Research Article

Agricultural Engineering., 49(2) (2026) 195- 214

DOI: 10.22055/AGEN.2026.52157.1811

ISSN (P): 2588-526X

ISSN (E): 2588-5944

Experimental evaluation of the effect of the installation position of floating photovoltaic panels on reducing evaporation from water resources

H. Zibaei[1], J. Baradaran Motie[2]*, M. H. Aghkhani[3] and A. Shahabi[4]

1. MSc Student, Biosystems engineering, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran
2. Assistant prof., Dept. of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3. Professor, Dept. of Biosystems engineering, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran
4. PhD student in Water and Hydraulic Structures, Dam and Network Design Study Group, Khorasan Razavi Regional Water Company, Mashhad, Iran

Received: 23 May 2026 Accepted: 27 August 2026 *Corresponding Author: j.baradaran@um.ac.ir

Abstract

Introduction: Evaporation from open water surfaces is a primary cause of water resource depletion in arid and semi-arid regions, sometimes resulting in the loss of over 50 percent of annual water reserves. Iran, characterized predominantly by an arid to semi-arid climate, is significantly affected by this phenomenon; reports indicate that between 2003 and 2019, the country lost approximately 211 cubic kilometers of its total water reserves—an amount exceeding twice the nation's annual water consumption. Agricultural ponds and reservoirs are particularly vulnerable to such losses due to constant exposure to direct sunlight; indeed, annual evaporation from small agricultural ponds in the Middle East is estimated to exceed 2,400 million cubic meters. Exacerbating this challenge is the fact that nearly 47.8 percent of the country's irrigation pumps still operate on diesel engines, which—in addition to high operating costs—result in significant greenhouse gas emissions. Floating photovoltaic (FPV) systems have emerged as a dual-purpose technology capable of simultaneously reducing surface evaporation and generating clean electricity to power well motors and irrigation pumps. Although previous studies have reported significant evaporation reduction through the use of floating photovoltaic covers—ranging from approximately 40% to over 90%, depending on the coverage extent and layout—the precise impact of panel installation positioning (submerged, flush with the water surface, or elevated above the water) on evaporation reduction in arid climates has not been systematically investigated. In addition to evaporation reduction, the electrical efficiency of the panels under each installation configuration was evaluated as a complementary finding. The present study was designed and conducted to address this knowledge gap.

Materials and Methods: This experimental study was conducted during the summer of 2024 (August 6 to September 5) at the Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, located in the arid climate of northeastern Iran. Four identical tanks (65 × 79 × 30 cm) were each placed inside a 1 × 1 × 1 m polystyrene enclosure to eliminate the effect of lateral solar radiation on the tank walls. Four treatments were defined: a control tank without a panel; a panel submerged 2 cm below the water surface; a panel flush with the water surface; and a panel positioned 8 cm above the water surface. Four identical 20-watt polycrystalline panels (model Zytech Solar ZT-20P, labeled A through D) were installed horizontally, facing south with a zero-

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

degree tilt angle. To account for panel-specific effects, the positions of the panels were rotated every three days between treatments, resulting in six independent replicates for each treatment. Each panel was connected to an identical resistive circuit—consisting of a 20-watt incandescent bulb—to simulate actual operating temperature conditions. The voltage and current of each panel were measured individually and in immediate succession using a Victor VC97 digital multimeter, with the panel connected to an identical 20-watt incandescent lamp (acting as a resistive load). Voltage was measured across the load, while current was measured in series within the circuit. Electrical output power was calculated using the equation $P = V \times I$. Subsequently, electrical conversion efficiency was calculated using the formula $\eta = [P/(G \times A)] \times 100$, where P is the measured electrical output power, G is the solar irradiance at the time of measurement, and A is the effective area of the panel. where G represents solar irradiance (derived from the PVGIS database) and A is the effective area of the panel. Daily evaporation rates were measured using a digital scale (model FX-3000iWP, precision ±0.01 g) and a 1000 mL graduated beaker, while environmental parameters—including air temperature, relative humidity, and solar radiation intensity—were simultaneously recorded using a Lutron HT-3027SD data logger and the PVGIS database. Assumptions regarding data normality (Shapiro-Wilk test) and sphericity (Mauchly's test) were assessed, and the data were analyzed using repeated measures ANOVA (RM-ANOVA) in SPSS software (version 27), accompanied by pairwise comparisons with Bonferroni correction.

Results and Discussion: The average daily evaporation in the control treatment was 4.39 mm, representing the highest value recorded among all treatments. The submerged panel treatment resulted in only a limited reduction (15.7%), bringing the evaporation rate to 3.70 mm; this was likely due to heat transfer from the panel to the water body, which partially offset the shading effect. The treatment with the panel positioned above the water surface showed a reduction of 45.63% (2.38 mm), whereas the treatment with the panel flush with the water surface yielded the greatest reduction (52.37%, or 2.09 mm) as well as the most consistent performance throughout the monitoring period. Repeated measures ANOVA (RM-ANOVA) confirmed statistically significant differences among the treatments ($F = 159.17$, $df = 3$, $p < 0.001$), and Bonferroni post-hoc tests revealed that all panel treatments differed significantly from the control ($p < 0.001$). The numerical difference between the water-level treatment and the above-water treatment was negligible (0.296 mm) and statistically non-significant ($p = 0.065$); however, the water-level treatment exhibited greater daily stability throughout the experiment. In contrast to the study by Lopez et al., which achieved a 37% reduction in evaporation using 50% surface coverage on water reservoirs in semi-arid Brazil, the present study recorded a 52.37% reduction with only 42% coverage—a result that exceeds predictions based on a linear relationship between coverage extent and evaporation, highlighting the importance of optimal installation positioning regardless of the surface coverage area. Installation position also significantly affected the panel's electrical efficiency ($p < 0.01$): the water-surface-level treatment achieved the highest mean efficiency (10.9%), followed by the above-water (10.7%), control/ground-based (10.5%), and submerged (10.2%) treatments; despite recording the highest open-circuit voltage, the submerged treatment exhibited lower efficiency due to optical losses caused by light absorption by the water. The alignment of enhanced evaporation reduction and optimal electrical performance in the water-surface-level treatment confirms the potential of this configuration for dual-use applications.

Conclusion: These findings indicate that the installation configuration of floating photovoltaic panels is a decisive factor in their performance—regarding both evaporation reduction and electricity output—under arid climatic conditions. A water-surface-level configuration maximized evaporation reduction while simultaneously yielding the highest electrical efficiency; consequently, this approach is recommended as a practical, dual-purpose solution for agricultural water reservoirs in arid regions of Iran (such as Khorasan Razavi Province), as it enables water resource conservation alongside energy generation for irrigation pumping. Future research should focus on evaluating the structural durability of these systems at an operational scale, investigating their long-term impacts on water quality and reservoir ecosystems, and conducting techno-economic feasibility analyses of the technology.

Acknowledgment: This research was conducted in support of a project involving the Khorasan Razavi Regional Water Company (Contract No. 3/11/24233/140 [KOSW3-03002], dated 2025/01/12) and Ferdowsi University of Mashhad; the authors sincerely appreciate the collaboration and support provided by both institutions regarding the project's implementation and the provision of laboratory facilities.

Keywords: ***Dry climate, Floating solar panels, Surface water evaporation, Photovoltaic panel cooling, Evaporation reduction, Water and energy resource management, Agricultural reservoirs.***

مقاله پژوهشی

بررسی تجربی اثر پیکربندی نصب پنل های فتوولتائیک شناور بر کاهش میزان بررسی تبخیر از استخرهای ذخیره آب

حیدر زیبایی[۱]، جلال برادران مطیع[۲*]، محمد حسین آق خانی[۳] و اکبر شهابی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۴- دانش آموخته دکتری آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مطالعات طرح‌های سد و شبکه، شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، مشهد، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲
پذیرش نهایی: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

کلمات کلیدی:
اقلیم خشک
پنل خورشیدی شناور
تبخیر سطحی آب
خنک کنندگی پنل فتوولتائیک
کاهش تبخیر
مدیریت منابع آب و انرژی
مخازن کشاورزی

* عهده دار مکاتبات:

Email: j.baradaran@um.ac.ir

چکیده

تبخیر در مخازن و استخرهای کشاورزی در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک یکی ازمهم‌ترین عوامل هدر رفت آب می‌باشد که در برخی مناطق، در طول سال بیش از ۵۰ درصد ذخایر آبی را کاهش می‌دهد. سامانه‌های فتوولتائیک شناور به‌عنوان راهکاری دومنظوره برای کاهش تبخیر و تولید انرژی پاک در سال‌های اخیر مطرح شده‌است، اما به نقش پیکربندی نصب پنل‌ها بر میزان کاهش تبخیر در اقلیم‌های خشک تاکنون کمتر توجه شده است. در این پژوهش، مطالعه ای در فصل تابستان با چهار تیمار مخزن شاهد (بدون پنل)، مخزن با پنل فتوولتاییک غوطه ور (دو سانتی‌متر زیر آب)، مخزن با پنل فتوولتاییک مماس بر آب و مخزن با پنل فتوولتاییک بالاتر از آب (هشت سانتی‌متر) اجرا شد. پنل‌های پلی کریستالی ۲۰ واتی در مخازن آب با ابعاد یکسان نصب شدند و برای حذف اثر تابش جانبی از جعبه‌های پلی‌استایرن استفاده گردید. اندازه گیری تبخیر روزانه با ترازو دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. شرایط محیطی شامل دما، رطوبت و تابش خورشیدی هم به‌طور همزمان پایش شد. داده‌ها به روش آنالیز واریانس با اندازه‌گیری مکرر در SPSS نسخه ۲۷ تحلیل شد. نتایج نشان داد میانگین تبخیر روزانه در تیمار شاهد ۴/۳۹ میلی‌متر بود. تیمار مماس بر آب با ۲/۰۹ میلی‌متر بیشترین کاهش (۵۲/۳۷ درصد) را داشت، تیمار بالاتر از آب کاهش ۴۵/۶۳ درصدی داشت و تیمار غوطه‌ور با ۳/۷۰ میلی‌متر کمترین کاهش (۱۵/۷درصد) را به ثبت رساند. تفاوت بین تمامی تیمارها از نظر آماری معنادار بود ($p<0.001$). یافته‌های این پژوهش نشان داد نصب پنل‌های فتوولتائیک بر روی مخازن آب روباز می‌تواند بیش از ۵۰

درصد تبخیر سطحی را کاهش دهد و نوع پیکربندی (موقعیت) نصب پنل‌های فتوولتاییک، در میزان کاهش تبخیر اثرگذار می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان داد موقعیت نصب بر عملکرد الکتریکی پنل‌ها(بازده الکتریکی) نیز موثر می‌باشد و تیمار مماس بر آب هم‌زمان بیش‌ترین کاهش تبخیر و بالاترین بازده الکتریکی را دارد.

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 فزونی یافته است. مصرف آب با سرعتی بیش از دو برابر نرخ رشد جمعیت در حال افزایش می‌باشد و انتظار می‌رود تقاضای غذا و تولیدات کشاورزی تا سال ۲۰۵۰ تا ۶۰ درصد رشد کند(FAO, 2020). منابع آب سطحی و زیرزمینی، که عمدتاً برای مصارف کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند، با فشار فزاینده‌ای در سال‌های اخیر مواجه شده‌اند؛ کشاورزی مصرف کننده نزدیک به ۷۰ درصد از حجم کل برداشت آب شیرین جهان می‌باشد و بزرگ‌ترین بخش مصرف‌کننده آب به شمار می‌رود(Ingrao et al., 2023). در بسیاری از مناطق نیمه‌خشک و خشک جهان از جمله ایران، کشاورزی در معرض چالش‌های متعددی قرار دارد. اقلیم ایران عمدتاً خشک یا نیمه‌خشک می‌باشد و کشور ایران به‌شدت تحت تأثیر تخلیه منابع آبی ناشی از افزایش تقاضا، شوری‌زایی، بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی و افزایش فراوانی خشکسالی قرار دارد (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2022). بر اساس گزارش صائمیان و همکاران (۲۰۲۲)، ایران در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۹ حدود ۲۱۱ کیلومتر مکعب از ذخایر کل آب خود را از دست داده که بیش از دو برابر مصرف سالانه آب کشور می‌باشد(Saemian et al., 2022). مطالعات جدیدتر مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای GRACE[1] نیز روند تشدید این کاهش ذخایر آبی را در سال‌های اخیر تأیید کرده‌اند(Shafizadeh-Moghadam et al., 2025).

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 (Wang et al., 2026).

تبخیر سطحی یکی از عوامل اصلی اتلاف منابع آب ذخیره‌شده در مخازن روباز مانند استخرهای کشاورزی و سدها می‌باشد. به عنوان نمونه، اتلاف سالانه تبخیر از ۷۲۱ مخزن در ایالت تگزاس آمریکا معادل ۹۳ درصد تأمین آب عمومی سالانه ایالات متحده (در سال ۲۰۱۰) می‌باشد و تبخیر بلندمدت از دریاچه تاهو در غرب ایالات متحده، ۴۰ تا ۶۰ درصد از کل خروجی مخزن را تشکیل می‌دهد(Zhao & Gao, 2019). تحلیل‌های اخیر در منطقه خاورمیانه نشان می‌دهد که اتلاف سالانه تبخیر از استخرهای کوچک کشاورزی در این منطقه می‌تواند از ۲۴۰۰ میلیون متر مکعب فراتر رود(Aminzadeh et al., 2025). از سوی دیگر، مدیریت این اتلاف آبی نیازمند راهکارهایی کم‌هزینه، مؤثر و قابل پیاده‌سازی در مقیاس وسیع می‌باشد.

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. سامانه‌های فتوولتائیک شناور[2] نه‌تنها از تبخیر جلوگیری می‌کنند، بلکه بازدهی تولید توان را از طریق خنک‌کاری طبیعی ۱۰ تا ۲۰ درصد بهبود می‌بخشند (Oeishee & Rahman, 2026). در مطالعه‌ای موردی در اردن، یک سامانه فتوولتائیک شناور ثابت با ظرفیت ۳۰۰ kWp و سطح اشغال ۴۲۸۵ مترمربع بر روی مخزن

1- Gravity Recovery And Climate Experiment
2- Floating Photovoltaic (FPV)

آبیاریی با مساحت ۱۳۵۰۰ مترمربع و عمق ۷ متر مدل‌سازی شد که نتیجه آن صرفه‌جویی سالانه حدود ۱۲۷۰۰ مترمکعب آب، معادل ۴۲/۱ درصد کاهش تبخیر نسبت به حالت بدون پوشش بود(Farrar et al., 2022)

علاوه بر کمبود آب در سال‌های اخیر تعداد زیادی اختلال در تأمین برق رخ داده است که منجر به هزینه‌های کمبود برق در سطح بخش‌های اقتصادی از جمله صنعت کشاورزی ایران شده است(Faridzad et al., 2022). در سامانه‌های 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 و با توجه به اقتصاد کشاورزی، نیاز به آبیاری روز به روز در حال افزایش می‌باشد. استفاده از سامانه پمپاژ دیزلی نه مقرون به صرفه است و نه سازگار با محیط زیست می‌باشد. ۴۷/۸ درصد از کل پمپ‌های آبیاری دیزلی هستند که مقدار زیادی کربن دی اکسید و سایر گازهای سمی منتشر می‌کنند(Sarkar et al., 2015). از طرفی، عملکرد پنل‌های خورشیدی معمولاً در گرما کاهش می‌یابد، اما نصب آن‌ها بر روی آب این مشکل را برطرف می‌کند. پنل‌های فتوولتائیک شناور در دمای پایین‌تری نسبت به آرایه های نصب روی سطح زمین کار می‌کنند که این امر از اتلاف بازدهی ناشی از دمای بالا جلوگیری می‌کند(Kjeldstad et al., 2021)(Shao et al., 2023).

از دیگر مزایای این روش می‌توان به استفاده بهینه از فضاهای بلااستفاده اشاره کرد. سامانه‌های فتوولتائیک شناور فضای زمین‌های مسکونی و کشاورزی را اشغال نمی‌کنند و می‌توانند از تعارض‌های مربوط به کاربری زمین جلوگیری کنند (Pouran et al., 2022). هم‌چنین، نتایج آزمایش‌های میدانی نشان می‌دهد که پوشش پنل‌های شناور با محدود کردن تابش مستقیم خورشید، تبخیر را کاهش و کیفیت آب را بهبود می‌بخشد؛ به‌طوری که در یک مطالعه، تبخیر در اثر پوشش پنل‌ها به‌طور متوسط ۶۰ درصد کاهش یافت(Abdelal, 2021).

با توجه به چالش‌های گسترده در حوزه کشاورزی و مدیریت منابع آب، در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران، سامانه‌های فتوولتائیک شناور به‌عنوان فناوری راهبردی برای تقویت تاب‌آوری آب–انرژی شناخته شده‌اند، با توجه به تابش خورشیدی بالا، نرخ تبخیر زیاد و محدودیت‌های کاربری زمین ترکیب سامانه‌های فتوولتائیک شناور با استخرهای ذخیره آب کشاورزی، نمونه‌ای از این رویکردهای نوآورانه و پایدار می‌باشد که می‌تواند در کاهش تبخیر، تولید انرژی پاک، و تأمین برق مورد نیاز باشد (Ghiasi et al., 2025). وجود مطالعات متعدد درباره تبخیر و سامانه‌های خورشیدی، اثر موقعیت‌های مختلف نصب پنل‌های شناور بر نرخ تبخیر و در اقلیم خشک ایران به‌صورت نظام‌مند بررسی نشده است. از سوی دیگر، در سامانه‌های کشاورزی مناطق خشک، چاه‌موتورها و استخرهای ذخیره آب کشاورزی نقش کلیدی در تأمین آب دارند و استفاده از پنل‌های خورشیدی شناور می‌تواند علاوه بر کاهش تبخیر، منبع پایداری برای تأمین انرژی آن‌ها فراهم کند. بنابراین، در این پژوهش با طراحی یک مطالعه تجربی، اثر سه موقعیت نصب پنل‌های خورشیدی شناور (زیر آب، مماس بر آب و بالاتر از آب) بر نرخ تبخیر مخازن روباز در اقلیم خشک مشهد ارزیابی شد.

برای درک بهتر جایگاه این پژوهش در حوزه فناوری فتوولتائیک شناور و کاهش تبخیر، در ادامه مروری بر مطالعات پیشین انجام شده است.

پیشینه پژوهش

تابودا و همکاران (۲۰۱۷) با طراحی یک سیستم آزمایشگاهی شامل دو مخزن مشابه (یکی گرم‌شونده و دیگری بدون گرمایش)، تأثیر پوشش‌های شناور فتوولتائیک را بر کاهش تبخیر و بازده حرارتی سیستم گرمایش خورشیدی آب بررسی کردند. نتایج نشان داد کاهش تبخیر مخزن دارای پوشش شناور بیش از ۹۰ درصد نسبت به مخزن بدون پوشش بود، در حالی‌که سلول‌های فتوولتائیک نصب‌شده روی پوشش شناور تا سقف ۶۸ وات بر مترمربع توان الکتریکی معادل تولید کردند. همچنین میانگین جهانی گرمایش خورشیدی روزانه آب اندازه‌گیری‌شده در مخزن معادل ۴۲۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع بود. این پژوهش که در شرایط

اقلیمی خشک شمال شیلی و در دوره‌ای هشت‌ماهه انجام شد، الگویی کاربردی برای تلفیق هم‌زمان فناوری فتوولتائیک شناور با مدیریت حرارتی و هیدرولوژیکی مخازن آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه می‌دهد(Taboada et al., 2017).

فرناندو دوس سانتوس و همکاران (۲۰۲۲) در مخزن پاسوآنا در برزیل، تأثیر نصب سامانه فتوولتائیک شناور را بر کاهش تبخیر آب به‌صورت تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که با نصب ۱۲۶۵/۱۴ مترمربع پنل فتوولتائیک شناور، میزان تبخیر آب به‌طور متوسط تا ۶۰/۲۰ درصد کاهش یافت که ناشی از ممانعت از تابش مستقیم خورشید به سطح آب و کاهش دمای سطحی بود. این پژوهش نشان داد که چنین سامانه‌هایی، علاوه بر تولید هم‌زمان انرژی الکتریکی پاک، می‌توانند با کاهش نفوذ نور به لایه‌های عمقی آب، از رشد جلبکی نیز جلوگیری کرده و کیفیت آب را بهبود بخشند؛ رویکردی مؤثر برای مناطق با تبخیر بالا و نیازمند حفظ منابع آبی باشد. این رویکرد می‌تواند به عنوان یک مدل انتگرالی در توسعه زیرساخت‌های پایدار شهری و کشاورزی مطرح شود(Santos et al., 2022).

در یک پژوهش جامع درباره فناوری نیروگاه‌های خورشیدی شناور که با رویکردی علمی و تحلیلی به مزایا، طراحی، عملکرد، چالش‌ها و آینده این نوع سامانه‌ها توسط آلوک ساهو و همکاران (۲۰۱۶) پرداخته شد. (Sahu et al., 2016).

از طرفی سامانه‌های فتوولتائیکی شناور نسبت به سامانه‌های زمینی دارای راندمان بالاتری هستند. این موضوع عمدتاً به دلیل خنک‌سازی طبیعی پنل‌ها توسط آب و کاهش دمای کاری سلول‌های فتوولتائیک است(Azmi et al., 2013). در این زمینه، چوی (۲۰۱۴) نشان داد، سامانه‌های شناور می‌توانند تا ۱۱ درصد افزایش در راندمان داشته باشند. این بهبود عملکرد ناشی از اثر خنک‌کنندگی آب و کاهش آلودگی سطح پنل‌ها به دلیل شستشوی طبیعی است. هم‌چنین نصب پنل ها نیاز به زمین های نسبتا مرغوب و مسطح دارد، استفاده از سطح استخرهای کشاورزی، سدها و دریاچه‌ها برای نصب این سامانه‌ها، باعث صرفه‌جویی در زمین‌های کشاورزی و شهری می‌شود و موانع زیست‌محیطی و حقوقی مربوط به اشغال زمین را کاهش می‌دهد (Y.-K. Choi, 2014).

در حوزه طراحی ساختارهای شناور، شارما و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی مواد مورد استفاده، انواع سامانه‌های نگهدارنده (FP)[1]، نحوه اتصال الکتریکی و انتقال انرژی به شبکه می‌پردازد(Rosa-Clot et al., 2010). هم‌چنین، چالش‌های فنی–اقتصادی این سامانه‌ها مانند مقاومت در برابر شرایط سخت اقلیمی، عمر مفید بلندمدت، هزینه‌های اولیه بالا، نگهداری و تعمیرات مورد تحلیل قرار گرفته است(Sharma et al., 2015). بر اساس یافته‌ها، هزینه‌های اولیه سامانه‌های فتوولتائیک شناور عموماً بالاتر از سامانه‌های زمینی است، اما با توجه به عملکرد بهتر و کاهش تبخیر، می‌توان این هزینه‌ها را در بلندمدت توجیه کرد از طرفی سازه‌های نگهدارنده مورد استفاده برای نیروگاه‌های شناور می‌توانند تا ۲۵ درصد از کل هزینه‌های پروژه را تشکیل دهند، اما این مبلغ اغلب کمتر از هزینه خرید و آماده‌سازی زمین است(Smyth et al., 2011). سامانه‌های فتوولتائیک شناور می‌توانند ضمن تولید انرژی پاک، به کاهش تبخیر تا ۴۰ درصد در مخازن کمک کنند(Tsoutsos et al., 2005). این دو فاکتور، نقش مهمی در حفظ کیفیت و کمیت منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایفا می‌کنند.

در پژوهشی قیاسی و همکاران (۲۰۲۵) با رویکردی راهبردی، پتانسیل سامانه‌های فتوولتائیک شناور را در مخازن سدهای ایران بررسی کردند و نشان دادند این فناوری می‌تواند نقش مؤثری در تأمین هم‌زمان امنیت آبی و انرژی کشور ایفا کند(Ghiasi, 2025). همچنین، مطالعه مروری اخیر اوئیشی و رحمان (۲۰۲۶) چالش‌ها و ملاحظات پایداری این سامانه‌ها را در مقیاس جهانی تحلیل کرده و بر نیاز به بررسی دقیق‌تر پارامترهای طراحی نصب تأکید کرده است (Oeishee & Rahman, 2026)؛ این یافته‌ها اهمیت بررسی موقعیت پنل نسبت به سطح آب را در شرایط اقلیمی ایران دوچندان می‌کند

1- Floating Platforms

در مجموع، بررسی نتایج مقالات، 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. 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(Y.-K. Choi, 2014).

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که اگرچه اثر کلی سامانه‌های فتوولتائیک شناور بر کاهش تبخیر اثبات شده است، اما نقش موقعیت نصب پنل‌ها (غوطه‌ور، مماس یا بالاتر از آب) در عملکرد این سامانه‌ها کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر کاهش تبخیر، عملکرد الکتریکی در موقعیت‌های نصب مختلف هم به عنوان یافته تکمیلی گزارش شده است. این شکاف دانشی مبنای انجام پژوهش حاضر است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش درسال ۱۴۰۳ فصل تابستان (مرداد و شهریور) در مجموعه کارگاه ها و آزمایشگاه های گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی شهر مشهد انجام شد. شهر مشهد، در مرکز استان خراسان رضوی در شمال شرقی ایران واقع شده است، بین عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۱ دقیقه شمالی تا ۳۶ درجه و ۲۴ دقیقه شمالی، و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۲۷ دقیقه شرقی تا ۵۹ درجه و ۴۲ دقیقه شرقی قرار دارد.

برای اجرای آزمایش‌ها، چهار عدد مخزن (یک مخزن شاهد بدون پنل و سه مخزن تیمار های پیکربندی نصب) به ابعاد ۷۹×۶۵×۳۰ سانتی‌متر به‌عنوان 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 ۱×۱×۱ متر استفاده گردید تا مخازن درون آن قرار گرفته و سطح آب برابر با سطح دیواره ها باشد. بدین ترتیب دیواره ها به‌عنوان حفاظ جانبی برای مخزن‌ها عمل کردند تا اثر تابش مستقیم نور خورشید به دیواره‌های جانبی مخزن و افزایش دمای جانبی حذف شود.

به‌منظور 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. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار شامل سه موقعیت نصب پنل فتوولتائیک (بالای سطح آب، روی سطح آب و زیر سطح آب) و سه بلوک (سه پنل فتوولتائیک مشابه) انجام شد. چهار پنل یکسان با برچسب‌های A تا D در چهار تیمار استفاده شدند. از آنجا که تفاوت‌های ریز میان پنل‌ها (در رفتار حرارتی و الکتریکی) می‌تواند به‌طور مستقیم بر میزان تبخیر اندازه‌گیری‌شده در هر تیمار اثر بگذارد، یک طرح چرخشی به‌کار گرفته شد تا این اثر پنل‌محور کنترل و از نتایج تبخیر مرتبط با موقعیت نصب جدا شود. هر پنل به‌مدت سه روز متوالی در یک موقعیت نصب مشخص قرار می‌گرفت (سه تکرار)، سپس موقعیت پنل‌ها بین تیمارها جای‌به‌جا می‌شد. این چرخه سه‌روزه در طول دوره آزمایش تکرار شد و در نهایت ۶ تکرار مستقل برای هر تیمار حاصل گردید. این طراحی تضمین کرد که نتایج کاهش تبخیر در هر تیمار، ناشی از موقعیت نصب پنل، نه ویژگی‌های فردی یک پنل خاص باشد.

پنل‌ها با اتصال به مدار الکتریکی کاملا مشابه (لامپ های رشته ای ۲۰ وات) (شکل ۱) تحت بار قرار داشتند لذا عبور جریان الکتریکی موجب قرارگرفتن دمای پنل ها در محدوده کاری و در نظر گرفتن اثر گرمای پنل بر میزان تبخیر می‌شد. هم‌زمان ولتاژ

مدار باز و جریان اتصال کوتاه پنل‌ها با مولتی متر دیجیتال ویکتور مدلVC97بادقت۰/۵ درصد در ولتاژ و ۰/۱ درصد در جریان اتصال کوتاه ثبت شد تا امکان ارزیابی عملکرد الکتریکی در موقعیت های نصب مختلف فراهم شود.

تیمار های نصب پنل ها:

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 شکل ۲ نمای پنل‌های فتوولتاییک در مخازن آب نشان داده شده است.

جهت هم‌راستایی با جهت تابش خورشید در نیمکره شمالی، تمامی پنل‌های خورشیدی به‌صورت افقی و با جهت‌گیری به سمت جنوب مستقر شدند، زاویه تمایل آن‌ها نسبت به سطح افقی صفر در نظر گرفته شد. زاویه صفر برای یکسان‌سازی سطح مؤثر پوشش در تمام تیمارها در نظر گرفته شد. در شکل ۳ موقعیت‌های نصب در مخازن آب نشان داده شده است.



Figure 1. The voltage and current control unit for the panels, equipped with incandescent bulbs for applying electrical loads to the panels



Figure 2. Panel installation treatments in water tanks

Table 1. Technical specifications of Zytech Solar ZT-20P polycrystalline photovoltaic panels

Value	Symbol	Parameter
20	Pm (Wp)	Rated Power
±3	_	Output Power Tolerance(%)
21.96	V_{oc} (V)	Open-Circuit Voltage
1.17	I_{sc} (A)	Short-Circuit Current
18.25	V_{mp} (V)	Voltage at Maximum Power
1.15	I_{mpp}	Current at Maximum Power(A)
475×375×25	_	Module Dimensions (mm)
2.11	_	Weight (kg)

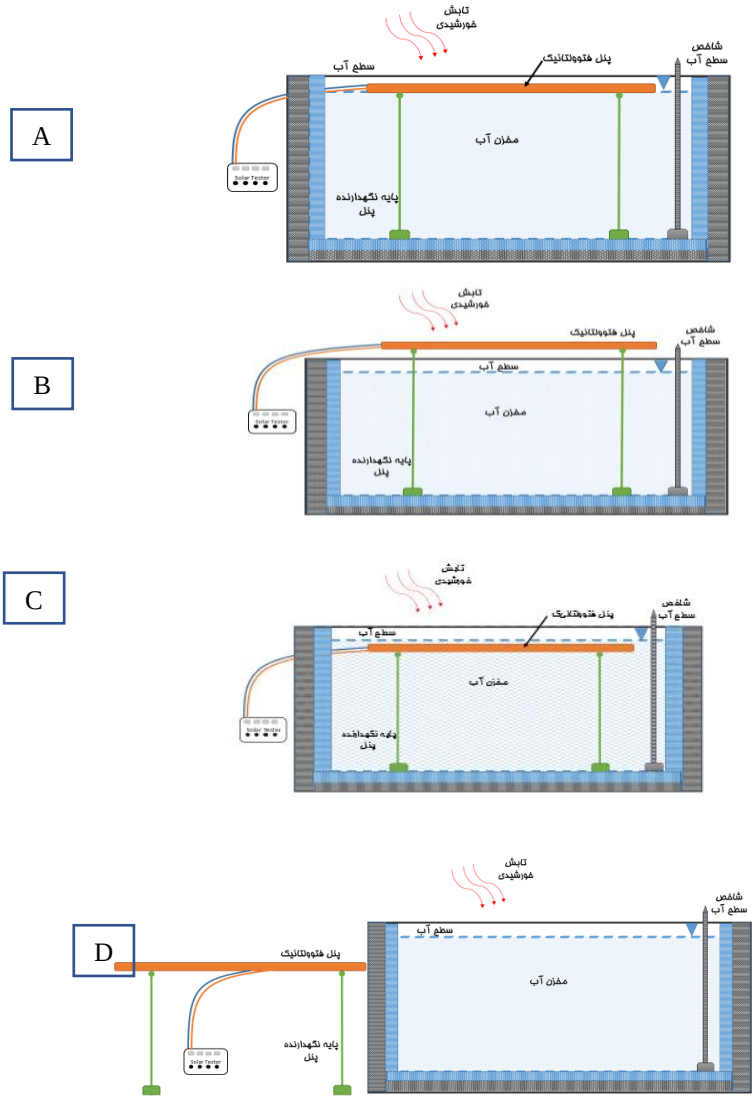


Figure 3. Placement of panels and support bases in tanks. A: Panel in contact with water, B: Panel above water level, C: Panel below water level, D: Control tank treatment without panels.

آزمایش‌ها از ۱۶ مرداد الی ۱۵ شهریور ماه به‌طور روزانه انجام شد. به منظور 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 و نقطه شبنم : ۲۵/۳- تا ۴۸/۹ درجه سانتی‌گراد را با دقت : ۰/۰۱ RH و ۰/۰۱ درجه اندازه گیری می‌کند هم‌چنین داده های مربوط به شدت تابش روزانه نیز از سایت سامانه اطلاعات جغرافیایی فتوولتائیک[1] ثبت گردید. این داده‌ها به‌طور همزمان در ساعات اندازه‌گیری ثبت گردید.

جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار آماری SPSS (نسخه ۲۷) استفاده شد. با توجه به ماهیت طرح آزمایش که در آن تمام تیمارها به صورت همزمان در معرض شرایط محیطی یکسان (دما، رطوبت و تابش) قرار داشتند، داده‌های ثبت شده در هر روز برای تیمارهای مختلف، به یکدیگر وابسته تلقی می‌شوند. در چنین شرایطی، استفاده از آزمون‌های معمول مانند آنالیز واریانس یک‌طرفه به دلیل نادیده گرفتن همبستگی بین داده‌های روزانه و عدم تفکیک اثر نوسانات محیطی از خطای آزمایش، فاقد دقت لازم بود. بنابراین، به دلیل انجام اندازه‌گیری‌های مکرر بر روی هر پنل فتوولتائیک در موقعیت‌های مختلف نصب، داده‌ها با استفاده از آنالیز واریانس با اندازه‌گیری مکرر[2] تحلیل شدند تا همبستگی بین مشاهدات در یک پنل لحاظ شده و اثر تغییرات زمانی و شرایط محیطی تا حد امکان کنترل شود. در آزمایش تبخیر، چهار پنل یکسان در سه موقعیت نصب شامل شاهد، زیرآب، مماس بر سطح آب و بالاتر از سطح آب به‌صورت چرخشی جابه‌جا شدند. در آزمایش تبخیر، از چهار تشت استفاده شد؛ یک تشت به‌عنوان شاهد تبخیر بدون حضور پنل در نظر گرفته شد و سه تشت دیگر به‌سه موقعیت نصب زیرآب، مماس بر سطح آب و بالاتر از سطح آب اختصاص یافتند. از سوی دیگر، یک پنل به‌عنوان شاهد الکتریکی به‌طور ثابت روی زمین نصب شد؛ با این حال، این پنل به دلیل بهره‌گیری از طرح چرخشی، در آزمایش تبخیر نیز در کنار سه موقعیت نصب یادشده مشارکت داشت. بدین‌ترتیب، در مجموع چهار پنل مورد استفاده قرار گرفت که به‌صورت چرخشی میان تشت‌های مذکور جابه‌جا می‌شدند. هر پنل در هر موقعیت به‌مدت سه روز متوالی باقی ماند و این چرخه در طول دوره آزمایش تکرار شد، به‌طوری که در نهایت برای هر تیمار شش تکرار مستقل حاصل شد بنابراین تحلیل داده‌ها بر پایه اندازه‌گیری‌های مکرر انجام شد. پیش از اجرای آزمون تحلیل واریانس با اندازه‌گیری‌های مکرر، پیش‌فرض‌های نرمال بودن توزیع داده‌ها و کرویت[3] بررسی شدند. نتایج آزمون شاپیرو–ویلک[4] نشان داد که داده‌های تبخیر در هر یک از چهار تیمار به‌طور جداگانه از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. همچنین، نتایج آزمون کرویت موچلی[5] نشان داد که فرض کرویت برقرار است. بنابراین، با توجه به برقراری هر دو پیش‌فرض، نتایج آنالیز واریانس با اندازه‌گیری مکرر بدون نیاز به تصحیح کرویت گزارش شدند.

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 ۱میلی‌لیتر استفاده شد. به منظور اندازه گیری آب تبخیر شده، حجم آب مورد نیاز برای پر کردن هر مخزن و رساندن سطح آب تا محل شاخص اولیه اندازه گیری گردید. برای محاسبه میزان آب تبخیرشده در هر مخزن، ابتدا جرم آب اضافه‌شده (برحسب 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 اضافه‌شده 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 تبخیرشده (برحسب سانتی‌متر) از

1- Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)
2- Repeated Measures ANOVA
3- Sphericity
4- Shapiro-Wilk
5- Mauchly's Test

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 (بیضی شکل) می‌باشد. نرخ تبخیر روزانه بر اساس روابط پایه موازنه جرم–حجم به شرح زیر محاسبه شد. برای محاسبه فرمول بازده الکتریکی از فرمول شماره ۶ استفاده شد. که در آن IوV به ترتیب ولتاژ و جریان الکتریکی پنل‌ها می‌باشد و A سطح پنل و G شدت تابش خورشید می‌باشد.

$$m = w2 - w1 \quad (۱)$$

$$v = \frac{m}{\rho} \quad (۲)$$

$$v = h \times A \quad (۳)$$

$$h = \frac{v}{A} = \frac{m}{\rho A} \quad (۴)$$

$$A = \pi \times a \times b \quad (۵)$$

$$\eta = \frac{(V \times I)}{G \times A} \quad (۶)$$

نتایج

نتایج آمار توصیفی مقادیر تبخیر روزانه برای هر یک از تیمارها در جدول۲ ارائه شده است. میانگین تبخیر روزانه در تیمار شاهد برابر با ۴/۳۹ میلی‌متر بود که بالاترین مقدار در میان تیمارها محسوب می‌شود و نشان دهنده هدر رفت و تبخیر بی رویه از سطح مخزن می‌باشد. در تیمار پنل زیر آب، میزان تبخیر ۳/۷۰ میلی‌متر مشاهده شد که اختلاف کمی با مخزن شاهد دارد اما نشان می‌دهد که پنل زیر آب با سایه اندازی بر کف مخزن و کاهش دمای آب مخزن هم می‌تواند از تبخیر آب جلوگیری کند. تیمار پنل مماس بر آب کمترین میزان تبخیر را با ۲/۰۹ میلی‌متر نشان داد که این تیمار را به گزینه عالی برای کاهش تبخیر در سطح مخازن آب کشاورزی و دریاچه‌ها می‌توان انتخاب کرد، در حالی که تیمار پنل بالاتر از آب میزان تبخیر برابر با ۲/۳۸ میلی‌متر داشت که از منظر میانگین بسیار نزدیک به پنل مماس بر آب می‌باشد.

برای تعیین وجود اختلاف معنادار کلی بین تیمارها از آماره فیشر در جدول تحلیل واریانس درون‌گروهی استفاده شد تا نشان داده شود که ازلحاظ آماری هم اختلاف معناداری بین تیمارها و موقعیت نصب پنل‌ها وجود دارد. نتایج این آزمون در جدول ۳ نشان داده شده است. سطح معناداری($p_value<0.05$) در جدول ۳ نشان دهنده اختلاف معناداری در بین تیمارهای موقعیت نصب می‌باشد و ثابت می‌کند که موقعیت نصب در میزان تبخیر اثرگذار می‌باشد. و اختلاف میانگین تبخیری که در جدول۲ مشاهده می‌شود از لحاظ آماری معنی دار می‌باشد.

Table 2. Descriptive statistics of daily evaporation values for each treatment (mm)

Group	Mean	Standard Error	Upper Bound	Lower Bound
Control Tank	4.39	0.09	4.59	4.18
Submerged PV Panel	3.70	0.14	4.01	3.40
PV Panel in Contact with Water Surface	2.09	0.08	2.25	1.92
PV Panel Above Water Surface	2.38	0.10	2.60	2.16

Table 3. Significance table of installation position in evaporation

Parameter	Sum of Squares	df	Mean Square	F-statistic	P-value
Installation Position	85.29	3	28.43	159.17	<0.001
Error	12.32	69	0.18	—	—
Total	97.61	72	—	—	—

جدول ۳ نشان می دهد که موقعیت نصب در کاهش تبخیر از سطح مخازن موثر می‌باشد اما برای مقایسه دوبه‌دو تیمارها با تیمار شاهد، جهت تعیین دقیق تفاوت بین سطوح مختلف و مشخص نمودن بهترین موقعیت نصب، از آزمون‌های تعقیبی با اصلاح بونفرونی استفاده شد تا خطای نوع اول ناشی از مقایسه‌های چندگانه کنترل گردد. سطح معناداری در کلیه آزمون‌ها در سطح ۹۵ درصد در نظر گرفته شد.

نتایج مقایسه‌های زوجی با استفاده از آزمون تعقیبی بونفرونی (جدول ۴) نشان داد که هر سه روش نصب پنل کاهش معناداری در میزان تبخیر نسبت به گروه شاهد ایجاد کرده‌اند ($p<0.001$). در میان روش‌های مورد بررسی، مخزن با پنل مماس بر آب بیشترین اختلاف را با گروه شاهد داشته است (۲/۳۰- میلی‌متر کاهش روزانه). همچنین مقایسه بین روش‌های مختلف نصب نشان داد که روش مماس بر آب نسبت به روش زیر آب به طور معناداری میزان تبخیر را کاهش داده است ($p<0.001$). در مقایسه با روش بالاتر از آب، اگرچه روش مماس بر آب حدود ۰/۲۹ میلی‌متر کاهش تبخیر بیشتری را ایجاد کرده است، اما این اختلاف از نظر آماری معنادار نمی‌باشد($p=0.065$). با این حال، با توجه به میانگین‌های گزارش شده در جدول۴، روش مماس بر آب به عنوان موثرترین روش در کاهش تبخیر شناخته می‌شود.

شکل ۴ نمایانگر نوسانات اندک پارامترهای محیطی (جوی) در طول دوره آزمایش در شهر مشهد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شرایط آب‌وهوایی حاکم بر محیط آزمایش در این بازه زمانی با تغییرات روزانه در دما، رطوبت و سرعت باد همراه بوده است که این نوسانات در تحلیل داده‌های تبخیر در نظر گرفته شده است.

Table 4. Results of Bonferroni post hoc test to compare the average evaporation in different installation positions

Position (I)	Position (J)	Mean Difference	Standard Error	Significance (P-value)
Ground (Control)	Submerged	0.681	0.11	<0.001
Ground (Control)	In Contact with Water Surface	2.299	0.10	<0.001
Ground (Control)	Above Water Surface	2.003	0.12	<0.001
In Contact with Water Surface	Above Water Surface	−0.296	0.10	0.065

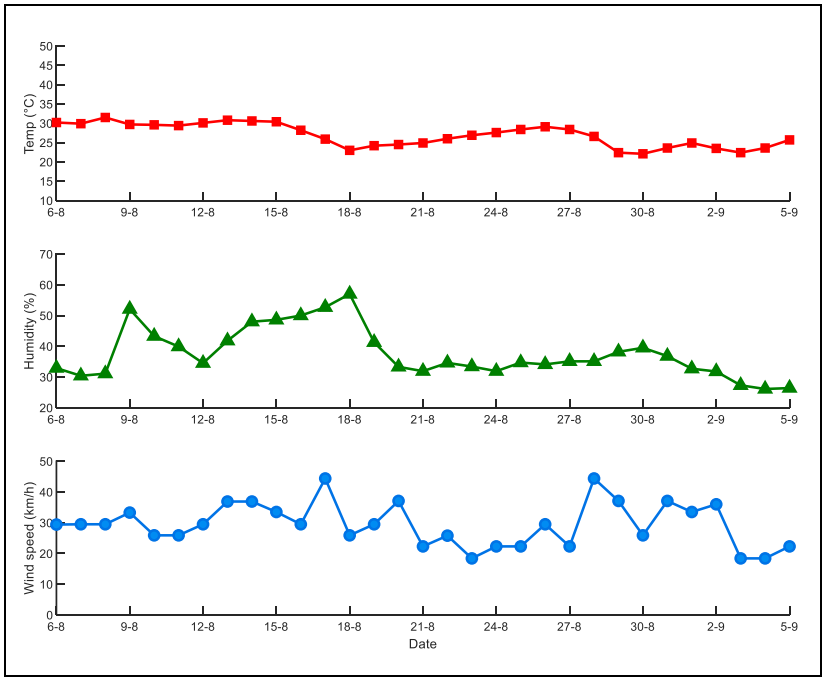


Figure 4. Trend of changes in the test environment data (temperature, humidity, wind speed) measured at the site. The horizontal axis shows the date of the tests in Gregorian calendar (equivalent to August 6 to September 5) in Mashhad.

شکل ۵، روند تغییرات روزانه میزان تبخیر را برای چهار تیمار (مخزن شاهد و سه وضعیت مختلف نصب پنل فتوولتائیک) در طول دوره یک‌ماهه آزمایش نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، تمامی تیمارهای مجهز به پنل، عملکرد بهتری نسبت به مخزن شاهد در کاهش تبخیر داشته‌اند. در این میان، تیمار "پنل فتوولتائیک مماس بر آب" (خط زرد) در اکثر روزهای دوره آزمایش، کمترین نرخ تبخیر را به خود اختصاص داده است؛ همچنین بررسی نوسانات داده‌ها نشان می‌دهد که این تیمار در مقایسه با سایر وضعیت‌های نصب، از پایداری عملکردی بالاتری در برابر تغییرات اقلیمی روزانه برخوردار بوده است. در مقابل، تیمار "پنل فتوولتائیک زیر آب" (خط قرمز) با وجود کاهش تبخیر نسبت به شاهد، در تمامی روزها نرخ تبخیر بالاتری را نسبت به وضعیت مماس بر سطح آب نشان داده است. دلیل این اختلاف عملکرد، احتمالاً ناشی از میزان پوشش سطح آب و تغییر در تبادل حرارتی و تابشی در وضعیت‌های مختلف نصب است.

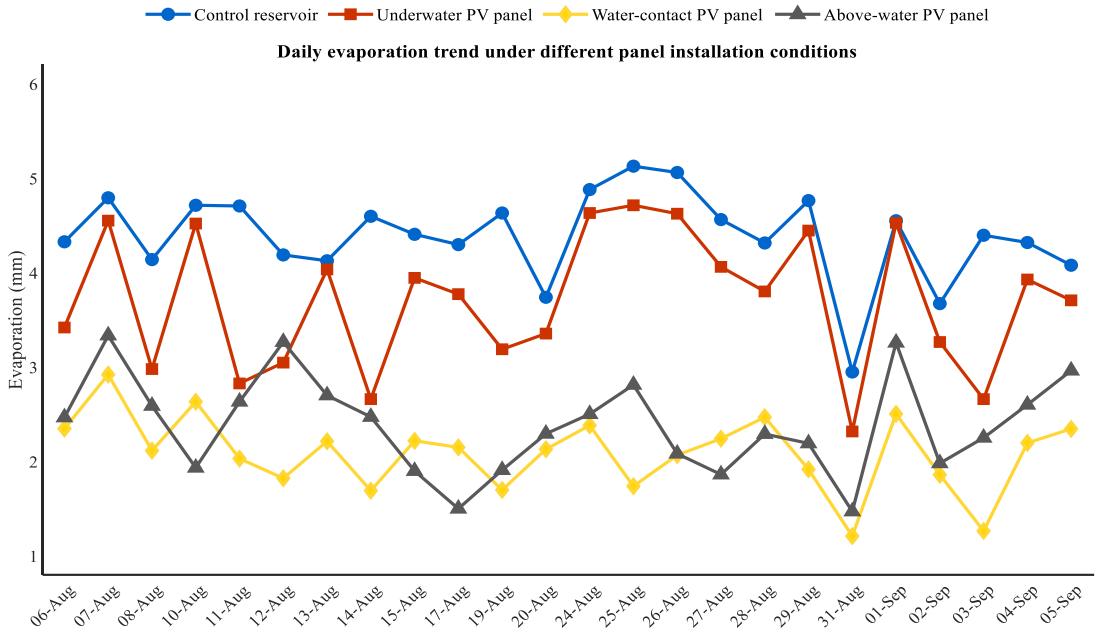


Figure 5. Changes in the measured evaporation rate of each treatment during the one-month period of the experiments.

نمودار جعبه‌ای شکل ۶، توزیع آماری نرخ تبخیر روزانه را در چهار تیمار مورد مطالعه مقایسه می‌کند که مبنایی برای تحلیل اثر موقعیت نصب پنل‌های فتوولتائیک بر فرآیند تبخیر فراهم آورده است. نتایج نشان می‌دهد که مخزن شاهد با بالاترین مقدار میانه و گستره تغییرات، بیشترین نرخ تبخیر را به خود اختصاص داده است که بیانگر تأثیر مستقیم عوامل اقلیمی (تابش، باد و تبادل حرارتی) در غیاب هرگونه پوشش محافظ است.

در میان تیمارهای مجهز به پنل، وضعیت «مماس بر سطح آب» با کمترین میانه و کوچک‌ترین دامنه بین‌چارکی، پایدارترین و کارآمدترین عملکرد را در کاهش نرخ تبخیر ارائه کرده است. کاهش چشمگیر پراکندگی داده‌ها در این تیمار، حاکی از آن است که تماس مستقیم پنل با سطح آب، علاوه بر ایجاد سایه‌اندازی حداکثری، با مهار تلاطم سطحی و محدودسازی جریان هوای مرزی، فرآیند تبخیر را به‌طور پایدار کنترل می‌کند. از سوی دیگر، تیمار «زیر سطح آب» اگرچه نسبت به شاهد کاهش تبخیر نشان می‌دهد، اما دامنه تغییرات وسیع‌تر آن، بیانگر ناپایداری در پاسخ‌های حرارتی و هیدرودینامیکی است که با نوسانات روزانه این تیمار مطابقت دارد. تیمار «بالای سطح آب» نیز کاهش معناداری نسبت به شاهد نشان می‌دهد؛ با این حال، فاصله موجود میان پنل و سطح آب، امکان نفوذ جریان‌های هوایی را فراهم آورده که منجر به نرخ تبخیر بالاتری نسبت به حالت «مماس» شده است. در مجموع، نتایج این نمودار مؤید آن است که افزون بر اثر کلی پنل‌های خورشیدی شناور در کاهش تبخیر، "موقعیت نصب" متغیر کلیدی در بهینه‌سازی صرفه‌جویی منابع آبی است که در این مطالعه، حالت مماس بر آب به‌عنوان کارآمدترین گزینه شناسایی شد.

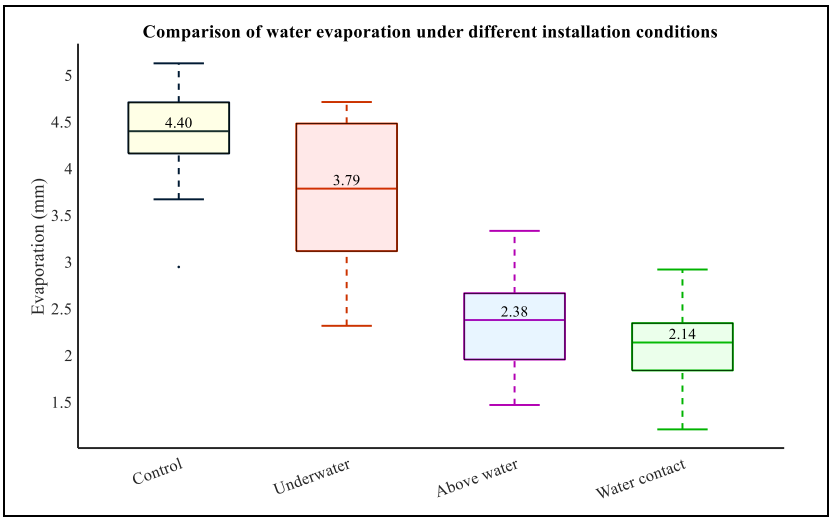


Figure 6. Box plot of evaporation rates of experimental treatments.

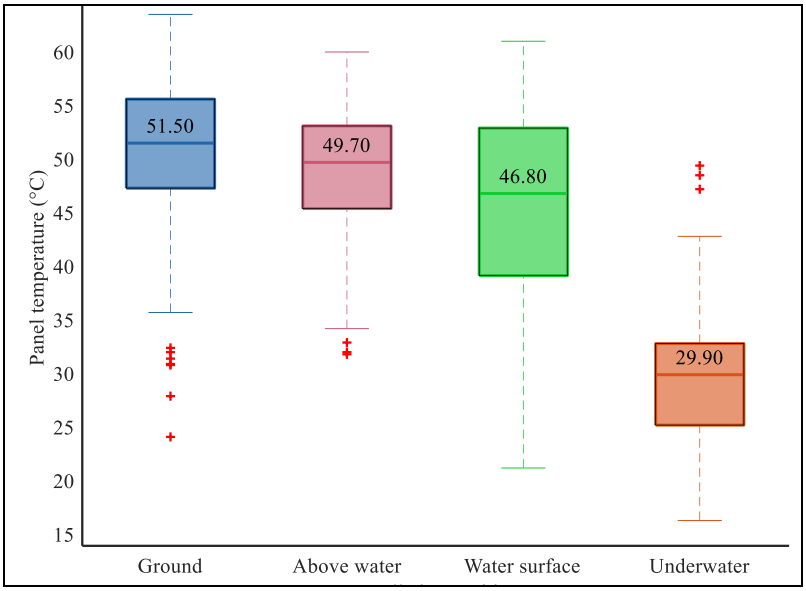


Figure 7. Effect of installation position on panel temperature

باتوجه به شکل۷ موقعیت نصب بر میزان دمای سطح پنل تاثیر گذار می‌باشد و هرچه پنل در تماس با آب باشد دمای کمتر خواهد داشت.

عملکرد الکتریکی پنل‌ها در موقعیت‌های نصب مختلف

علاوه بر تبخیر، بازده الکتریکی پنل‌ها در موقعیت‌های نصب مختلف اندازه گیری و مقایسه شد. نتایج نشاد داد که موقعیت نصب اثر معنی داری بر بازده الکتریکی دارد. تمیار مماس بر آب با بازده ۱۰/۹ درصد بالاترین عملکرد را ثبت کرد; در حالی که تیمار زیر آب با میانگین بازده ۱۰/۲ درصدکم‌ترین مقدار را نشان داد که ناشی از غلبه تلفات نوری بر مزیت خنک کاری حرراتی می‌باشد. تیمارهای نصب روی زمین و نصب بالاتر از آب به ترتیب ۱۰/۵ و ۱۰/۷ درصد را ثبت کردند. بررسی دقیق تر اثر متغیرهای محیطی بر عملکرد الکتریکی پنل‌ها و مدلسازی آماری آن موضوع مقاله ای جداگانه می‌باشد. در جدول ۵ نتایج بازده الکتریکی نشان داده شده است.

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 ۵۲/۳۷درصد در تیمار مماس بر آب (۲/۰۹ میلی‌متر) و ۴۵/۶۳ درصد در تیمار بالاتر از آب (۲/۳۸میلی‌متر) را نشان می‌دهد. این کاهش می‌تواند ناشی از سایه‌اندازی پنل بر سطح آب زیرین (کاهش تابش مستقیم خورشید بر آب) و اختلال در جریان باد بر سطح آب باشد. اثر دمای پنل بر دمای سطح آب به‌صورت غیرمستقیم از روی الگوی تبخیر استنباط شده و دمای آب در این پژوهش به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشده است.

آزمون آنوا 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 ۳/۷۰ میلی‌متر، کاهش کمتری (۱۵/۷درصد) نسبت به شاهد نشان داد، این موضوع می‌تواند تا حدی ناشی از انتقال گرمای تولیدشده توسط پنل به داخل توده آب باشد که با داده‌های اندازه‌گیری‌شده دمای پنل هم‌خوانی دارد، هرچند دمای آب به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشد و بنابراین تأیید قطعی این سازوکار نیازمند مطالعات آینده است.

مقایسه‌های دوبه‌دو تفاوت‌های معنادار را بین شاهد و تمام تیمارها نشان داد ($p \leq 0.001$)، که بر کارایی همه موقعیت‌های نصب پنل تأکید دارد. نتایج آزمون تعقیبی نشان داد از نظر مهار و کاهش تبخیر، تفاوت معناداری بین تیمار مماس بر آب و بالاتر از آب وجود ندارد ($p=0.065$)؛ هر دو تیمار عملکرد مشابهی در کاهش تبخیر داشتند. با این حال، با توجه به مزایای اضافی تیمار مماس بر آب از جمله بازده الکتریکی بالاتر و بهتر که در بخش عملکرد الکتریکی پنل‌ها گزارش شد، این تیمار به‌عنوان گزینه بهینه برای کاربردهای عملی توصیه می‌شود 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 (Taboada et al., 2017) و سانتوس و همکاران (Santos et al., 2022) همخوانی دارد. مقایسه کمّی نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین، کارایی بالای موقعیت نصب مماس بر آب را بیش از پیش آشکار می‌سازد. لوپز و همکاران(۲۰۲۰) در مطالعه‌ای بر روی مخازن نیمه‌خشک برزیل نشان دادند که پوشش ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصدی سطح مخزن به‌ترتیب موجب کاهش تبخیر سالانه ۲۰، ۳۷ و ۵۵ درصدی می‌شود (Lopes et al., 2020).

Table 5. Results of the comparison of average yields across installation positions

Installation Position	Mean (%)	Standard Error	Lower Bound (%)	Upper Bound (%)
Ground (Control)	10.5	0.16	10.19	10.82
Submerged	10.2	0.10	10.02	10.42
In Contact with Water Surface	10.9	0.14	10.66	11.22
Above Water Surface	10.7	0.10	10.52	10.92

علاوه بر کاهش تبخیر یافته‌های مربوط به بازده الکتریکی پنل‌ها نشان دهنده برتری موقعیت نصب مماس بر آب می‌باشد. هم راستایی نتایج تبخیر و بازده الکتریکی در این تیمار نشان می‌دهد که موقعیت مماس بر آب به طور هم‌زمان دو هدف اصلی سامانه های فتوولتاییک شناور یعنی کاهش تبخیر آب و بهینه سازی تولید انرژی را محقق می‌سازد. این هم‌افزایی می‌تواند ناشی از ترکیب دو عامل باشد. اول بهره‌مندی از خنک کاری سطحی آب که با کاهش دمای کاری سلول باعث عدم افت بازده ناشی از گرما می‌شود و دوم عدم مواجهه پنل با تلفات نوری ناشی از جذب طیفی آب که در تمیار زیر آب مشاهده شد.

در پژوهش حاضر، با پوشش ۴۲ درصدی سطح مخزن در تیمار مماس بر آب، کاهش تبخیر ۵۲/۳۷ درصد حاصل شد که از مقدار پیش‌بینی‌شده بر اساس رابطه خطی پوشش-تبخیر (حدود ۳۷ درصد برای پوشش ۵۰ درصدی) فراتر رفته است. این برتری را می‌توان به انتخاب موقعیت بهینه نصب (مماس بر آب) نسبت داد که با ایجاد سایه‌ی پایدار و تعادل حرارتی مطلوب، بازدهی کاهش تبخیر را فراتر از انتظار درصد پوشش صرف ارتقا می‌دهد. لازم به ذکر است که در این پژوهش، اگرچه دمای سطح پنل در طول دوره آزمایش اندازه‌گیری و ثبت شد، دمای آب در هیچ‌یک از تیمارها به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشد؛ بنابراین سازوکارهای حرارتی مربوط به انتقال گرما از پنل به آب و تأثیر آن بر افزایش دمای آب، بر اساس الگوی تبخیر مشاهده‌شده استنباط شده‌اند و تأیید قطعی آن‌ها نیازمند اندازه‌گیری هم‌زمان دمای آب در مطالعات آینده است.

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، 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. یافته‌های این تحقیق علاوه بر تأیید کارایی سامانه‌های فتوولتائیک شناور در کاهش تبخیر، نشان می‌دهد که این فناوری می‌تواند با تأمین انرژی مورد نیاز چاه‌موتورها و پمپ‌های آبیاری، به‌صورت هم‌زمان در مدیریت منابع آب و انرژی در مناطق خشک به‌کار گرفته شود. این ویژگی دوگانه، به‌ویژه در استان‌هایی نظیر خراسان رضوی که با محدودیت آب و هزینه بالای انرژی روبه‌رو هستند، اهمیت زیادی دارد. به طور کلی، نتایج حاضر با مطالعات ساهو و همکاران (۲۰۱۶) و پوران و همکاران (۲۰۲۲) هم‌خوانی دارد که تأکید کرده‌اند سامانه‌های فتوولتائیک شناور ضمن بهبود راندمان انرژی، تأثیر مثبتی در حفظ منابع آبی دارند (Sahu et al., 2016),(Pouran et al., 2022)

در مجموع، نتایج این مطالعه می‌تواند زمینه را برای طراحی بهینه سامانه‌های خورشیدی شناور در مقیاس‌های بزرگ‌تر فراهم کند. این نوع سامانه‌ها می‌توانند به‌عنوان یک راهکار دومنظوره (تولید انرژی و کاهش تبخیر) در مدیریت منابع آب و انرژی مورد استفاده قرارگیرند. تحقیقات آینده می‌تواند به بررسی بلندمدت این سامانه‌ها، ارزیابی عمر مفید پنل‌ها در محیط‌های آبی و تأثیرات زیست‌محیطی اضافی آن‌ها بپردازد. همچنین از آنجا که آزمایش‌ها در فصل تابستان با حداکثر تابش خورشیدی اجرا شدند، این شرایط بدترین سناریوی تبخیر را پوشش می‌دهد و انتظار می‌رود کارایی سامانه در سایر فصول نیز قابل توجه باشد. بررسی اثرات بلندمدت این فناوری بر کیفیت آب و اکوسیستم مخازن نیز می‌تواند زمینه‌ای ارزشمند برای پژوهش‌های آتی باشد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر پیکربندی‌های مختلف نصب پنل‌های فتوولتائیک شناور بر نرخ تبخیر از سطوح آبی انجام شد. یافته‌های حاصل از تحلیل آماری نشان داد که موقعیت نصب پنل‌ها نقشی تعیین‌کننده در میزان کاهش تبخیر ایفا می‌کند. نتایج حاکی از آن است که تیمارهای «مماس بر سطح آب» و «بالای سطح آب» با میانگین کاهش تبخیر به‌ترتیب

۵۲/۳۷ و ۴۵/۶۳درصد نسبت به مخزن شاهد، بالاترین کارایی را در مهار تبخیر داشته‌اند با این حال، تفاوت آماری بین این دو تیمار معنادار نبود ($p=0.065$) و عملکرد آن‌ها از نظر آماری مشابه ارزیابی می‌شود، اگرچه تیمار مماس بر سطح آب پایداری روزانه بیشتری در طول دوره آزمایش نشان داد. در مقابل، تیمار «زیر سطح آب» اثربخشی کمتری نشان داد که می‌تواند ناشی از انتقال حرارت القایی از پنل به لایه‌های آب باشد. این یافته‌ها تأیید می‌کند که استقرار پنل‌ها در وضعیت مماس بر سطح، به دلیل ایجاد توازن مطلوب میان سایه‌اندازی حداکثری و محدودسازی انتقال حرارت، راهکاری بهینه برای مناطق با اقلیم خشک محسوب می‌شود. علاوه بر این تمیار مماس بر آب بالاترین بازده الکتریکی را ثبت کرد که هم راستایی و هم افزایی این دو یافته برتری این پیکربندی (موقعیت) نصب را از منظر دو منظوره(کاهش تبخیر و افزایش بازده الکتریکی) تایید می‌کند.

از منظر کاربردی، بهره‌گیری از سامانه‌های فتوولتائیک شناور (FPV) پتانسیل بالایی در مدیریت تلفیقی منابع آب و انرژی دارد، چراکه علاوه بر کاهش معنادار اتلاف تبخیری در مخازن کشاورزی، انرژی مورد نیاز برای پمپاژ و فعالیت‌های مرتبط را نیز تأمین می‌کند. بنابراین، این فناوری به‌عنوان یک راهکار دومنظوره، گزینه‌ای راهبردی در راستای تاب‌آوری کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌رود.

در نهایت، با توجه به نتایج حاصل، پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی بر ارزیابی پایداری سازه‌ای سامانه‌های شناور در مقیاس‌های عملیاتی، بررسی اثرات طولانی‌مدت این پوشش‌ها بر شاخص‌های کیفی آب (مانند اکسیژن محلول و شکوفایی جلبکی) و همچنین تحلیل توجیه اقتصادی-فنی این فناوری در مقایسه با روش‌های سنتیِ کاهش تبخیر متمرکز گردد.

سپاس گزاری

این پژوهش تحت حمایت قرارداد پژوهشی شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی با قرارداد ۱۴۰/۲۴۲۳۳/۱۱/۳ (KOSW3-03002) مورخ ۱۴۰۳/۱۰/۲۳ و دانشگاه فردوسی مشهد، می باشد که نویسندگان از همراهی و پشتیبانی این دو نهاد در اجرای طرح و فراهم‌سازی امکانات آزمایشگاهی صمیمانه قدردانی می‌کنند.

References

Abdelal, Q. (2021). *Floating PV ; an assessment of water quality and evaporation reduction in semi-arid regions*. *January*, 732–739. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab001

Aminzadeh, M., Narayanaswamy, S., Nevermann, H., Zampieri, M., Hoteit, I., D'Odorico, P., AghaKouchak, A., Madani, K., & Shokri, N. (2025). Water storage paradox of reservoir expansion and evaporative losses in the MENA region. *Scientific Reports*, *15*(1), 34297. https://doi.org/10.1038/s41598-025-21859-w

Azmi, M. S. M., Othman, M. Y. H., Ruslan, M. H. H., Sopian, K., & Majid, Z. A. A. (2013). Study on electrical power output of floating photovoltaic and conventional photovoltaic. *AIP Conference Proceedings*, *1571*(1), 95–101. https://doi.org/10.1063/1.4858636

Choi, Y.-K. (2014). A study on power generation analysis of floating PV system considering environmental impact. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, *8*(1), 75–84.

Choi, Y. K., Choi, W. S., & Lee, J. H. (2016). Empirical research on the efficiency of floating PV systems. *Science of Advanced Materials*, *8*(3), 681–685. https://doi.org/10.1166/sam.2016.2529

FAO. (2020). The state of food and agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture. *Roma*.

Faridzad, A., Ghasemi, A., Rajabi Nejad, M., & Mohammadian, M. A. (2022). The electricity shortage cost in Iran: An input-output analysis and linear programming. *Iranian Economic Review*, *26*(4), 791–807. https://doi.org/10.22059/ier.2022.90656

Farrar, L. W., Bahaj, A. S., James, P., Anwar, A., & Amdar, N. (2022). Floating solar PV to reduce water evaporation in water stressed regions and powering water pumping: Case study Jordan. *Energy Conversion and Management*, *260*, 115598. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115598

Ghiasi, B., Etedali, H. R., & Tahsinpour, H. (2025). A strategic approach to water and energy sustainability: floating solar photovoltaics in Iran's dam reservoirs. *Scientific Reports*, *15*(1), 44687. doi.org/10.1038/s41598-025-28749-1

Ingrao, C., Strippoli, R., Lagioia, G., & Huisingh, D. (2023). Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. *Heliyon*, *9*(8).

International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. (2022). *Operation Update Report IRAN : Droughts*. https://adore.ifrc.org/Download.aspx?FileId=527171

Kjeldstad, T., Lindholm, D., Marstein, E., & Selj, J. (2021). Cooling of floating photovoltaics and the importance of water temperature. *Solar Energy*, *218*, 544–551. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.022

Lopes, M. P. C., de Andrade Neto, S., Branco, D. A. C., de Freitas, M. A. V., & da Silva Fidelis, N. (2020). Water-energy nexus: Floating photovoltaic systems promoting water security and energy generation in the semiarid region of Brazil. *Journal of Cleaner Production*, *273*, 122010.

Oeishee, M. H., & Rahman, M. M. (2026). A Review of Floating Photovoltaic Systems: Prospects, Challenges, and Sustainability Considerations. *Global Challenges*, *10*(2), e00581.

Pouran, H. M., Padilha Campos Lopes, M., Nogueira, T., Alves Castelo Branco, D., & Sheng, Y. (2022). Environmental and technical impacts of floating photovoltaic plants as an emerging clean energy technology. *IScience*, *25*(11), 105253. https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105253

Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, G. M., & Scandura, P. F. (2010). Submerged photovoltaic solar panel: SP2. *Renewable Energy*, *35*(8), 1862–1865. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.10.023

Saemian, P., Tourian, M. J., AghaKouchak, A., Madani, K., & Sneeuw, N. (2022). How much water did Iran lose over the last two decades? *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *41*, 101095.

Sahu, A., Yadav, N., & Sudhakar, K. (2016). Floating photovoltaic power plant: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *66*, 815–824.

Santos, F. R. dos, Wiecheteck, G. K., Virgens Filho, J. S. das, Carranza, G. A., Chambers, T. L., & Fekih, A. (2022). Effects of a Floating Photovoltaic System on the Water Evaporation Rate in the Passaúna

Reservoir, Brazil. *Energies*, *15*(17). https://doi.org/10.3390/en15176274

Sarkar, N. I., Sifat, A. I., Rahim, N., & Reza, S. M. S. (2015). Replacing diesel irrigation pumps with solar photovoltaic pumps for sustainable irrigation in Bangladesh: A feasibility study with HOMER. *2015 2nd International Conference on Electrical Information and Communication Technologies (EICT)*, 498–503.

Shafizadeh-Moghadam, H., Mohtaram, A., Arfa, A., Delavar, M., & Mianabadi, H. (2025). Pronounced decline in Iran's terrestrial water storage from GRACE and GRACE-FO associated with climate and unsustainable land-use change. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *62*, 102954.

Shao, C., Migan-Dubois, A., & Diallo, D. (2023). Performance of PV array configurations under dynamic partial shadings. *EPJ Photovoltaics*, *14*, 21.

Sharma, P., Muni, B., & Sen, D. (2015). Design parameters of 10 KW floating solar power plant. *Proceedings of the International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET), National Conference on Renewable Energy and Environment (NCREE-2015), Ghaziabad, India*, *2*.

Smyth, M., Russell, J., & Milanowski, T. (2011). *Solar energy in the winemaking industry*. Springer Science & Business Media.

Taboada, M. E., Cáceres, L., Graber, T. A., Galleguillos, H. R., Cabeza, L. F., & Rojas, R. (2017). Solar water heating system and photovoltaic floating cover to reduce evaporation: Experimental results and modeling. *Renewable Energy*, *105*, 601–615. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.094

Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, *33*(3), 289–296.

Wang, W., Bettella, F., D'Agostino, V., & Tarolli, P. (2026). Evaluating evaporation losses from agricultural ponds with shelter net covers by integrated Dalton model. *Agricultural Water Management*, *326*, 110237. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2026.110237

Zhao, G., & Gao, H. (2019). Estimating reservoir evaporation losses for the United States: Fusing remote sensing and modeling approaches. *Remote Sensing of Environment*, *226*, 109–124.