبخیر به‌عنوان یکی از راهکارهای مدیریت پایدار منابع آب مطرح است. هدف این پژوهش، ارزیابی عملکرد یک عامل کاهنده تبخیر مبتنی بر ترکیبات سیلیسی در مقیاس نیمه‌صنعتی و بررسی آثار کمی و کیفی آن بر منابع آب سطحی است.

روش‌شناسی تحقیق: آزمایش‌ها در محدوده سد شمیل و نیان استان هرمزگان و در دو حوضچه آزمایشی انجام شد که یکی به‌عنوان حوضچه شاهد و دیگری حاوی عامل کاهنده تبخیر سیلیسی در نظر گرفته شد. نرخ تبخیر طی دوره سه‌ماهه به دو روش دستی و دیجیتال اندازه‌گیری گردید. همچنین به‌منظور ارزیابی اثر ماده بر کیفیت آب، نمونه‌برداری‌های دوره‌ای انجام و پارامترهایی اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که استفاده از عامل کاهنده تبخیر سیلیسی به‌طور متوسط موجب کاهش حدود ۱۵ درصدی تبخیر نسبت به حوضچه شاهد شده است. از نظر کیفی، تغییر معناداری در اغلب پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب مشاهده نشد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد عامل کاهنده تبخیر سیلیسی می‌تواند ابزاری مؤثر برای کاهش تبخیر در منابع آب روباز باشد. با وجود عدم بروز اثرات منفی قابل توجه بر کیفیت آب، مشاهده تغییر رنگ و رشد جلبک نشان داد که پایش زیست‌محیطی و بهینه‌سازی فرمولاسیون ماده برای کاربردهای گسترده‌تر ضروری است.

کلیدواژه‌ها: کاهش تبخیر، عامل کاهنده تبخیر سیلیسی، منابع آب سطحی، کیفیت آب، مناطق خشک و نیمه‌خشک

مقدمه

ایران به دلیل قرارگیری در کمربند خشک و نیمه خشک زمین همواره با چالش‌های جدی در تأمین منابع آبی مواجه بوده است. میانگین بارندگی سالانه در کشور کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر است، در حالی که این رقم در سطح جهانی حدود ۸۵۰ میلی‌متر برآورد می‌شود. در مقابل، متوسط نرخ تبخیر سالانه در ایران بیش از ۲۱۰۰ میلی‌متر است، که بیش از سه برابر میانگین جهانی (حدود ۷۰۰ میلی‌متر) محسوب می‌شود. این شرایط اقلیمی، همراه با افزایش دما و کاهش منابع آب تجدیدپذیر، مناطق وسیعی از کشور—به ویژه استان‌های جنوبی مانند هرمزگان—را در معرض تنش شدید آبی قرار داده است.

یکی از مهم‌ترین مسیرهای اتلاف آب در ایران، تبخیر سطحی از منابع روباز مانند سدها، مخازن ذخیره، حوضچه‌ها و دریاچه‌ها است. بررسی‌ها نشان داد که سالانه حدود ۲ میلیارد مترمکعب آب ذخیره‌شده در سدهای کشور به دلیل تبخیر از دست می‌رود؛ رقمی معادل ۶ درصد از کل ظرفیت مخازن موجود. مدیریت مؤثر تبخیر سطحی به عنوان یکی از راهبردهای کلیدی در بهره‌برداری بهینه از منابع آب اهمیت ویژه‌ای دارد.

در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای کاهش تبخیر سطحی پیشنهاد و بررسی شده‌اند، از جمله طراحی سازه‌هایی با عمق بیشتر و سطح کمتر، استفاده از پوشش‌های فیزیکی (نظیر صفحات شناور یا سایه بان‌ها)، پوشش‌های بیولوژیک (همچون گیاهان سطحی یا بادشکن‌های طبیعی و مصنوعی) و روش‌های شیمیایی. هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند و انتخاب مناسب‌ترین گزینه وابسته به بررسی‌های علمی، محیط زیستی و اقتصادی در شرایط بومی می‌باشد.

کاهش تبخیر از سطح منابع آبی روباز، به عنوان یکی از راهبردهای مؤثر در مدیریت پایدار منابع آب، طی دهه‌های اخیر مورد توجه گسترده قرار گرفته است. در شرایطی که بسیاری از مناطق جهان - به ویژه اقلیم‌های خشک و نیمه خشک نظیر ایران - با پدیده‌ی تنش آبی و کاهش منابع تجدیدپذیر مواجه هستند، مدیریت تلفات ناشی از تبخیر می‌تواند نقش مهمی در پایداری ذخایر آبی و ارتقای بهره‌وری مصرف ایفا کند. مطالعات متعدد نشان داد که میزان تلفات تبخیر از منابع روباز در برخی کشورها نظیر استرالیا، ایران، هند، ایالات متحده آمریکا و کشورهای آفریقایی، بین ۵ تا ۳۰ درصد کل ذخایر سالانه آب برآورد شده است [Craig et al., 2005]. این مسئله موجب شده است که پژوهشگران در سراسر جهان به طراحی و ارزیابی فناوری‌های مختلف برای کنترل یا کاهش تبخیر بپردازند.

تبخیر سطحی یکی از مهم‌ترین عوامل اتلاف آب در منابع آبی روباز نظیر سدها، دریاچه‌ها، و حوضچه‌های ذخیره آب به شمار می‌رود، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک که مدیریت منابع آبی از اهمیت بالایی برخوردار است. بر اساس گزارش [Sajia, 2018]، میزان اتلاف آب از مخازن ۱۷ ایالت غربی آمریکا سالانه به ۱۵/۶ میلیون ایکر-فوت می‌رسد که معادل کل ذخیره آب ایالت کالیفرنیا در سال ۱۹۵۶ بوده است. به دنبال بحران خشکسالی در این ایالت، استفاده از راهکارهای نوین برای کاهش تبخیر نظیر رهاسازی بیش از ۹۶ میلیون توپ سایه پلاستیکی در مخزن لس‌آنجلس در سال ۲۰۱۵ انجام گرفت که کاهش تبخیری حدود ۱/۱۵ میلیون مترمکعب در سال را موجب شد [Haghighi et al., 2018]. مطالعات گسترده‌ای پیرامون استفاده از پوشش‌های فیزیکی و مواد شیمیایی به منظور کنترل تبخیر صورت گرفته است. مواد شیمیایی مورد استفاده اغلب بر پایه الکل‌های چرب نظیر هگزاکانول و اکتادکانول هستند که به صورت تک‌لایه (monolayer) در سطح آب گسترش می‌یابند. تحقیقات ابتدایی، کاهش تبخیر بین ۳۳ تا ۵۳ درصد را با استفاده از هگزاکانول گزارش نمود. پس از آن، تحقیقات [Rideale, 1925]، نیز نقش مؤثر ترکیبات شیمیایی، به ویژه ترکیب سه گانه اکتادکانول، هگزاکانول و اکوسانول، را در کاهش تبخیر به ویژه در مقیاس میدانی تأیید کردند. در کنار الکل‌های چرب، استفاده از امولسیون‌هایی متشکل از الکل‌های آلیفاتیک و افزودنی‌هایی نظیر پودر آهک هیدراته نیز پیشنهاد شده است که قابلیت پخش بهتر روی سطح آب و دوام نسبی در برابر تخریب زیستی را دارند. با این حال، کارایی این مواد در شرایط میدانی به مراتب کمتر از شرایط آزمایشگاهی است و نیاز به تکرار اعمال ماده طی دوره‌های زمانی کوتاه (۱ تا ۴ روز) دارد. از سوی دیگر، کاربرد نانوذرات و ترکیبات معدنی نیز مورد توجه قرار گرفته است. به طور مثال، Chen و همکاران [Chen et al., 2010] اثر نانوذرات مختلفی مانند Fe_2O_3 و ZrO_2 را در کاهش تبخیر بررسی کردند و نشان دادند که برخی از این مواد توانایی ایجاد سد فیزیکی بر سطح آب و کاهش تبخیر را دارند. در مقابل، نانوذراتی نظیر رس و نقره منجر به افزایش تبخیر شدند که به نوع ماده و نحوه برهم‌کنش آن با سطح آب بستگی دارد.

در سال‌های اخیر، سامانه‌های مبتنی بر بخار زیراتمسفری (SAVP) به عنوان رویکردی نوین در کاهش تلفات تبخیری مورد توجه قرار گرفته‌اند. مطالعات پیشین با مدل‌سازی همزمان انتقال حرارت و جرم و در نظر گرفتن شرایط ناپایدار، نشان داده‌اند که این سیستم‌ها در صورت کالبراسیون مناسب، دقت قابل قبولی در پیش‌بینی رفتار واقعی دارند. نتایج تحقیقات بیانگر آن است که

عملکرد این سامانه‌ها به شدت تحت تأثیر پارامترهایی نظیر دمای محیط، فشار عملیاتی و خواص ترمودینامیکی سیال قرار دارد و ناپایداری‌های حرارتی و فشاری می‌توانند موجب کاهش راندمان و افزایش تلفات انرژی شوند. از این رو، بهینه‌سازی شرایط بهره‌برداری نقش مهمی در بهبود عملکرد این سیستم‌ها ایفا می‌کند [Youssef and khodzinskaya, 2019]. پوشش‌های شناور می‌توانند به صورت پوشش‌های پیوسته (ورق‌های شناور) یا پوشش‌های مدولار (اجسام شناور) باشند [Yao et al. 2010]. پوشش‌های شناور پیوسته معمولاً یک لایه نفوذناپذیر ایجاد می‌کنند که بر سطح آب شناور شده و موجب کاهش تبخیر می‌شود. موادی مانند پلی‌استایرن، موم و فوم برای ساخت این نوع پوشش‌ها مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، اما پلاستیک پلی‌اتیلن به عنوان مناسب‌ترین و بادوام‌ترین ماده برای این نوع پوشش‌ها شناخته شده است. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که ورق‌های شناوری مانند E-VapCaps می‌توانند بیش از ۹۵ درصد تبخیر از مخازن آب روباز را کاهش دهند [Craig, 2005]. برخلاف پوشش‌های شناور پیوسته، پوشش‌های شناور مدولار از واحدهای مجزایی تشکیل شده‌اند که به صورت آزاد روی سطح آب شناور می‌شوند و سطح آب را به طور کامل نمی‌پوشانند، بنابراین، از طریق فضاهای باز ایجاد شده بین آن‌ها، انتقال اکسیژن محلول (DO) افزایش می‌یابد. آکواکپ‌ها (Aquacaps) و توپ‌های سایه‌انداز (Shade Balls) از جمله نمونه‌های پوشش‌های شناور مدولار مورد استفاده هستند. دیسک‌های شناور (Aquacaps)، ماژول‌های شناور گرد و گنبدی شکل با قطری حدود ۱/۸ متر هستند که از پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) ساخته می‌شوند و هر دو مطابق با استانداردهای مواد غذایی هستند. یک سوراخ منفرد با قطر حدود ۱۰ میلی‌متر در مرکز آکواکپ تعبیه شده است تا تعادل فشار را فراهم کرده و هنگام قرارگیری پوشش روی آب، هوا را خارج کند [Baldwin, 2010]. مطالعه‌ای در مقیاس آزمایشگاهی به منظور برآورد کارایی عناصر شناور در کاهش تلفات تبخیری از مخازن آب انجام شد. در این پژوهش از دو حوضچه کوچک، یکی پوشیده و دیگری بدون پوشش، استفاده گردید. حوضچه پوشیده به صورت مربعی با مساحت ۱/۴۴ مترمربع و عمق ۰/۱۶ متر بود و عناصر شناور شامل دیسک‌های استایروفومی به رنگ‌های سیاه و سفید با قطر ۰/۲ متر و ضخامت ۰/۰۲ متر بودند که حدود ۹۱ درصد سطح آب را پوشش می‌دادند. به منظور بررسی تأثیر باد و تابش موج کوتاه بر نرخ تبخیر، از تونل باد در بالادست و چهار منبع نور زنون استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان تبخیر از مخزن پوشیده در مقایسه با سطح آب بدون پوشش حدود ۸۰ درصد کاهش یافته است. با این حال، تغییر رنگ پوشش تأثیر معناداری بر نرخ تبخیر نداشت [Aminzadeh et al. 2018]. در این پژوهش، عملکرد یک سامانه گرمایش آب خورشیدی ترکیب شده با پوشش‌های شناور و سلول‌های فتوولتائیک در شرایط خشک شمال شیلی بررسی شد. دو حوضچه مشابه (یکی گرم شده و دیگری شاهد) مورد آزمایش قرار گرفتند. پوشش‌های شناور علاوه بر کاهش تبخیر، بستر نصب سلول‌های خورشیدی برای تأمین انرژی پمپاژ بودند. نتایج نشان داد که پوشش شناور موجب کاهش بیش از ۹۰٪ تبخیر نسبت به حالت بدون پوشش شد و سلول‌های فتوولتائیک توان تولیدی تا 68 Wp/m^2 داشتند. این سیستم با کاهش همزمان اتلاف آب و انرژی، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای صنعتی به ویژه در معادن مس و فرآیندهای لیچینگ است و قابلیت توسعه در مقیاس بزرگ را دارد [Taboada et al. 2017]. کاهش منابع آب و افزایش تقاضا، کنترل تبخیر از منابع سطحی را ضروری کرده است. روش‌های کاهش تبخیر شامل فیزیکی، شیمیایی، زیستی و ترکیبی هستند. نتایج نشان می‌دهد لایه‌های تک‌مولکولی تا ۵۷٪، روش‌های زیستی تا ۶۰٪ و روش‌های مکانیکی با وجود هزینه بیشتر، کاهش قابل توجهی در تبخیر ایجاد می‌کنند. انتخاب روش مناسب به شرایط اقلیمی، هزینه و ملاحظات زیست محیطی بستگی دارد [Deepka et al. 2020]. مطالعات متعددی نیز اثربخشی کمربندهای حفاظتی گیاهی (Shelter Belts) را در کنترل تبخیر از طریق کاهش سرعت باد به میزان ۴۰ تا ۵۰ درصد گزارش کرده‌اند. این کاهش با تغییر فاصله کاشت، جهت‌گیری و عرض کمربند حفاظتی حاصل شده است [Monfared et al. 2019]. مخزن سد عالی اسوان به دلیل اقلیم خشک و سطح گسترده، با تلفات تبخیری قابل توجهی مواجه است. در این پژوهش، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست، داده‌های باتیمتری و نقشه‌های توپوگرافی، مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۲۵ متر تهیه و روابط تراز-سطح-حجم مخزن استخراج شد. نتایج نشان داد که حذف یا محدودسازی خورهای کم عمق می‌تواند سطح تبخیر را کاهش دهد؛ به طوری که بستن برخی خورها و پوشش‌دهی بخش‌های کم عمق، امکان صرفه‌جویی حدود ۳ میلیارد مترمکعب آب را تا پایان قرن فراهم می‌کند. این مطالعه کارایی تلفیق سنجش از دور و مدل‌سازی مورفولوژیک را در کاهش تلفات تبخیری مخازن بزرگ نشان می‌دهد [Elba et al. 2014]. مساحت دریاچه را می‌توان از طریق حذف بخشی از آبراهه‌ها و بریدگی‌های ساحلی کاهش داد. این نواحی ساحلی که معمولاً دارای عمق کم هستند، به صورت محلی خور (Khor) نامیده می‌شوند. خورهای سد HADR دارای عمق آب کم و کیفیت پایین آب هستند. در مطالعات پیشین مربوط به این مخزن، حذف برخی از این خورها مورد بررسی قرار گرفته است [Ebaid et al. 2010]. گرمایش جهانی و افزایش گازهای گلخانه‌ای موجب تغییر الگوهای دما و بارش شده و به طور مستقیم بر

ذخیره مخازن و منابع آب اثر می‌گذارد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تبخیر یکی از مهم‌ترین عوامل اتلاف آب است؛ به‌طوری‌که در برخی مطالعات تا ۹۵ درصد بارش‌ها از طریق تبخیر از دست می‌رود. روش‌های کنترل تبخیر عمدتاً به دو گروه فیزیکی و شیمیایی تقسیم می‌شوند. روش‌های فیزیکی مانند پوشش‌های شناور و بادشکن‌ها کاهش تبخیر بالاتری (تا ۷۰-۱۰۰٪) دارند، اما هزینه اولیه بیشتری نیاز دارند. در مقابل، روش‌های شیمیایی مانند لایه‌های تک‌مولکولی با هزینه کمتر، کاهش محدودتری (حدود ۲۰-۴۰٪) ایجاد می‌کنند و ممکن است بر کیفیت آب اثر بگذارند. در مجموع، انتخاب روش مناسب به شرایط اقلیمی، ابعاد مخزن و ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی وابسته است [Benzaghta and Mohamad, 2019]. در این پژوهش، اثر پوشش MDF بر کاهش تبخیر در تشت استاندارد کلرادو بررسی شد. همچنین از مدل‌های ANN و LSSVM برای پیش‌بینی تبخیر استفاده گردید که LSSVM عملکرد بهتری داشت. نتایج نشان داد عوامل اقلیمی مانند دما و رطوبت بر تبخیر اثرگذارند و استفاده از MDF موجب کاهش حدود ۹۱ درصدی تبخیر شد. این روش به‌عنوان راهکاری مؤثر و کم‌هزینه برای کنترل تبخیر پیشنهاد می‌شود [Ghazvinian et al. 2020].

Santafe و همکاران [Santafe et al. 2013] یک پوشش سلول خورشیدی شناور را برای کاهش تبخیر پیشنهاد کردند. روش پیشنهادی آن‌ها نه تنها موجب کاهش تبخیر می‌شد، بلکه انرژی مورد نیاز سامانه‌های آبیاری را نیز تأمین می‌کرد؛ موضوعی که در شرایط کنونی اهمیت روزافزونی دارد. این پژوهش بر روی مخازن والنسیا انجام شد. آن‌ها این روش دو منظوره را به‌عنوان یک راهکار نسبتاً ساده و مقرون‌به‌صرفه معرفی کردند. در زمینه برآورد تبخیر با استفاده از روش‌های هوشمند، Guven و همکاران [Guven and Kisi, 2011] توانایی برنامه‌نویسی ژنتیکی خطی (LGP) را برای مدل‌سازی تبخیر تشتک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتایج این روش را با شبکه عصبی تابع پایه شعاعی، رگرسیون شبکه عصبی توسعه‌یافته و مدل Stephens-Stewart مقایسه کردند. نتایج نشان داد که روش LGP عملکرد بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد.

Kisi [Kisi, 2015] نیز دقت روش‌های ماشین بردار پشتیبان کمترین مربعات (LSSVM)، رگرسیون چندمتغیره تطبیقی (MARS) و مدل درختی (M5) را در مدل‌سازی تبخیر بررسی کرد. این مطالعه با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های مرسین و آنتالیا در ترکیه انجام شد. نتایج نشان داد که مدل LSSVM در برآورد پارامترهای تبخیر این ایستگاه‌ها با استفاده از داده‌های ورودی و خروجی محلی، عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های MARS و M5Tree دارد.

Tezel و Buyukyildiz [Tezal and Buyukyildiz, 2016] تبخیر ماهانه ایستگاه هواشناسی بی‌شهر در ترکیه را با استفاده از روش‌های LSSVM و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) ارزیابی کردند. دوره آماری مورد استفاده از سال ۱۹۷۲ آغاز شده و داده‌های دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و بارش در مدل‌سازی به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی پرسپترون عملکرد بسیار مطلوبی دارد. همچنین Kisi و Heddham [Kisi and Heddham, 2019] تبخیر تشتک را تنها با استفاده از داده‌های حداقل و حداکثر دمای ماهانه در سه ایستگاه هواشناسی در ترکیه و با دو روش MARS و M5 برآورد کردند. علاوه بر این، عملکرد این مدل‌ها با روش‌های کالیبره‌شده (HS) Hargreaves-Samani، Stephens-Stewart و رگرسیون خطی چندگانه مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل MARS نسبت به سایر مدل‌ها دقت بیشتری دارد. یک مرور انتقادی بر معادلات تجربی و تئوریک محاسبه تبخیر از سطوح آزاد آب نشان می‌دهد که در گذشته به‌دلیل نبود اجماع، مقادیر برآوردی تبخیر دارای پراکندگی قابل‌توجهی بوده‌اند. با اعمال معیارهای نظری، این اختلاف‌ها کاهش یافته و روابط دقیق‌تری معرفی شده‌اند که اثر زبری سطح و انتقال جرم را بهتر در نظر می‌گیرند. همچنین مشخص شد که تبخیر از تشت تبخیر لزوماً نماینده دقیقی از تبخیر در مقیاس مخازن بزرگ نیست و به شرایط سطح و ابعاد بستگی دارد [Sartori, 2000]. در ایران نیز پژوهش‌های متعددی در زمینه کاربرد مواد کاهنده تبخیر انجام شده است. پیری و همکاران (۱۳۹۰) ترکیبی از پوشش‌های فیزیکی و شیمیایی را مورد آزمایش قرار دادند و کاهش تبخیری در بازه ۳۰ تا ۵۵ درصد برای روش‌های فیزیکی و ۴۰ تا ۵۵ درصد برای روش‌های شیمیایی گزارش نمودند. افخمی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از حلقه‌های فرسوده یونورینگ در حوضچه‌هایی واقع در مجتمع مس سرچشمه، کاهش تبخیری معادل ۷۸ درصد را ثبت کردند. خلیج و همکاران، (۱۳۹۶) نیز از پودر واترسیور شامل ترکیب ستیل الکل و هگزادکانول در دو غلظت مختلف بهره گرفتند که منجر به کاهش تبخیر بین ۱۸ تا ۳۰ درصد شد. روش‌های فیزیکی همچون استفاده از توپ‌های سایه نیز به‌طور گسترده در مطالعات داخلی بررسی شده‌اند. وصالی و شهیدی، (۱۳۹۸) ضمن مقایسه روش‌های فیزیکی و شیمیایی، دریافتند که تلفیق این دو رویکرد می‌تواند راندمان بالاتری در کاهش تبخیر ایجاد نماید. ابراهیمیان و همکاران، (۱۴۰۱) برای نخستین بار ترکیب مونولایر هگزادکانول و توپ‌های پروپیلنی را بررسی کرده و بالاترین راندمان را با استفاده از توپ‌های بدون روزنه (تا ۸۶/۷ درصد)

گزارش نمودند. در نهایت، پژوهش محمدی و همکاران، (۱۳۹۹) اثر پوشش‌های شیمیایی در کاهش تبخیر از آب شور دریاچه ارومیه را در مقیاس‌های مختلف آزمایش کردند و کاهش‌هایی بین ۱۷/۵ تا ۳۸/۵ درصد را بسته به اقلیم و مقیاس مشاهده نمودند. به‌طور کلی، بررسی مطالعات گذشته نشان داد که مواد شیمیایی بر پایه الکل‌های چرب، نانوذرات، و امولسیون‌ها در کنار پوشش‌های فیزیکی مانند توپ‌های سایه می‌توانند در کاهش تبخیر مؤثر واقع شوند. با این حال، دوام، زیست‌پذیری، هزینه، سهولت اجرا، و تأثیر بر کیفیت آب از عوامل کلیدی در انتخاب روش مناسب هستند. همچنین بیشتر تحقیقات انجام‌شده در مقیاس آزمایشگاهی یا میدانی محدود بوده‌اند و ارزیابی‌های جامع‌تری در مقیاس نیمه‌صنعتی، به‌ویژه از نظر اثرات کیفی، مورد نیاز است. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر بررسی یک ماده کاهنده تبخیر سیلیسی جدید در مقیاس پایلوت نیمه‌صنعتی از منظر کاهش تبخیر و همچنین تحلیل اثرات احتمالی آن بر کیفیت آب از طریق اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی می‌باشد. این مطالعه می‌تواند گامی مؤثر در جهت توسعه راهکارهای کاربردی و بومی‌سازی فناوری‌های نوین مدیریت تبخیر در منابع آبی کشور باشد. مطالعه حاضر به بررسی عملکرد یک عامل کاهنده تبخیر مبتنی بر ترکیبات سیلیسی در مقیاس نیمه‌صنعتی، تحت شرایط اقلیمی استان هرمزگان می‌پردازد. در این تحقیق، علاوه بر تحلیل آثار کمی این ماده بر کاهش تبخیر، تأثیرات آن بر کیفیت آب نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف اصلی مطالعه، ارائه داده‌های کاربردی برای تصمیم‌گیری مؤثر در زمینه استفاده از عوامل کاهنده تبخیر به‌منظور کاهش هدررفت منابع آبی و حرکت به‌سوی توسعه پایدار در بخش آب کشور است.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

مطالعه حاضر از اسفندماه ۱۴۰۳ آغاز و تا خرداد ماه ۱۴۰۴ در محدوده سدهای شمیل و نیان واقع در استان هرمزگان، در فاصله‌ای حدود ۱۰۰ کیلومتری شمال‌شرق شهر بندرعباس، اجرا گردید. این سدها که بر روی رودخانه‌های شمیل و زندان احداث شده‌اند، شامل دو دیواره خاکی با هسته رسی هستند که مخزن مشترکی را تشکیل داده و به‌صورت مجموعه‌ای واحد تحت عنوان «سد شمیل و نیان» شناخته می‌شوند. هدف از احداث این سامانه، مهار سیلاب‌های فصلی و تأمین بخشی از آب شرب شهر بندرعباس، جزیره قشم، بندر خمیر، صنایع غرب بندرعباس، و نیز آبیاری حدود ۲۵۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی پایین‌دست بوده است. از منظر اقلیمی، منطقه مورد مطالعه در زمره مناطق نیمه‌خشک تا خشک گرمسیری قرار دارد. میانگین دمای سالانه حدود ۲۷ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالیانه در حدود ۲۵۰ میلی‌متر گزارش شده است که بخش عمده آن در فصل‌های پاییز و زمستان رخ می‌دهد. رطوبت نسبی میانگین منطقه حدود ۴۵٪ بوده و تعداد روزهای آفتابی سالانه بیش از ۳۲۰ روز برآورد می‌شود. تابستان‌ها بسیار گرم و خشک با دمای متوسط روزانه بین ۳۵ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد، و زمستان‌ها معتدل با دمای بین ۱۰ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد هستند. جهت غالب وزش باد نیز از شمال‌غربی به جنوب‌شرقی بوده که می‌تواند در افزایش میزان تبخیر سطحی تأثیرگذار باشد. وجود شرایط اقلیمی حاد، تابش شدید خورشید، و بادهای غالب در کنار مخزن نسبتاً وسیع و بدون پوشش، این منطقه را به گزینه‌ای مناسب برای ارزیابی عملکرد مواد کاهنده تبخیر در مقیاس نیمه‌صنعتی تبدیل کرده است.

روش تحقیق

به‌منظور ارزیابی عملکرد یک ماده کاهنده تبخیر مبتنی بر ترکیبات سیلیسی، آزمایش‌هایی در مقیاس نیمه‌صنعتی طراحی و اجرا گردید. برای این منظور، از دو حوضچه تبخیر با ابعاد تقریبی ۳*۴ متر استفاده شد که یکی از آن‌ها به‌عنوان حوضچه شاهد و دیگری به‌عنوان حوضچه آزمایش (حاوی ماده کاهنده تبخیر) در نظر گرفته شد. میزان تبخیر در هر دو حوضچه به‌صورت یک روز در میان، در ساعت ۶:۳۰ صبح اندازه‌گیری و ثبت شد. برای اطمینان از دقت داده‌ها، از دو روش مختلف زیر بهره‌گیری گردید.

- اندازه‌گیری دستی با خط‌کش مدرج،
- استفاده از دستگاه فشارسنج دیجیتال،

به‌منظور بررسی اثرات احتمالی ماده سیلیسی بر کیفیت آب، نمونه‌برداری از آب حوضچه‌ها نیز ماهی یک‌بار، در دو عمق ۵۰ و ۱۵۰ سانتی‌متری انجام شد. این نمونه‌ها جهت تحلیل پارامترهای فیزیکی و شیمیایی نظیر رنگ، بو، سیلیس، آمونیوم، نیترات، نیتريت، روغن و چربی، و کلروفیل به آزمایشگاه منتقل گردید.

مراحل اصلی تحقیق به شرح زیر بودند:

- ۱- تعیین و تخصیص دو ناحیه مشابه جهت اجرای پایلوت؛
- ۲- آماده‌سازی و آبیگری حوضچه‌ها؛
- ۳- اعمال ماده کاهنده تبخیر در یکی از آن‌ها؛

۴- نصب و کالیبراسیون تجهیزات اندازه‌گیری تبخیر و کیفیت آب؛

۵- ثبت منظم داده‌های تبخیر در طول دوره مطالعه؛

۶- نمونه‌برداری دوره‌ای از آب حوضچه‌ها و انجام آزمایش‌های کیفی؛

تعیین و تخصیص دو ناحیه مشابه جهت اجرای پایلوت

در این پژوهش، به‌منظور اجرای آزمایش‌های پایلوت، دو ناحیه مشابه از نظر شرایط مکانی، تابش خورشید، جهت وزش باد و فاصله از منابع آب انتخاب شدند تا اثرات محیطی در هر دو ناحیه به حداقل برسد و مقایسه نتایج به‌صورت دقیق‌تری انجام گیرد. این نواحی در محوطه‌ای هموار و بدون پوشش گیاهی در نزدیکی مخزن سد شمیل و نیان تعیین گردیدند. در هر ناحیه، یک حوضچه تبخیر با ابعاد برابر قرار دارد. یکی از حوضچه‌ها به‌عنوان حوضچه شاهد (فاقد ماده کاهنده) و دیگری به‌عنوان حوضچه آزمایش (حاوی ماده کاهنده تبخیر سیلیسی) مورد استفاده قرار گرفت.

آماده‌سازی و آبیگری حوضچه‌ها

پس از انتخاب و تعیین محل دو حوضچه آزمایش، عملیات آماده‌سازی شامل پاک‌سازی کامل کف و دیواره‌ها از خاک، شن، گیاهان هرز و سایر آلودگی‌های سطحی انجام شد. سپس، به‌منظور جلوگیری از نشت آب و تأمین شرایط یکنواخت برای انجام آزمایش‌ها، هر دو حوضچه با پوشش ضد آب (لایه عایق ژئوممبران یا مشابه آن) پوشانده شدند. در مرحله بعد، عملیات آبی‌گیری حوضچه‌ها با استفاده از آب موجود در مخزن سد شمیل و نیان صورت گرفت تا شرایط طبیعی‌تری در حوضچه‌ها برقرار شود.

اعمال ماده کاهنده تبخیر در یکی از حوضچه‌ها

پس از تکمیل مراحل آماده‌سازی و آبی‌گیری، ماده کاهنده تبخیر با پایه سیلیسی^۱ به‌صورت یکنواخت بر سطح یکی از حوضچه‌ها پاشیده شد. هدف از این اقدام، تشکیل یک لایه پیوسته از ماده بر روی سطح آب به‌منظور ایجاد سد فیزیکی و کاهش نرخ تبخیر سطحی بود. عملیات پاشش با دقت بالا و در شرایط جوی آرام و بدون وزش باد انجام گرفت تا پوشش کامل و یکنواختی حاصل شود.

نصب و کالیبراسیون تجهیزات اندازه‌گیری تبخیر و کیفیت آب

برای اندازه‌گیری دقیق میزان تبخیر، از حسگرهای ارتفاع‌سنج آب با دقت بالا استفاده شد. کالیبراسیون این تجهیزات در آزمایشگاه کالیبراسیون سطح‌سنجی مؤسسه تحقیقات آب مطابق با استاندارد 334-IDS-GDL انجام گرفت و صحت نتایج آن مورد تأیید قرار گرفت. پس از کالیبراسیون، دستگاه فشارسنج دیجیتال مطابق دستورالعمل فنی در سطح پهنه آبی حوضچه‌های مورد مطالعه نصب گردید. این دستگاه به همراه دیتالاگر، امکان ثبت منظم تغییرات سطح آب را فراهم ساخت.

ثبت منظم داده‌های تبخیر در طول دوره مطالعه

به‌منظور ارزیابی میزان تبخیر، داده‌ها به‌صورت یک روز در میان و در ساعت ۶:۳۰ صبح به مدت سه ماه با استفاده از خط کش مدرج اندازه‌گیری شد و ثبت گردید. سپس جهت صحت‌سنجی و حصول اطمینان از اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، با دستگاه فشارسنج دیجیتالی چک گردید.

نمونه‌برداری دوره‌ای از آب حوضچه‌ها و انجام آزمایش‌های کیفی

به‌منظور ارزیابی تغییرات کیفی آب در طول دوره مطالعه، نمونه‌برداری دوره‌ای از آب حوضچه‌ها در دو عمق ۵۰ و ۱۵۰ سانتی‌متری انجام شد. در این نمونه‌ها، پارامترهای کیفی مختلفی از جمله رنگ، بو، سیلیکا، آمونیوم، نیترات، نیتريت، روغن و چربی، و کلروفیل مورد آنالیز قرار گرفتند.

نتایج

بررسی میزان تبخیر

باتوجه به ارزیابی نتایج استخراج شده، میزان کاهش تبخیر در حوضچه شاهد (بدون استفاده از ماده کاهنده تبخیر) ۶۲/۸۲ سانتی متر و در حوضچه‌ای که از عامل کاهنده تبخیر نوع سیلیس استفاده کرده‌اند، ۵۳/۴۸ سانتی متر می‌باشد. بر اساس محاسبات صورت گرفته، میزان کاهش تبخیر کاهنده سیلیسی نسبت به حوضچه شاهد در طول دوره بررسی حدود ۱۵ درصد بوده است. این

^۱ ماده تولید شده تحت حمایت مرکز نوآوری و علم آفرینی پیشران

نتایج بیانگر این است که عملکرد عامل کاهنده تبخیر در کاهش میزان تبخیر نسبت به مخزن شاهد مؤثرتر بوده و عامل سیلیس در شرایط نیمه صنعتی توانسته به طور مؤثرتری سطح تماس آب با هوا را محدود کند و فرایند تبخیر را کاهش دهد. روند تغییرات تبخیر در طول دوره نشان داد که میزان کاهش تبخیر کاهنده سیلیسی نسبت به شاهد، در ابتدای دوره آزمایش بیشترین مقدار خود را داشته و در طول دوره، روند رو به کاهشی را دنبال می کند. این موضوع نمایانگر این است که میزان درصد کاهش تبخیر در بازه انتهایی مسیر، روند ثابتی را طی می کند و بدان معناست که طول دوره زمانی مناسبی برای تشخیص و بررسی میزان کاهش تبخیر انتخاب شده است.

اعتبار و صحت سنجی

جهت صحت سنجی و حصول اطمینان از اندازه گیری های صورت گرفته با استفاده از روش دستی، این اعداد با دستگاه فشارسنج دیجیتالی (در یک بازه زمانی از دوره آزمایش) چک گردید.

نتایج نشان داد که، میزان کاهش تبخیر کاهنده سیلیسی نسبت به حوضچه شاهد با استفاده از روش دستی به طور متوسط حدود ۲۳ درصد و با استفاده از روش فشارسنج دیجیتالی به طور متوسط حدود ۲۴ درصد است. این میزان اختلاف کاملاً منطقی است و نشان دهنده درستی و قابل اطمینان بودن اعداد ثبت شده می باشد.

بررسی نتایج کیفی

به منظور بررسی آثار کیفی عامل کاهنده تبخیر در منابع آبی، آزمایش های متعددی بر نمونه های مستخرج از منابع آبی موجود در تحقیق صورت گرفت و همان طور که جدول شماره ۱ قابل مشاهده است، ماده کاهنده تبخیر تاثیر چندانی بر کیفیت آب نداشته و استاندارد آب آشامیدنی را تحقق می بخشد.

جدول ۱. میزان پارامترهای کیفی اندازه گیری شده و مقایسه آن با استاندارد آب آشامیدنی

پارامتر	واحد	شاهد	کاهنده تبخیر	استاندارد ۱۰۵۳
رنگ	T.C.U	بی رنگ	بی رنگ	۱۵
بو	TON	بی بو	بی بو	-
آمونیم	mg/l	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۱/۵
نیترات	mg/l	۱	۰/۸	۵۰
نیتريت	mg/l	۰/۰۰۷	۰/۰۰۸	۳
روغن و چربی	mg/l	۰/۰۲۴	۰/۰۲۸	-
کلروفیل	mg/m ³	۰/۸۸۵	۰/۷۶۸	۵
TDS	mg/l	۱۶۰۴	۱۵۶۵	۱۵۰۰
pH	-	۸/۶	۸/۶۹	۶-۹/۵
TH	mg/l CaCO ₃	۳۸۴	۳۶۸	۵۰۰
قلیائیت کل	mg/l CaCO ₃	۱۳۵	۱۳۰	-
SO ₄ ²⁻	mg/l	۴۴۹	۴۴۵	۴۰۰
Ca ²⁺	mg/l	۸۳/۲	۷۶/۸	۳۰۰
Mg ²⁺	mg/l	۴۲/۲	۴۲/۲	۳۰
Na ⁺	mg/l	۴۱۸	۴۱۸	۲۰۰
Turbidity	NTU	۳	۲	۵

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از عامل کاهنده تبخیر مبتنی بر ترکیبات سیلیسی در مقیاس نیمه صنعتی منجر به کاهش متوسط حدود ۱۵ درصدی تبخیر نسبت به حوضچه شاهد گردید. این میزان کاهش در مقایسه با برخی مطالعات پیشین کمتر، اما

از نظر پایداری عملکرد و شرایط واقعی بهره‌برداری قابل توجه است. به‌عنوان مثال، در مطالعات مربوط به لایه‌های تک‌مولکولی بر پایه الکل‌های چرب، کاهش تبخیر در محدوده ۲۰ تا ۵۰ درصد گزارش شده است (Saggai & Bachi, 2018; Craig et al., 2005). اما این روش‌ها معمولاً با محدودیت‌هایی نظیر ناپایداری در برابر باد، تخریب سریع و نیاز به تجدید مکرر مواجه هستند. در مقابل، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که ماده سیلیسی با وجود راندمان کمتر، از پایداری بیشتری در شرایط محیطی برخوردار است.

همچنین، مقایسه نتایج با مطالعات مربوط به پوشش‌های فیزیکی نشان می‌دهد که این روش‌ها می‌توانند کاهش تبخیر بسیار بالاتری (تا بیش از ۸۰ درصد) ایجاد کنند (Aminzadeh et al., 2018; Taboada et al., 2017)، اما هزینه اجرایی بالا، محدودیت در کاربرد در مخازن بزرگ و مسائل بهره‌برداری از جمله چالش‌های اساسی آن‌ها به شمار می‌رود. در این راستا، عامل سیلیسی مورد بررسی در این پژوهش به‌عنوان یک گزینه میانی، تعادل مناسبی بین کارایی، هزینه و سهولت اجرا فراهم می‌کند. از سوی دیگر، روند کاهش عملکرد ماده در طول زمان که در نتایج مشاهده شد، با یافته‌های سایر پژوهش‌ها نیز همخوانی دارد. این پدیده می‌تواند ناشی از عوامل متعددی نظیر تخریب تدریجی لایه سطحی، اختلاط ناشی از باد، تابش شدید خورشید و تغییرات دمایی باشد (Youssef & Khodzinskaya, 2019). بنابراین، حفظ کارایی این مواد در دوره‌های زمانی طولانی نیازمند بهینه‌سازی فرمولاسیون و یا تجدید دوره‌ای آن‌ها است.

در زمینه اثرات کیفی، نتایج نشان داد که استفاده از ماده سیلیسی تأثیر معناداری بر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب نداشته است، که این موضوع از منظر کاربرد در منابع آب شرب و کشاورزی اهمیت ویژه‌ای دارد. این یافته با نتایج برخی مطالعات پیشین که به بی‌اثر بودن نسبی برخی پوشش‌ها بر کیفیت آب اشاره کرده‌اند همخوانی دارد (Pittaway et al., 2015). با این حال، مشاهده تغییراتی نظیر رشد جلبک و تغییر رنگ آب نشان می‌دهد که بررسی‌های زیست‌محیطی دقیق‌تر، به‌ویژه در مقیاس‌های بزرگ‌تر، ضروری است.

به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اگرچه روش‌های مختلف کاهش تبخیر هر یک دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند، اما استفاده از مواد مبتنی بر ترکیبات معدنی مانند سیلیس می‌تواند به‌عنوان یک راهکار عملی، نسبتاً پایدار و قابل اجرا در مقیاس نیمه‌صنعتی مطرح شود. در عین حال، برای دستیابی به عملکرد بهینه، لازم است مطالعات بیشتری در زمینه بهبود دوام، کاهش اثرات زیست‌محیطی و ارزیابی عملکرد در شرایط اقلیمی مختلف انجام گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که ماده کاهنده تبخیر مورد بررسی (سیلیسی) توانست میزان تبخیر را نسبت به استخر شاهد به میزان بیشتری کاهش دهد. همچنین پس از آزمایش‌های انجام شده بر نمونه‌های مستخرج از حوضچه‌ها، مشاهده شد که استفاده از ماده کاهنده تبخیر سیلیسی تأثیر چندانی بر کیفیت آب ندارد. میزان کاهش تبخیر در حوضچه حاوی ماده کاهنده سیلیسی حدود ۱۵ درصد نسبت به حوضچه شاهد کمتر می‌باشد، که نشان دهنده عملکرد بهتر آن نسبت به آب شاهد است. توصیه می‌گردد، ماده کاهنده سیلیسی به دلیل اثربخشی بالا، پایداری و عدم تأثیر منفی بر کیفیت آب، در منابع روباز وسیع مانند سد‌ها، استخرهای ذخیره کشاورزی و منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور مورد استفاده قرار گیرد.