



بررسی اثر موقعیت نصب پنل‌های خورشیدی شناور بر میزان تبخیر آب

حیدر زیبایی^۱، جلال برادران مطیع^{۲*}، محمد حسین آق‌خانی

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، heidar.zibaei@mail.um.ac.ir

^{۲*} استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، j.baradaran@um.ac.ir

^۳ استاد، گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد، aghkhani@um.ac.ir

چکیده

کاهش منابع آب شیرین و چالش‌های تأمین انرژی، متخصصان را به بهره‌گیری از سیستم‌های فتوولتائیک شناور سوق داده است. تبخیر سالانه از مخازن روباز کشاورزی، بخش قابل توجهی از آب را هدر می‌دهد، در حالی که خنک‌سازی پنل‌های خورشیدی راندمان انرژی را افزایش می‌دهد. این مطالعه تجربی به بررسی تأثیر موقعیت نصب پنل‌های خورشیدی شناور بر تبخیر سطحی آب پرداخته است. چهار مخزن شامل تیمار شاهد (بدون پنل) و سه تیمار با پنل‌های ۲۰ واتی پلی کریستالی در موقعیت‌های غوطه‌ور (۲ سانتی‌متر زیر آب)، مماس بر سطح آب و بالاتر از سطح آب (۸ سانتی‌متری بالاتر از سطح آب) طراحی شد. آزمایش‌ها طی ۲۴ روز (از ۱۵ مرداد تا ۱۵ شهریور ۱۴۰۳) در دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت، با اندازه‌گیری روزانه تبخیر از طریق ترازو دیجیتال و بشر مدرج، و پایش شرایط محیطی (دما، رطوبت، تابش خورشیدی). نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد میانگین تبخیر در تیمار شاهد ۴/۳۹ میلی‌متر بود، در حالی که تیمار مماس بر آب با ۲/۰۹ میلی‌متر (کاهش ۵۲/۴٪) و بالاتر از آب با ۲/۳۸ میلی‌متر (کاهش ۴۵/۸٪) بیشترین کاهش تبخیر را داشتند؛ تیمار غوطه‌ور تنها ۱۵/۷٪ کاهش را نشان داد (۳/۰۷ میلی‌متر). در این پژوهش تفاوت‌ها معنادار بودند ($p < 0.001$). این یافته‌ها، نقش سایه‌اندازی در کاهش تبخیر را تأیید می‌کند و سامانه‌های شناور را به عنوان راهکاری دوگانه برای تولید انرژی پاک و حفظ منابع آب معرفی می‌نماید. این پژوهش، پایه‌ای برای مقیاس‌پذیری فناوری با تأکید بر پایداری تیمار مماس بر آب و کارایی این تیمار در مدیریت منابع آبی در مناطق خشک فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی

پنل خورشیدی شناور، تبخیر سطحی، سیستم فتوولتائیک، مدیریت منابع آب، موقعیت نصب.

*نویسنده مسئول: جلال برادران مطیع، j.baradaran@um.ac.ir



مقدمه

در دهه‌های اخیر، با رشد جمعیت، افزایش نیاز به مواد غذایی و گسترش فعالیت‌های کشاورزی، تقاضا برای منابع آب شیرین نیز به طرز چشمگیری افزایش یافته است [1]. منابع آب سطحی و زیرزمینی، که عمدتاً برای مصارف کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند، با فشار فزاینده‌ای مواجه شده‌اند [2]. در بسیاری از مناطق نیمه‌خشک و خشک جهان - از جمله ایران - کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب، در معرض چالش‌های متعددی نظیر کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، تبخیر بالا، و مصرف بی‌رویه قرار دارد [3]. در این میان، استخرهای ذخیره آب کشاورزی که برای مدیریت منابع آبی و تنظیم زمان‌بندی آبیاری به کار می‌روند، به علت قرار گرفتن در معرض تابش مستقیم خورشید، بخشی قابل توجهی از آب خود را از طریق تبخیر از دست می‌دهند. این پدیده به‌ویژه در فصل‌های گرم سال و در مناطق با تابش خورشید بالا، به یکی از دغدغه‌های اصلی در بهره‌وری منابع آبی تبدیل شده است [4].

تبخیر سطحی یکی از عوامل اصلی اتلاف منابع آب ذخیره‌شده در مخازن روباز است که می‌تواند در برخی مناطق تا بیش از ۳۰٪ از حجم کل آب ذخیره‌شده را شامل شود. این اتلاف در شرایطی اتفاق می‌افتد که بخش عمده‌ای از زمین‌های کشاورزی وابسته به همین منابع برای تأمین آب آبیاری هستند. از سوی دیگر، مدیریت این اتلاف آبی نیازمند راهکارهایی کم‌هزینه، مؤثر و قابل پیاده‌سازی در مقیاس وسیع است. استفاده از پوشش‌های فیزیکی (نظیر گوی‌های پلاستیکی، صفحات شناور، یا نایلون‌های مخصوص) به‌عنوان راه‌حلی برای کاهش تبخیر مطرح شده است، اما هریک از این روش‌ها چالش‌ها و هزینه‌های خاص خود را دارند [5].

در این راستا، بهره‌گیری از پنل‌های فتوولتائیک شناور بر سطح استخرهای ذخیره آب، به‌عنوان راهکاری نوآورانه و چندمنظوره، مورد توجه پژوهشگران و مهندسان قرار گرفته است [6]. این فناوری نه تنها موجب کاهش قابل توجه تبخیر آب از سطح استخرها می‌شود، بلکه امکان تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر برای تأمین برق تجهیزات کشاورزی از جمله چاه‌موتورها و سامانه‌های پمپاژ آب را نیز فراهم می‌آورد. در نتیجه، استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک شناور^۱ (FPV) رویکردی دوگانه در مدیریت منابع آب و انرژی را ممکن می‌سازد.

در سیستم‌های کشاورزی سنتی، برق مورد نیاز برای بهره‌برداری از چاه‌های آب عمدتاً از طریق شبکه سراسری یا موتورهای دیزلی تأمین می‌شود که علاوه بر هزینه بالا، موجب تولید گازهای گلخانه‌ای و وابستگی به منابع فسیلی می‌گردد. با توجه به اهداف توسعه پایدار، کاهش آلاینده‌ها، و نیز بهره‌وری در مصرف انرژی، جایگزینی منابع فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر امری ضروری به نظر می‌رسد. سامانه‌های فتوولتائیک به‌ویژه در مناطق دارای تابش بالا، نظیر بسیاری از مناطق کشاورزی ایران، قابلیت بالایی برای تولید برق دارند. اما در شرایط محیطی گرم، عملکرد پنل‌های خورشیدی به علت افزایش دمای سطح آن‌ها دچار کاهش راندمان می‌شود. در اینجا است که نصب پنل‌ها بر روی سطح آب، با بهره‌گیری از خاصیت خنک‌کنندگی طبیعی آب، موجب کاهش دمای عملکردی سلول‌ها و در نتیجه افزایش راندمان تولید برق می‌گردد [7].

از دیگر مزایای این روش می‌توان به استفاده بهینه از فضاهای بلااستفاده اشاره کرد [8]. در حالی که نصب پنل‌های خورشیدی بر روی زمین به اختصاص دادن زمین کشاورزی یا خرید زمین‌های مجزا نیاز دارد، نصب آن‌ها بر روی استخرها، هزینه زمین را به صفر رسانده و از فضای مرده بهره‌برداری می‌کند. هم‌چنین، کاهش رشد جلبک‌ها در سطح آب به دلیل کاهش نفوذ نور خورشید، کاهش دمای آب و در نتیجه بهبود کیفیت ذخیره‌سازی نیز از دیگر اثرات مثبت این روش است [9].

¹ Floating Photo Voltaic



با توجه به چالش‌های گسترده در حوزه کشاورزی و منابع طبیعی، استفاده از فناوری‌های نوین که به‌طور همزمان به مسائل آب و انرژی پاسخ می‌دهند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ترکیب سامانه‌های فتوولتائیک شناور با استخرهای کشاورزی، نمونه‌ای از این راهکارهای نوآورانه و چندمنظوره است که می‌تواند گامی مؤثر در جهت مدیریت پایدار منابع، کاهش هزینه‌ها، و افزایش بهره‌وری سیستم‌های کشاورزی باشد.

در این پژوهش، تلاش می‌شود با مروری بر اثرات تبخیر سطحی و چالش‌های تأمین انرژی برای چاه‌موتورها، قابلیت‌ها و مزایای کاربرد پنل‌های فتوولتائیک شناور در حوزه کشاورزی بررسی شده و راهکارهای اجرایی برای پیاده‌سازی این فناوری در مقیاس‌های مختلف پیشنهاد گردد. تمرکز بر بررسی هم‌زمان اثرات کاهش تبخیر و افزایش راندمان تولید انرژی، این امکان را فراهم می‌سازد که ارزیابی جامعی از جنبه‌های اقتصادی، فنی و محیط‌زیستی این رویکرد ارائه گردد. نتایج این مطالعه می‌تواند به طراحی بهینه سامانه‌های خورشیدی آبی و مدیریت بهتر منابع آبی کمک کند.

پیشینه پژوهش

پژوهشی توسط تابودا و همکارانش انجام شد که به بررسی عملکرد یک سیستم گرمایش خورشیدی آب در مقیاس آزمایشگاهی پرداختند؛ این سیستم با استفاده از پنل‌های فتوولتائیکی شناور در یک مخزن ذخیره آب توسعه داده شد. هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی تأثیر استفاده از این پوشش‌ها بر روی دو عامل مهم انرژی و منابع آبی بود؛ اول، بهبود بازده حرارتی سیستم گرمایش خورشیدی و دوم، کاهش تبخیر از سطح آب در مخازن بررسی شد. در راستای دستیابی به این اهداف، نویسندگان یک سیستم آزمایشگاهی طراحی و اجرا کردند که شامل یک مخزن آب با حجم مشخص، پنل‌های فتوولتائیکی شناور و سنسورهای اندازه‌گیری دما و تابش خورشیدی بود. متغیرهای مختلفی از جمله دمای سطحی و عمقی آب، شدت تابش خورشیدی، ولتاژ و جریان الکتریکی تولیدی، همچنین میزان تبخیر از سطح آب در دوره‌های زمانی مختلف ثبت و تحلیل شدند. به منظور اعتبارسنجی نتایج، داده‌های تجربی با مدل‌های شبیه‌سازی عددی مقایسه گردیدند. یافته‌های تحقیق نشان دادند که استفاده از پنل‌های فتوولتائیکی شناور ضمن تولید انرژی الکتریکی قابل توجه، باعث کاهش چشمگیر تبخیر از سطح مخزن می‌شود. این کاهش تبخیر ناشی از سایه‌اندازی پنل‌ها و کاهش دمای سطحی آب بود. همچنین، افزایش دمای آب در داخل مخزن به‌خوبی تحت کنترل قرار گرفت و نشان از افزایش بازده حرارتی سیستم داشت. این تحقیق به لحاظ کاربردی می‌تواند الگوی مناسبی برای استفاده همزمان از فناوری‌های انرژی خورشیدی در مدیریت منابع آب و انرژی در مناطق خشک و نیمه خشک باشد. همچنین، این رویکرد از لحاظ علمی گامی مهم در جهت تلفیق سیستم‌های فتوولتائیکی با مدیریت حرارتی و هیدرولوژیکی مخازن آب محسوب می‌شود و زمینه را برای مطالعات گسترده‌تر در مقیاس‌های صنعتی و شهری فراهم می‌کند [10].

در پژوهشی دیگر فرناندو دوس سانتوس و همکاران، یک مطالعه تجربی و کاربردی که به‌صورت سیستماتیک به بررسی تأثیر نصب سیستم‌های فتوولتائیکی شناور بر کاهش نرخ تبخیر از سطح مخازن آب در شرایط اقلیمی منطقه پاسوانا در برزیل پرداختند. این تحقیق در دسته‌بندی علمی، جزو مطالعات تطبیقی و کاربردی در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر و مدیریت منابع آبی قرار گرفت. در این پژوهش، متغیرهای مستقل شامل درصد پوشش سطحی مخزن با پنل‌های فتوولتائیکی، شدت تابش خورشیدی، دمای محیط و دمای سطحی آب در نظر گرفته شدند. متغیرهای وابسته نیز شامل میزان تبخیر آب قبل و بعد از نصب سیستم فتوولتائیکی شناور بود. روش گردآوری داده‌ها مبتنی بر مقایسه‌های آماری و تحلیل‌های همبستگی بین پارامترهای حرارتی و هیدرولوژیکی بود. داده‌ها با استفاده از دستگاه‌های ثبت کننده دما، رطوبت و تابش خورشیدی جمع‌آوری شده و مدل‌سازی آماری با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که با نصب ۱۰۰ متر مربع از پنل‌های فتوولتائیکی شناور، میزان تبخیر آب به طور متوسط تا ۶۰٪



کاهش می‌یابد. این کاهش ناشی از ممانعت از نفوذ مستقیم تابش خورشیدی به سطح آب و کاهش دمای سطحی می‌باشد؛ عواملی که نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش تبخیر دارند. همچنین، تولید الکتریسیته، می‌تواند به عنوان یک منبع انرژی پاک در داخل یا خارج از محل مخزن مورد استفاده قرار گیرد. در بُعد کاربردی، این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های فتوولتائیکی شناور می‌تواند یک راهکار مؤثر در مناطقی با تبخیر بالا و نیازمند حفظ منابع آبی باشد. همچنین، کاهش نفوذ نور خورشیدی به لایه‌های عمیق‌تر آب می‌تواند باعث کنترل رشد جلبکی و بهبود کیفیت آب شود. این رویکرد می‌تواند به عنوان یک مدل انتگرالی در توسعه زیرساخت‌های پایدار شهری و کشاورزی مطرح شود [11].

در یک پژوهش جامع درباره فناوری نیروگاه‌های خورشیدی شناور که با رویکردی علمی و تحلیلی به مزایا، طراحی، عملکرد، چالش‌ها و آینده این نوع سیستم‌ها توسط آلوک ساهاو و همکاران پرداخته شد. این مقاله در سال ۲۰۱۶ منتشر شده و به عنوان یک منبع مرجع برای مطالعات بعدی در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌ویژه کاربرد فتوولتائیک در محیط‌های آبی قرار گرفته است. در این مقاله، نویسندگان با ارائه داده‌های تجربی و مقایسه‌های عملکردی، نشان داده‌اند که سیستم‌های فتوولتائیکی شناور نسبت به سیستم‌های زمینی دارای راندمان بالاتری هستند؛ این موضوع عمدتاً به دلیل خنک‌سازی طبیعی پنل‌ها توسط آب و کاهش دمای کاری سلول‌های فتوولتائیک است. همچنین، استفاده از سطح مخازن، سدها و دریاچه‌ها برای نصب این سیستم‌ها، باعث صرفه‌جویی در زمین‌های کشاورزی و شهری می‌شود و موانع زیست‌محیطی و حقوقی مربوط به اشغال زمین را کاهش می‌دهد. نویسندگان همچنین به مقایسه سیستم فتوولتائیک شناور با انواع دیگر نظیر سیستم‌های نصب‌شده روی بام، زمین و کانال‌های آبی پرداخته‌اند. در این زمینه، مشخص شده است که سیستم‌های شناور می‌توانند تا ۱۳٪ افزایش در راندمان داشته باشند. این بهبود عملکرد ناشی از اثر خنک‌کنندگی آب و کاهش آلودگی سطح پنل‌ها به دلیل وجود قطرات باران و شستشوی طبیعی است. در بخش طراحی و ساختارهای شناور، مقاله به بررسی مواد مورد استفاده، انواع سیستم‌های نگهدارنده^۱ (FP)، نحوه اتصال الکتریکی و انتقال انرژی به شبکه می‌پردازد. همچنین، چالش‌های فنی-اقتصادی این سیستم‌ها مانند مقاومت در برابر شرایط سخت اقلیمی، عمر مفید بلندمدت، هزینه‌های اولیه بالا، نگهداری و تعمیرات مورد تحلیل قرار گرفته است. بر اساس یافته‌ها، هزینه‌های اولیه سیستم‌های فتوولتائیک شناور عموماً بالاتر از سیستم‌های زمینی است، اما با توجه به عملکرد بهتر و کاهش تبخیر، می‌توان این هزینه‌ها را در بلندمدت توجیه کرد. همچنین، این مقاله به جنبه‌های زیست‌محیطی این فناوری پرداخته و برجسته کرده است که سیستم‌های فتوولتائیک شناور می‌توانند ضمن تولید انرژی پاک، به کاهش تبخیر و کنترل رشد جلبک‌ها در مخازن کمک کنند [9]. این دو فاکتور، نقش مهمی در حفظ کیفیت و کمیت منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا می‌کنند. در مجموع، این مقاله یک پایه علمی و تخصصی را برای توسعه فناوری فتوولتائیک شناور در آینده فراهم کرده و ضرورت انجام تحقیقات بیشتر در زمینه بهینه‌سازی طراحی، کاهش هزینه‌ها و گسترش این فناوری در مقیاس‌های بزرگ‌تر را برجسته می‌کند.

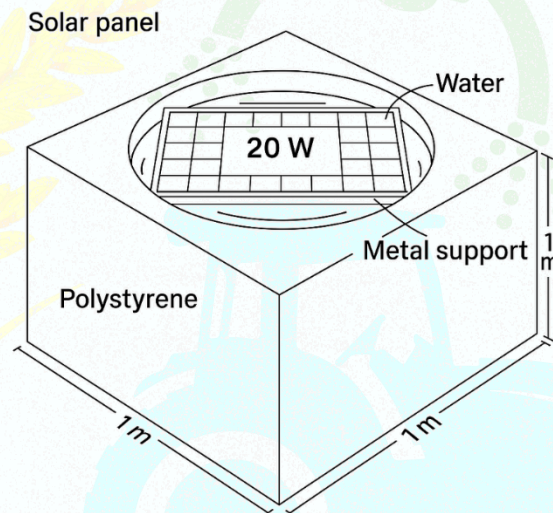
فناوری نیروگاه‌های خورشیدی شناور نقش مهمی در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر دارد و تحقیقات بیشتر برای بهینه‌سازی طراحی و کاهش هزینه‌های آن ضروری است. حمایت‌های سیاست‌گذاری می‌توانند پذیرش گسترده این سیستم‌ها را تسریع کنند و باعث گسترش کاربرد آن در مقیاس‌های بزرگ‌تر شوند. این فناوری با کاهش تبخیر و کنترل رشد جلبک‌ها، می‌تواند به حفظ منابع آبی در مناطق خشک کمک کند و از تأثیرات زیست‌محیطی مخرب جلوگیری نماید [9].

¹ Floating Platforms



مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت یک مطالعه تجربی و آزمایشگاهی در مرداد و شهریور ماه ۱۴۰۳ در دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی شهر مشهد انجام شده است. شهر مشهد، در مرکز استان خراسان رضوی در شمال شرقی ایران واقع شده است، بین عرض‌های جغرافیایی $36^{\circ}11'N$ (عرض جغرافیایی 36° درجه و $11'$ دقیقه شمالی) تا $36^{\circ}36'N$ (عرض جغرافیایی 36° درجه و $36'$ دقیقه شمالی)، و طول‌های جغرافیایی $59^{\circ}27'E$ (طول جغرافیایی 59° درجه و $27'$ دقیقه شرقی) تا $59^{\circ}42'E$ (طول جغرافیایی 59° درجه و $42'$ دقیقه شرقی) قرار دارد. این پژوهش طراحی شد تا تأثیر موقعیت نصب پنل‌های خورشیدی بر میزان تبخیر سطحی آب بررسی گردد. برای اجرای آزمایش‌ها، چهار عدد مخزن پلاستیکی به ابعاد $30 \times 65 \times 79$ سانتی‌متر به عنوان مخزن‌های آزمایش در نظر گرفته شد. از آنجا که فرض اولیه بر اندازه‌گیری تبخیر سطحی و بررسی اثر تابش خورشید بر سطح آب بنا شده بود، جهت کاهش تأثیر تابش جانبی خورشید بر بدنه مخازن، از چهار عدد مکعب پلی‌استایرن (یونولیت) به ابعاد اولیه $1 \times 1 \times 1$ متر استفاده گردید. پس از خالی کردن بخش مرکزی، به عنوان حفاظ جانبی برای مخزن‌ها عمل کردند تا اثر تابش مستقیم نور خورشید به دیواره‌های مخزن و افزایش دمای جانبی را به حداقل برسانند.



شکل ۱) مخزن آب نصب شده درون مکعب پلی‌استایرن

به منظور پایش دقیق تغییرات سطح آب، ارتفاع اولیه آب در هر مخزن در چهار نقطه علامت‌گذاری شد. هم‌چنین برای افزایش دقت اندازه‌گیری، چهار پایه شاخص مدرج (از جنس فلز سخت) در هر مخزن نصب گردید تا امکان پایش دقیق و هم‌راستایی با علامت‌های اولیه فراهم گردد. سه پایه نگهدارنده (استند) با ارتفاع‌های متفاوت برای استقرار پنل‌های خورشیدی طراحی و ساخته شد. این پایه‌های نگهدارنده برای قرارگیری پنل‌های فتوولتائیک در مخزن‌ها تهیه شدند. در سه مخزن، پنل‌های خورشیدی پلی‌کریستالی ۲۰ واتی Zytech Solar ZT-20P ساخت کشور چین در موقعیت‌های مختلف قرار گرفتند، این پنل‌ها با اتصال به مدار الکتریکی کاملاً مشابه (لامپ‌های رشته‌ای ۲۰ وات) تحت بار قرار داشتند لذا عبور جریان الکتریکی موجب تغییر دمای پنل‌ها نیز می‌شد.

تیمارهای نصب پنل‌ها:

۱. پنل خورشیدی کاملاً غوطه‌ور در آب (تیمار اول) - دو سانتی‌متر زیر آب. این تیمار با توجه به بررسی اثر مستغرق بودن پنل بر دمای کارکرد آن انتخاب شده است. اثر موقعیت نصب بر دمای پنل‌ها در مقاله دیگری بررسی شده است.
۲. پنل خورشیدی مماس بر سطح آب (تیمار دوم)



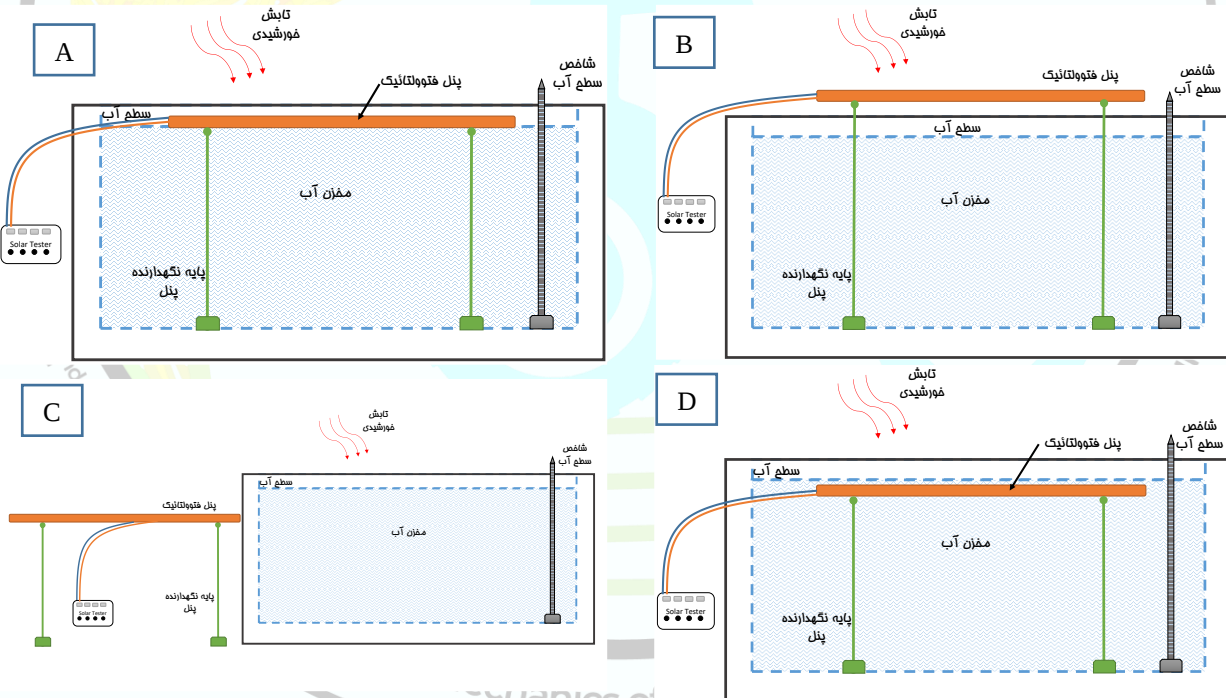
۳. پنل خورشیدی بالای آب، در ارتفاع حدود ۸ سانتی‌متری بالاتر از سطح آب (تیمار سوم)

۴. مخزن بدون پنل، به‌عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شد.

جدول (۱) مشخصات فنی پنل‌های فتوولتائیک پلی کریستال Zytech Solar ZT-20P

پارامتر	نماد	مقدار
توان نامی	P_m (Wp)	۲۰
ولتاژ مدار باز	V_{oc} (V)	۲۱/۹۶
جریان اتصال کوتاه	I_{sc} (A)	۱/۱۷
ولتاژ در حداکثر توان	V_{mp} (V)	۱۸/۲۵
جریان در حداکثر توان	I_{mp} (A)	۱/۱
راندمان ماژول	(%)	۱۱/۰۵
راندمان سلول‌ها	(%)	۱۶/۱۰

جهت هم‌راستایی با جهت تابش خورشید در نیمکره شمالی، تمامی پنل‌های خورشیدی به‌صورت افقی و با جهت‌گیری به سمت جنوب مستقر شدند، اگرچه زاویه تمایل آن‌ها نسبت به سطح افقی صفر در نظر گرفته شد.



شکل (۲) قرارگیری پنل‌ها و پایه‌های نگهدارنده در مخزن‌ها A: پنل مماس بر آب، B: پنل بالاتر از سطح آب، C: پنل زیر سطح آب، D: تیمار شاهد مخزن بدون پنل.



آزمایش‌ها طی یک دوره یک ماهه در فصل تابستان ۱۴۰۳ از ۱۵ مرداد الی ۱۵ شهریور ماه به‌طور روزانه از ساعت ۸ صبح تا ۱۴ بعدازظهر انجام شد. در ابتدای هر روز، مخزن‌ها با آب پر شده و ارتفاع آب و حجم آب درون مخازن ثبت گردید. در پایان هر روز، به‌منظور تعیین میزان تبخیر، از یک ترازو دیجیتال FX-3000iWP ساخت کشور ژاپن با دقت ۰/۰۱ گرم و یک بشر پلاستیکی مدرج به حجم ۱۰۰۰ میلی‌لیتر با دقت ۱ میلی‌لیتر استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری آب تبخیر شده، حجم آب مورد نیاز برای پر کردن هر مخزن و رساندن سطح آب تا محل شاخص اولیه اندازه‌گیری گردید. ابتدا وزن خالی بشر ثبت و سپس با آب پر گردید. پس از وزن‌کشی مجدد، آب به‌طور تدریجی به هر مخزن افزوده شد تا سطح آب به نقطه علامت‌گذاری اولیه بازگردد. اختلاف جرم آب اضافه‌شده به هر مخزن، به‌عنوان شاخص میزان تبخیر روزانه ثبت گردید.



شکل (۳) سمت راست ترازو FX-3000iWP با دقت ۰/۰۱ گرم، سمت چپ بشر ۱۰۰۰ میلی‌لیتر

برای پایش شرایط محیطی (دمای هوای محیط و رطوبت نسبی هوا)، از یک دماسنج و رطوبت‌سنج مدل Lutron HT3027SD ساخت کشور تایوان استفاده شد. این دستگاه محدوده دما: ۵۰ - ۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت: ۵٪ - ۹۵٪ R.H و نقطه شبنم: ۲۵/۳ - تا ۴۸/۹ درجه سانتی‌گراد را با دقت: ۰/۰۱٪ RH و ۰/۰۱ درجه اندازه‌گیری می‌کند هم‌چنین داده‌های مربوط به شدت تابش روزانه نیز ثبت گردید. این داده‌ها به‌طور همزمان در ساعات اندازه‌گیری ثبت گردید. بشر ۱۰۰۰ میلی‌متر هم با دقت یک میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت.



شکل (۴) دماسنج و رطوبت‌سنج مدل Lutron HT3027SD

داده‌های حاصل به صورت روزانه ثبت شد و به‌منظور تحلیل آماری، در نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۷) وارد گردید. پس از بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون شاپیرو-ویلک، با توجه به عدم نرمالیتی داده‌ها و نابرابری واریانس‌ها، روش ناپارامتریک Kruskal-Wallis H Test به‌عنوان روش اصلی برای مقایسه نرخ تبخیر بین چهار مخزن انتخاب شد. این روش، که بر اساس رتبه‌بندی مشاهدات عمل می‌کند، نیازی به فرض نرمالیتی یا همگنی واریانس‌ها ندارد و برای داده‌های غیرنرمال مناسب است [12]. برای بررسی دقیق‌تر تفاوت‌های زوجی بین مخازن، از آزمون ناپارامتریک Mann-Whitney U به‌عنوان آزمون پسین استفاده شد. این آزمون، که برای مقایسه دو گروه مستقل طراحی شده، به شناسایی زوج‌هایی با تفاوت معنی‌دار ($p\text{-value} < 0.01$) کمک کرد.



برای محاسبه میزان آب تبخیر شده در هر مخزن، ابتدا جرم آب اضافه شده (بر حسب گرم) با استفاده از ترازو اندازه‌گیری شد. که در آن m آب اضافه شده در پایان روز (گرم) بود و w_1 وزن بشر و w_2 وزن آب اندازه‌گیری شده با بشر می‌باشد. حجم آب اضافه شده با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید که در آن ρ چگالی آب بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد و v حجم آب (سانتی‌متر مکعب) می‌باشد. سپس ارتفاع ستون آب تبخیر شده (بر حسب سانتی‌متر) از طریق رابطه (۳) تعیین گردید که در آن h ارتفاع ستون آب (سانتی‌متر) بود و A مساحت سطح افقی (سانتی‌متر مربع) مخزن بود. برای محاسبه ارتفاع سطح آب فرمول شماره (۴) استفاده می‌شود برای محاسبه مساحت سطح افقی مخزن از فرمول شماره ۵ استفاده می‌شود که در آن a و b به ترتیب شعاع کوچک و شعاع بزرگ مخزن می‌باشد.

$$m = w_2 - w_1 \quad (1)$$

$$v = \frac{m}{\rho} \quad (2)$$

$$v = h \times A, A = \pi \times a \times b \quad (3)$$

$$h = \frac{v}{A} = \frac{m}{\rho A} \quad (4)$$

نتایج

نتایج آمار توصیفی مقادیر تبخیر روزانه برای هر یک از تیمارها در جدول ۲ ارائه شده است. میانگین تبخیر روزانه در تیمار شاهد برابر با ۴/۳۹ میلی‌متر بود که بالاترین مقدار در میان تیمارها محسوب می‌شود. در تیمار پنل زیر آب، میزان تبخیر ۳/۰۷ میلی‌متر مشاهده شد. تیمار پنل مماس بر آب کمترین میزان تبخیر را با ۲/۰۹ میلی‌متر نشان داد، در حالی که تیمار پنل بالاتر از آب میزان تبخیر برابر با ۳۸/۲ میلی‌متر داشت. میزان کلی تبخیر برای تمام تیمارها ۳/۱۴ میلی‌متر بود.

جدول ۲) آمار توصیفی مقادیر تبخیر روزانه هر یک از تیمارها (میلی متر)

موقعیت	میانگین تبخیر	تعداد	Std. Deviation
شاهد	۴/۳۹	۲۴	۰/۴۷
پنل زیر آب	۳/۷۰	۲۴	۰/۷۲
پنل مماس بر آب	۲/۰۹	۲۴	۰/۳۹
پنل بالاتر از آب	۲/۳۸	۲۴	۰/۵۱
کل	۳/۱۴	۹۶	۱/۰۸

برای بررسی تفاوت‌های آماری میان تیمارها، از آزمون ناپارامتری Kruskal-Wallis H استفاده شد. نتایج این آزمون در جدول ۳ نشان‌دهنده تفاوت معنادار میان تیمارها می‌باشد ($H = 69/792$ ، درجه آزادی = ۳، $p < 0.001$). میانگین رتبه‌های به‌دست‌آمده از این آزمون در جدول ۴ ارائه شده است، که تیمار شاهد بالاترین رتبه (۷۸/۹۲) را داشته و نشان‌دهنده بیشترین نرخ تبخیر می‌باشد، در حالی که تیمار پنل مماس بر آب کمترین رتبه (۲۰/۸۵) را داشت.



جدول (۳) نتایج آزمون Kruskal-Wallis H بین تیمار شاهد و سایر تیمارهای نصب پنل

آمار تست	مقدار	درجه آزادی	p-value
Kruskal-Wallis H	۶۹/۷۹۲	۳	<۰/۰۰۱

جدول (۴) نتایج آزمون Kruskal-Wallis H بین تیمار شاهد و سایر تیمارهای نصب پنل

موقعیت نصب	تعداد	میانگین رتبه (از Kruskal-Wallis)
شاهد	۲۴	۷۸/۹۲
پنل زیر آب	۲۴	۶۳/۹
پنل مماس آب	۲۴	۲۰/۸۵
پنل بالاتر از آب	۲۴	۳۰/۳۳
کل	۹۶	

برای مقایسه دوبه‌دو تیمارها با تیمار شاهد، از آزمون Mann-Whitney استفاده شد (جدول ۵). نتایج نشان داد که تفاوت میان تیمار شاهد و پنل زیر آب ($p = 0.001$, $U = 130$)، شاهد و پنل مماس بر آب ($p < 0.001$, $U = 0$)، و شاهد و پنل بالاتر از آب ($U = 4$)، همگی معنادار هستند، که بیانگر کاهش قابل توجه تبخیر در تیمارهای نصب پنل نسبت به شاهد می‌باشد.

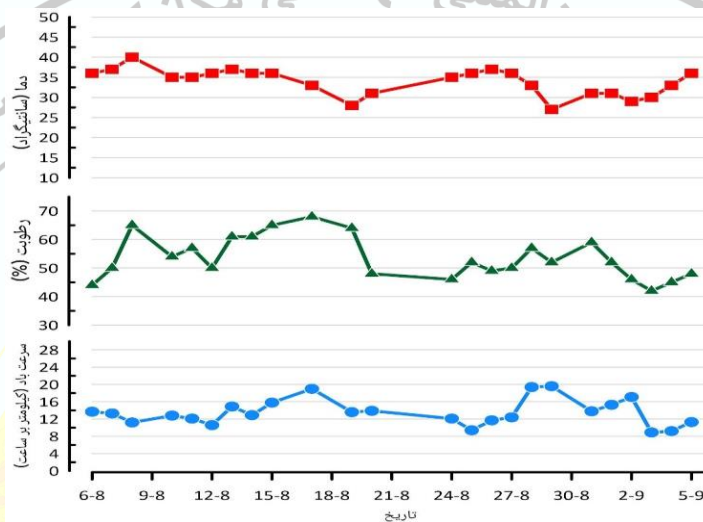
جدول (۵) نتایج مقایسه میانگین و آزمون Mann-Whitney بین تیمار شاهد و سایر تیمارهای نصب پنل

مقایسه گروه‌ها	Mann-Whitney	(p-value)
شاهد × زیر آب	۱۳۰	۰/۰۰۱
شاهد × مماس بر آب	۰	<۰/۰۰۱
شاهد × بالای سطح از آب	۴	<۰/۰۰۱

نمودارها و تصاویر ارائه‌شده در متن، به صورت بصری نشان‌دهنده با توصیف‌کننده تغییرات نرخ تبخیر در طول زمان یا بین تیمارهای مختلف هستند. شکل ۷ میزان تبخیر و خطاهای استاندارد را برای هر تیمار نشان می‌دهد، که کاهش واضح تبخیر در تیمارهای پنل‌دار نسبت به شاهد را تأیید می‌کند. شکل ۶ (نمودار خطی) تغییرات روزانه تبخیر را در طول دوره آزمایش (از ۱۵ مرداد تا ۱۵ شهریور) برای چهار تیمار نمایش می‌دهد. تیمار پنل مماس بر آب در اغلب روزها کمترین تبخیر را داشته، تیمار پنل مماس بر آب نوسانات کمتری نشان داده و پایدارتر عمل کرده است. تیمار پنل زیر آب در برخی روزها تبخیر بالاتری نسبت به تیمار مماس بر آب داشت. شکل سوم روندهای جداگانه برای تیمارها را نشان می‌دهد، که الگوهای نوسانی مشابهی را در تبخیر روزانه برجسته می‌کند. تیمار شاهد (مخزن بدون پنل) بیشترین میانگین را دارد و دارای پراکندگی متوسطی است. این نشان‌دهنده نرخ تبخیر بالا و نسبتاً پایدار است.

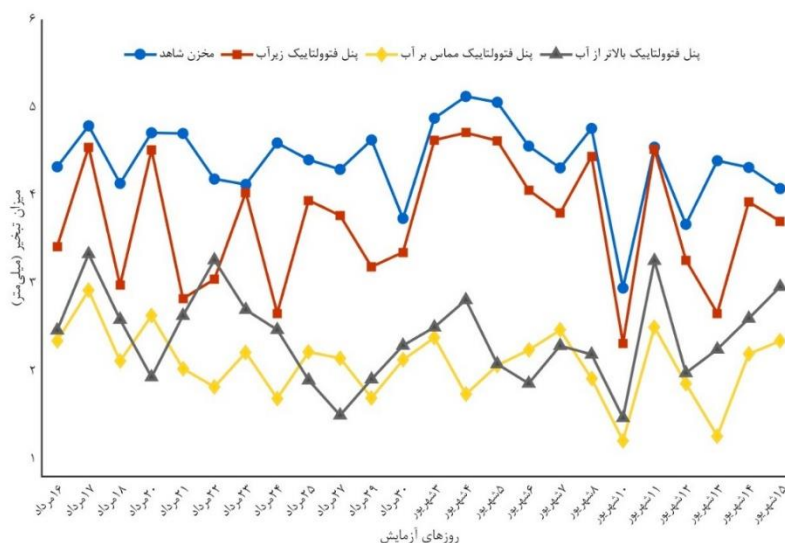


۱. تیمار پنل مماس بر آب دارای کمترین میزان تبخیر را دارد و نسبت به دیگر موقعیت‌های نصب مقدار تبخیر پایین‌تری را نشان می‌دهد.
۲. تیمار پنل زیر لایه ای از آب دارای بیشترین پراکندگی (واریانس) است و نشان می‌دهد که نوسانات زیادی در این روش مشاهده شده است.

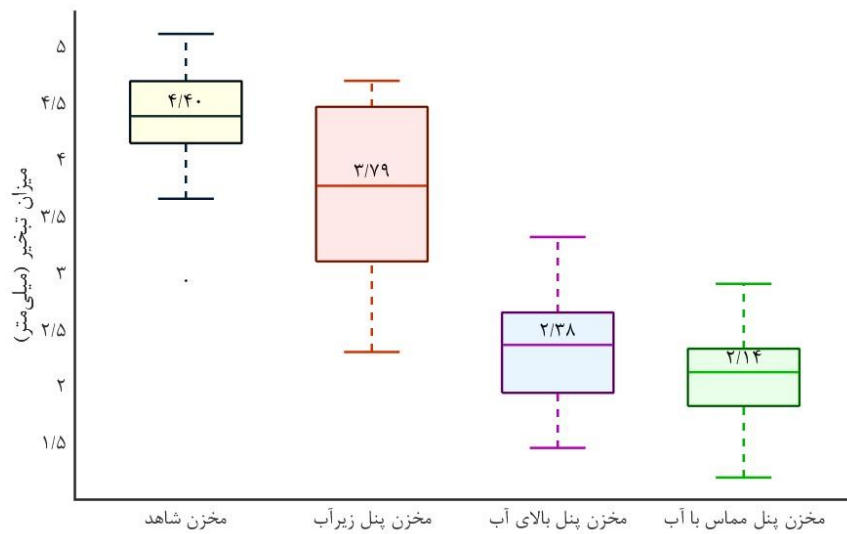


شکل ۵) روند تغییرات داده‌های محیط آزمایش (دما، رطوبت هوا، سرعت باد) که در محل اندازه‌گیری شده‌اند. محور افقی تاریخ انجام آزمایشات را به میلادی نشان می‌دهد (معادل با ۱۶ مرداد الی ۱۵ شهریور) شهر مشهد.

شکل ۶) روند تغییرات تبخیر روزانه در چهار تیمار را نشان می‌دهد که در تمامی روزهای آزمایش، تیمار "بالای آب" کمترین میزان تبخیر را داشته است. همچنین، تیمار "پنل مماس بر آب" نوسانات کمتری نسبت به دیگر تیمارها نشان داده و به لحاظ عملکردی پایدارتر بوده است. تیمار "زیر آب" در برخی روزها حتی میزان تبخیر بالاتری نسبت به تیمار "مماس بر آب" داشته است.



شکل ۶) تغییرات میزان تبخیر اندازه‌گیری شده هر یک از تیمارها در طول بازه یک ماهه آزمایشات



شکل ۷) نمودار جعبه ای میزان تبخیر تیمارهای آزمایشی.

بحث

نتایج این مطالعه نشان‌دهنده تأثیر مثبت نصب پنل‌های خورشیدی در موقعیت‌های مختلف بر کاهش نرخ تبخیر آب می‌باشد، که با مطالعات قبلی در زمینه پوشش‌های شناور و سایه‌اندازها همخوانی دارد. میانگین تبخیر در تیمار شاهد (۴/۳۹ میلی‌متر) به عنوان پایه، بالاتر از تمام تیمارهای پنل‌دار بود، که این امر کاهش تبخیر تا حدود ۵۲٪ در تیمار مماس بر آب (۲/۰۹ میلی‌متر) و ۴۶٪ در تیمار بالاتر از آب (۲/۳۸ میلی‌متر) را نشان می‌دهد. این کاهش می‌تواند به دلیل سایه‌اندازی پنل‌ها، کاهش دمای سطح آب و اختلال در جریان باد باشد.

آزمون Kruskal-Wallis H تفاوت‌های معنادار میان تیمارها را تأیید کرد ($p < 0.001$)، که بیانگر آن است که موقعیت نصب پنل تأثیر قابل توجهی بر نرخ تبخیر دارد. رتبه‌بندی تیمارها نشان داد که تیمار مماس بر آب بیشترین کاهش را ایجاد کرده، احتمالاً به دلیل تماس مستقیم با سطح آب که تبادل حرارتی را بهینه می‌کند و تبخیر را مهار می‌نماید. در مقابل، تیمار زیر آب با میانگین ۳/۰۷ میلی‌متر، کاهش کمتری (حدود ۱۶٪) نسبت به شاهد نشان داد، که ممکن است به دلیل افزایش رسانایی حرارتی در زیر آب و انتقال گرما از پنل به آب باشد، منجر به تبخیر بیشتر در برخی روزها شود.

مقایسه‌های دوبه‌دو با آزمون Mann-Whitney تفاوت‌های معنادار را بین شاهد و تمام تیمارها نشان داد ($p \leq 0.001$)، که بر کارایی همه موقعیت‌های نصب پنل تأکید دارد. با این حال، تیمار پنل مماس بر آب و بالاتر از آب از لحاظ میزان کاهش تبخیر برتر بودند، که می‌تواند برای کاربردهای عملی مانند مخازن آبیاری یا نیروگاه‌های خورشیدی شناور مفید باشد. روندهای روزانه در شکل ۶ نوسانات را برجسته می‌کند؛ پایداری تیمار مماس بر آب ممکن است به دلیل تعادل بهتر در جلوگیری از تبخیر بدون ایجاد گرمای اضافی، باشد.

این یافته‌ها با نتایج قبلی از جمله تحقیقات تابودا و همکاران [10] و سانتوس و همکاران [11] همخوانی دارد که نشان دادند سایه‌اندازی پنل‌های خورشیدی شناور و کاهش دمای سطحی آب نقش مهمی در کاهش تبخیر دارد. علاوه بر این، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نحوه قرارگیری پنل نیز تأثیر مستقیمی بر میزان کاهش تبخیر دارد. بر اساس نتایج آماری و تحلیل‌های انجام‌شده، فرضیه اصلی این پژوهش مبنی بر اینکه پنل‌های خورشیدی شناور می‌توانند تبخیر از سطح آب را کاهش دهند به‌خوبی تأیید شد. این موضوع اهمیت زیادی در توسعه فناوری فتوولتائیک شناور در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد که حفظ منابع آبی در کنار تولید انرژی پاک اولویت دارد.



در مجموع، نتایج این مطالعه می‌تواند زمینه را برای طراحی بهینه سامانه‌های خورشیدی شناور در مقیاس‌های بزرگ‌تر فراهم کند. این نوع سیستم‌ها می‌توانند به‌عنوان یک راهکار دومنظوره (تولید انرژی و کاهش تبخیر) در مدیریت منابع آب و انرژی مورد استفاده قرار گیرند. تحقیقات آینده می‌تواند به بررسی بلندمدت این سیستم‌ها، ارزیابی عمر مفید پنل‌ها در محیط‌های آبی و تأثیرات زیست‌محیطی اضافی آن‌ها بپردازد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از پنل‌های خورشیدی در موقعیت‌های مختلف (زیر آب، مماس بر آب، و بالاتر از آب) تأثیر معناداری در کاهش نرخ تبخیر آب دارد، به‌طوری‌که تیمارهای مماس بر آب و بالاتر از آب به ترتیب با کاهش ۵۲٪ و ۴۶٪ نسبت به تیمار شاهد، کارایی و اثر قابل توجهی از خود نشان دادند. پایداری عملکردی تیمار مماس بر آب و کمترین میزان تبخیر در این تیمار، این روش‌ها را به گزینه‌ای نویدبخش برای مدیریت منابع آبی در مناطق خشک و ادغام با تولید انرژی تجدیدپذیر تبدیل می‌کند. این یافته‌ها پتانسیل بالایی برای حمایت از اهداف توسعه پایدار از طریق حفاظت از منابع آب و بهره‌وری انرژی ارائه می‌دهند. در مجموع، نتایج این مطالعه می‌تواند زمینه را برای طراحی بهینه سامانه‌های خورشیدی شناور در مقیاس‌های بزرگ‌تر فراهم کند. این نوع سیستم‌ها می‌توانند به‌عنوان یک راهکار دومنظوره (افزایش تولید انرژی و کاهش تبخیر) در مدیریت منابع آب و انرژی مورد استفاده قرار گیرند. تحقیقات آینده می‌تواند به بررسی بلندمدت این سیستم‌ها، ارزیابی عمر مفید پنل‌ها در محیط‌های آبی و تأثیرات زیست‌محیطی اضافی آن‌ها بپردازد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش تحت حمایت قرارداد پژوهشی شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی با قرارداد (KOSW3-03002) مورخ ۱۴۰۳/۱۰/۲۳ و دانشگاه فردوسی مشهد، می‌باشد که بدین وسیله از همراهی و حمایت‌های صورت گرفته تقدیر به عمل می‌آید.

منابع

- [1] Tony Fujisharuna and Haruna Kashiwase, "Strains on freshwater resources: The impact of food production on water consumption," p. 2019, 2023, Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: https://blogs.worldbank.org/en/opendata/strains-freshwater-resources-impact-food-production-water-consumption?utm_source=chatgpt.com
- [2] T. Tabler, E. P. Specialist, J. Chibanga, and S. O. Nutrition, "WATER SCARCITY IN AGRICULTURE: THE GREATEST THREAT TO GLOBAL," 2023.
- [3] B. Lankford, C. Pringle, J. McCosh, M. Shabalala, T. Hess, and J. W. Knox, "Irrigation area, efficiency and water storage mediate the drought resilience of irrigated agriculture in a semi-arid catchment," *Sci. Total Environ.*, vol. 859, p. 160263, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160263>.
- [4] B. Mady, P. Lehmann, S. M. Gorelick, and D. Or, "LETTER • OPEN ACCESS' Distribution of small seasonal reservoirs in semi-arid regions and associated evaporative losses," *Environ. Res. Commun.*, vol. 2, p. 61002, 2020, doi: [10.1088/2515-7620/ab92af](https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab92af).
- [5] P. Lehmann, M. Aminzadeh, and D. Or, "Evaporation Suppression From Water Bodies Using Floating Covers: Laboratory Studies of Cover Type, Wind, and Radiation Effects," *Water Resour. Res.*, vol. 55, no. 6, pp. 4839–4853, 2019, doi: [10.1029/2018WR024489](https://doi.org/10.1029/2018WR024489).
- [6] P. G. Nikhil and M. Premalatha, "Performance enhancement of solar module by cooling: An experimental investigation," *Int. J. Energy Environ.*, vol. 3, no. 1, pp. 73–82, 2012, [Online]. Available: www.IJEE.IEEFoundation.org



- [7] H. M. Pouran, M. Padilha Campos Lopes, T. Nogueira, D. Alves Castelo Branco, and Y. Sheng, "Environmental and technical impacts of floating photovoltaic plants as an emerging clean energy technology.," *iScience*, vol. 25, no. 11, p. 105253, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.isci.2022.105253.
- [8] Y. Sahu, M. Shahabuddin, and P. Agrawal, "Floating solar photovoltaic system an emerging technology," in *National Seminar on the Prospects and Challenges of the Electrical Power Industry in India*, 2015, pp. 219–227.
- [9] A. Sahu, N. Yadav, and K. Sudhakar, "Floating photovoltaic power plant: A review," *Renew. Sustain. energy Rev.*, vol. 66, pp. 815–824, 2016.
- [10] R.- Senseobraderivada and C. Commons, "Document downloaded from : The final publication is available at :," no. c, pp. 0–19, 2013.
- [11] F. R. dos Santos, G. K. Wiecheteck, J. S. das Virgens Filho, G. A. Carranza, T. L. Chambers, and A. Fekih, "Effects of a Floating Photovoltaic System on the Water Evaporation Rate in the Passauna Reservoir, Brazil," *Energies*, vol. 15, no. 17, 2022, doi: 10.3390/en15176274.
- [12] P. E. McKight and J. Najab, "Kruskal-wallis test," *corsini Encycl. Psychol.*, p. 1, 2010.



Investigating the effect of the installation position of floating solar panels on the rate of water evaporation

Heidar Zibaei¹, Jalal Baradaran Motie^{2*}, Mohammad Hossein Aghkhani³

1. MSc Student, Biosystems engineering, Ferdowsi university of Mashhad. heidar.zibaei@mail.um.ac.ir
2. Assistant prof. Dept. of Biosystems engineering, Ferdowsi university of Mashhad. j.baradaran@um.ac.ir
3. Professor, Dept. of Biosystems engineering, Ferdowsi university of Mashhad. aghkhani@um.ac.ir

Abstract

Reducing freshwater resources and energy supply challenges have led experts to use floating photovoltaic (PV) systems. Annual evaporation from agricultural open tanks wastes a significant portion of the water, while cooling solar panels increases energy efficiency. This experimental study examines the effect of the installation position of floating solar panels on surface evaporation of water. Four tanks were designed including witness treatment (without panels) and three with 20-watt polycrystalline panels in submerged positions (2 cm underwater), tangent to the surface and above the surface (8 cm above the water surface). The tests were carried out in 24 days (from 15 March to 15 September 1403) at the University of Ferdowsi in Mashhad, with daily measurement of evaporation through digital and human scales, and monitoring of environmental conditions (temperature, humidity, solar radiation). The data was analyzed with the Kruskal-Wallis H and Mann-Whitney nonparametric tests in SPSS. The results showed that the average evaporation in the treatment witnessed 4.39 mm, while the water-tangent treatment with 2.09 mm (decrease of 52.4%) and above the water with 2.38 mm (decrease of 45.8%) had the highest decrease in evaporation; the immersion treatment showed only a decrease of 15.7% (3.07 mm). The differences were meaningful ($p < 0.001$). These findings confirm the role of shading and wind flow disruption in reducing evaporation and present floating systems as dual solutions for clean energy production and water conservation. This research provides a basis for technology scalability, emphasizing the sustainability of Tangent treatment on water and the efficiency of this treatment in managing water resources in dry areas. Future research can examine long-term and economic impacts.

Keywords

Floating solar panel, Installation position, Photovoltaic system, Water evaporation, Water resources management

*Corresponding author: Jalal Baradaran Motie, j.baradaran@um.ac.ir