

نوع مقاله: پژوهشی

ارزیابی بهره‌وری هرم‌های تقطیری خورشیدی تحت تأثیر سطوح مختلف شوری و عمق آب در منطقه نیمه خشک

راضیه صادقی^۱، خالد احمدآلی^۲، سینا کوثری^۳، سلمان زارع^۴، شهرام خلیقی سیگارودی^۵^۱ گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.^{۲*} گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.^۳ گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.^۴ گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.^۵ گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

چکیده

کمبود آب شیرین یکی از چالش‌های اساسی جوامع امروزی و ناشی از رشد جمعیت، گسترش صنایع و کشاورزی و تغییرات اقلیمی است. این مسئله به‌ویژه در مناطق خشک و بیابانی به دلیل بارش‌های نامنظم و کاهش کمی و کیفی منابع آبی شدت یافته است. منابع آبی فراوانی در دسترس است، اما بخش قابل توجهی از آن‌ها به دلیل شوری و آلودگی‌های مختلف برای مصارف کشاورزی و آشامیدنی نامناسب هستند. در این راستا، فناوری‌های شیرین‌سازی آب، به‌ویژه روش‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی، راهکاری پایدار و سازگار با محیط‌زیست هستند. در میان این روش‌ها، هرم‌های تقطیری یکی از فناوری‌های مؤثر در نمک‌زدایی خورشیدی محسوب می‌شوند که به‌ویژه در مناطقی با میزان تبخیر بالا و دسترسی به منابع آب شور می‌توانند کارایی مطلوبی داشته باشند. عملکرد این سامانه‌ها به‌طور مستقیم تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی و شرایط محیطی قرار دارد، از این‌رو بررسی این عوامل برای بهینه‌سازی فرآیند و افزایش بازدهی ضروری است. در این مطالعه تجربی، عملکرد پنج هرم تقطیرکننده خورشیدی تحت تأثیر سه سطح عمق آب شور ($D_1=1$, $D_2=3$, $D_3=5$ سانتی‌متر) و پنج سطح شوری مختلف ($S_1=5000$, $S_2=10000$, $S_3=20000$ ، $S_4=30000$ و $S_5=40000$ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) در دو فصل بهار و تابستان، تحت شرایط اقلیمی کرج ارزیابی شد. هدف اصلی، بررسی تأثیر عمق و شوری آب بر بازده تولید آب شیرین هرم‌هاست. علاوه بر این، مدل‌های رگرسیونی به‌منظور پیش‌بینی تأثیر شوری و عمق آب بر میزان تولید آب شیرین در شرایط اقلیمی مختلف توسعه داده شد. آزمایش‌ها با استفاده از پنج هرم تقطیری شفاف شیشه‌ای و بدون عایق از ساعت ۸ صبح تا ۱۹ به اجرا درآمدند. نتایج نشان داد که بیشترین حجم آب شیرین تولیدی در تیمار با کمترین عمق و شوری (D_1S_1) و در فصل تابستان، با مقدار 1001 میلی‌لیتر بر مترمربع در روز به‌دست می‌آید. در مقابل، با افزایش عمق آب و شوری، تولید آب کاهش یافت، به‌طوری‌که در تیمار D_3S_5 مقدار تولید به 881 میلی‌لیتر بر مترمربع در روز رسید که بیانگر کاهش ۱۲ درصد در بازدهی نسبت به تیمار D_1S_1 در فصل تابستان است. این یافته‌ها نشان می‌دهد کاهش عمق آب شور و کاهش سطح شوری، منجر به افزایش بازدهی هرم‌های تقطیری خورشیدی می‌شود. مدل‌سازی رگرسیونی نشان داد که مدل توانی ($R^2=0.96$, $RMSE=1.08$) برای پارامتر عمق، و مدل‌های گویا ($R^2=0.99$, $RMSE=0.36$) و چندجمله‌ای ($R^2=0.99$, $RMSE=0.4$) برای پارامتر شوری، نسبت به مدل‌های خطی دقت بالاتری دارند. به دلیل پایین بودن هزینه ساخت و سازگاری زیست‌محیطی هرم‌های تقطیری خورشیدی، می‌توان از این سامانه‌ها برای تولید آب شیرین به‌منظور مصارف آشامیدنی و در کشاورزی کوچک‌مقیاس با گیاهان کم‌آبر در مناطق گرم و دارای منابع آب شور بهره برد.

واژه‌های کلیدی: کمبود آب، شوری‌زدایی، تقطیر، تابش خورشیدی، زهاب

مقدمه

طبیعی توزیع شده است (Alawee et al., 2023; Fathy et al., 2018; Yousef and Hassan, 2019). تمرکز بر منابع آب نامتعارف به دلیل قابلیت آن‌ها در بازیافت و استفاده مجدد از آب برای فعالیتهای مختلف انسانی رو به افزایش است (Kosari et al., 2024; MasoomiBalsi et al., 2024; Morote et al., 2019). شیرین‌سازی و تصفیه آب شور راهی مؤثر برای تولید آب شیرین است (El-Sebaai and Khallaf, 2020; Patel et al., 2006).

انرژی خورشیدی به‌طور گسترده‌ای در مناطق دورافتاده که دسترسی به آب شیرین و فناوری‌های مدرن محدود است استفاده است (Awasthi et al., 2023; Shi et al., 2020; Wang et al., 2024). در مناطقی که آب شیرین کمیاب است اما تابش خورشیدی فراوانی وجود دارد، انرژی خورشیدی منبع جایگزین ترجیحی انرژی ظاهر می‌شود (Mansour et al., 2019). استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید آب شیرین مقرون‌به‌صرفه از طریق روش‌های غیرمتمرکز بسیار مؤثر است. انرژی خورشیدی منبع تجدیدپذیر، پاک، و دوستدار محیط زیست به‌طور گسترده قابل دسترس و دارای کاربردهای متنوع است (Awasthi et al., 2023; Mansur et al., 2019). شیرین‌سازی آب به روش خورشیدی یکی از مؤثرترین روش‌ها برای تبدیل آب شور به آب شیرین با استفاده از انرژی خورشیدی است (Sathyamurthy et al., 2014). نمک‌زدایی از آب شور راهی امیدوارکننده برای تأمین آب شیرین است (Patel et al., 2006). فناوری‌های گوناگون نمک‌زدایی، از جمله تقطیر چند مرحله‌ای (MSF^1)، فشرده‌سازی بخار حرارتی (TVC^2)، اسمز معکوس (RO^3)، تقطیر خورشیدی (SSD^4) و الکترودیالیز (ED^5)، در حال حاضر برای نمک‌زدایی از آب شور یا آب دریا استفاده می‌شوند تا آب آشامیدنی یا آب آبیاری در مناطق خشک فراهم کنند (Abdullah et al., 2020; Alsumaiei, 2020; Ashour et al., 2015; Murase et al., 2008; Tony, 2022).

آب شیرین یکی از عناصر حیاتی برای بقای انسان است (Abujazar et al., 2016; Muthu Manokar et al., 2014). کمبود آب شیرین یکی از نگرانی‌های جدی در بسیاری از مناطق جهان، به‌ویژه در نواحی خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA) است، جایی که اغلب کشورها با اقلیم‌های خشک یا نیمه‌خشک روبه‌رو هستند (Khairy et al., 2022). رشد جمعیت چالش‌های مربوط به آب را به‌طور چشمگیری تشدید کرده و منجر به افزایش تقاضا و رقابت در بخش‌های مختلف مانند کشاورزی، خدمات شهری، مصارف خانگی، پایداری زیست‌محیطی و فعالیتهای صنعتی شده است (Kosari et al., 2024; Qadir et al., 2007). نیاز به آب شیرین به‌طور پیوسته در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه رو به افزایش است زیرا این منبع حیاتی نقش کلیدی در توسعه اقتصادی، رشد پایدار، سلامت اکوسیستم و بقای انسان دارد (Abdelal & Taamneh, 2017). یکی از چالش‌های اساسی پیش روی کشورهای در حال توسعه، شناسایی منابع پایدار و طراحی فرآیندهای نوآورانه‌ای است که بتوانند آب شیرین را با هزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه تأمین کنند، به‌ویژه برای جوامعی که در مناطق دورافتاده زندگی می‌کنند (Chen et al., 2021).

با توجه به چالش‌های ذکر شده، استفاده از منابع آب نامتعارف در کنار منابع آب متعارف در کاربردهای مختلف امری اجتناب‌ناپذیر است. منابع آب نامتعارف عبارت‌اند از آب دریا، رواناب‌های ناشی از بارندگی، زهاب کشاورزی، آب لب‌شور، آب مورد استفاده در سیستم‌های سرمایشی نیروگاه‌های حرارتی، پساب‌های صنعتی، فاضلاب خانگی و تخلیه‌های تجاری (Chen et al., 2021). تقریباً ۹۷ درصد از آب سطحی زمین در اقیانوس‌ها قرار دارد و شور است. تنها سه درصد باقی‌مانده شامل آب شیرین است که میان رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، یخچال‌های قطبی و یخچال‌های

⁴ Solar still desalination⁵ Electrodialysis¹ Multi-stage flash² Thermal vapor compression³ Reverse osmosis

(Murugavel *et al.*, 2013). تحقیقات نشان داده‌است که دماهای بالاتر دمای محیطی موجب افزایش بهره‌وری در تقطیرکننده‌های خورشیدی می‌شود (Ahsan *et al.*, 2014; Al-Hinai *et al.*, 2002; Babalola *et al.*, 2015; Hollands, 1963; Morse and Read, 1968; Xiao *et al.*, 2013; Yeh and Chen, 1986, 1985). به‌طور معمول مشاهده می‌شود که افزایش شوری باعث کاهش خروجی آب مقطر می‌شود (Akash *et al.*, 2000; Kalbasi and Esfahani, 2010; Rababa'h, 2003). عمق آب در حوضچه تأثیر زیادی بر خروجی آب تقطیرشده دارد. چندین مطالعه نشان داده‌اند که بهره‌وری هرم خورشیدی به‌طور معکوس با عمق آب در حوضچه مرتبط است (Murugavel *et al.*, 2008; Sathyamurthy *et al.*, 2014; Singh *et al.*, 2008; Tiwari and Tiwari, 2006; Tripathi and Tiwari, 2006).

درباره هرم‌های تقطیری خورشیدی تحقیقات گسترده‌ای شده است، اما همچنان فرصت‌های قابل‌توجهی برای پیشرفت این سیستم به‌منظور تولید آب شیرین در مقیاس بزرگ و باصرفه وجود دارد. با توجه به توزیع غیریکنواخت پارامترهای هواشناسی در سراسر جهان، ضروری است مطالعات عملکرد تقطیرکننده‌های خورشیدی در شرایط اقلیمی متنوع تکرار شود. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تحقیقات درباره بررسی اثر هم‌زمان شوری و عمق آب بر کارایی سیستم هرم‌های خورشیدی اندک است؛ مطالعات پیشین همچنین گویای این موضوع است که توسعه معادلات رگرسیونی برای تحلیل رابطه بین پارامترهای مؤثر بر بهره‌وری و عملکرد این هرم‌ها مورد توجه قرار بوده‌اند. به همین دلیل مطالعه تجربی به‌منظور ارزیابی عملکرد سیستم هرم‌های تقطیری خورشیدی تحت شرایط عملیاتی و هواشناسی مختلف در استان البرز، ایران در برنامه قرار گرفت. اقلیم خشک و نیمه‌خشک البرز، همراه با سطوح بالای تابش خورشیدی و کمبود شدید آب، تقطیر خورشیدی را به راه‌حلی پایدار و مناسب برای رفع مشکلات کم‌آبی در بخش‌های شرب و آبیاری در مقیاس کوچک تبدیل می‌کند. هدف‌های خاص این مطالعه عبارت‌اند از: (۱) تحلیل تأثیر سطوح مختلف شوری و عمق آب شور بر میزان آب

استفاده از هرم‌های تقطیری خورشیدی یکی از کارآمدترین روش‌های شیرین‌سازی شناخته می‌شود. این روش به دلیل ساختار ساده، پایین‌بودن هزینه عملیاتی، نیاز اندک به نگهداری و پایداری زیست‌محیطی اهمیت ویژه‌ای دارد (Elshamy and El-Said, 2018; He and Yan, 2009; Madeshwaren *et al.*, 2024; Sharshir *et al.*, 2019; Tony and Nabwey, 2024).

پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی وجود دارد که در آن‌ها عوامل مؤثر بر عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی برای تولید آب شیرین بررسی شده است. نتایج نشان داده است که بازدهی هرم‌های تقطیری خورشیدی تحت تأثیر سه عامل اصلی محیطی، عملیاتی و پارامترهای طراحی قرار دارد. شرایط محیطی شامل دمای محیط، تابش خورشیدی و سرعت باد می‌شود. شرایط عملیاتی متغیرهایی همچون عمق آب، استفاده از مواد رنگی، جهت‌گیری هرم‌ها، دمای آب شور ورودی و آب شور موجود در مخزن را در بر می‌گیرد (Hammoodi *et al.*, 2023). پارامترهای طراحی شامل شیب پوشش هرم‌ها، ساختار و مواد کاربردی به منظور احداث هرم‌ها، و طراحی غشاست (Muftah *et al.*, 2014). مطالعات متعدد به‌منظور بهبود بهره‌وری هرم‌های تقطیری خورشیدی نشان داده‌اند که راندمان تقطیرکننده خورشیدی به‌طور عمده تحت تأثیر اندازه سطح تبخیر و میزان ناحیه تابش آن قرار دارد (Abd Elaziz *et al.*, 2021; Palanikumar *et al.*, 2021). بسیاری از پژوهشگران با بررسی تأثیر تابش خورشیدی بر تولید آب شیرین سیستم‌ها نشان داده‌اند که بهره‌وری تقطیرکننده خورشیدی با افزایش تابش خورشیدی دریافتی افزایش می‌یابد (Aburideh *et al.*, 2012; Altarawneh *et al.*, 2017; Kamal, 1988; Khalifa and Hamood, 2009; Okeke *et al.*, 1990; Rahbar and Esfahani, 2012). هنگام بررسی تأثیر رطوبت نسبی در دماهای مختلف محیطی، مشاهده شده است که تولید آب تقطیرشده با افزایش رطوبت نسبی در دمای محیط مشخص کاهش می‌یابد (Lindblom and Nordell, 2006).

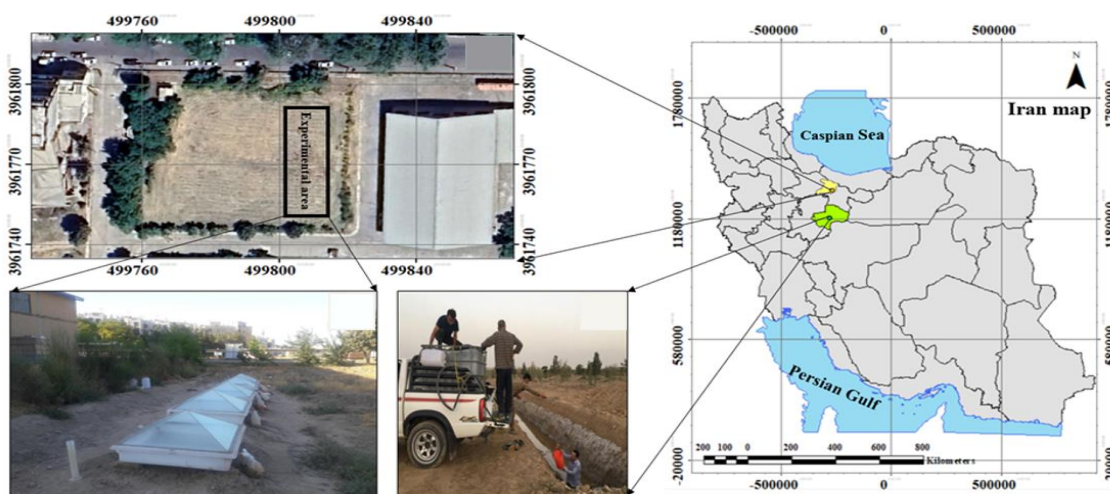
تبخیر و بارش روزانه است. بررسی داده‌های بلندمدت ایستگاه سینوپتیک کرج (مختصات جغرافیایی $35^{\circ} 80'$ شمالی و $50^{\circ} 59'$ شرقی، با ارتفاع ۱۲۹۲/۹ متر از سطح دریا) نشان داد که میانگین بارش سالانه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۱۰ برابر با ۲۵۲ میلی‌متر بوده است. میانگین دمای سالانه در این بازه ۱۹/۴ درجه سانتی‌گراد، میانگین رطوبت نسبی ۴۵ درصد و میزان تبخیر سالانه ۲۱۸۴ میلی‌متر ثبت شده است. بر اساس شاخص طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، این مقادیر نشان‌دهنده اقلیم نیمه‌خشک منطقه مطالعاتی هستند (E, 1926). با توجه به اینکه هرم‌های خورشیدی در محوطه دانشگاه تهران ساخته شده بودند، انتقال آن‌ها به استان‌های دیگر با پتانسیل عملکرد بالاتر به دلیل دما و شدت تابش خورشیدی بیشتر، مانند مناطق مرکزی ایران، امکان‌پذیر نبود. از این رو، منطقه مطالعاتی به‌عنوان یک ناحیه نماینده اقلیم نیمه‌خشک در نظر گرفته شد. محدوده مطالعاتی این پژوهش مساحتی معادل ۷۰ مترمربع (۲۰ متر $\times$ ۳/۵ متر) را شامل می‌شود. پیش از استقرار هرم‌ها، زمین با دقت تسطیح شد تا از هم‌سطح بودن بستر آزمایش اطمینان حاصل گردد. جهت قرارگیری تمامی هرم‌های خورشیدی در راستای شمال-جنوب تنظیم شد تا آن‌ها حداکثر دریافت انرژی خورشیدی را داشته باشند.

تقطیر یافته تولیدی توسط هرم‌های تقطیری خورشیدی، و (۲) توسعه مدل‌های رگرسیونی که شوری آب و عمق آب شور را با عملکرد سیستم مرتبط می‌سازند. این مطالعه نشان می‌دهد که با انتخاب و مدیریت مناسب پارامترها می‌توان کارایی سیستم‌های تقطیر خورشیدی را بدون نیاز به هزینه‌های اضافی ناشی از بخش طراحی هرم‌ها، تا حدودی افزایش داد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

به‌منظور ارزیابی کارایی تولید آب شیرین توسط هرم‌های تقطیری خورشیدی در شرایط مختلف شوری و عمق آب، یک مطالعه تجربی در مزرعه تحقیقاتی آب و خاک، وابسته به گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، واقع در کرج (مختصات جغرافیایی $35^{\circ} 81'$ شمالی و 50° شرقی) به‌اجرا درآمد. این منطقه در ارتفاع ۱۳۰۴ متری از سطح دریا قرار دارد (شکل ۱). برای بررسی شرایط اقلیمی منطقه مطالعاتی، داده‌های هواشناسی روزانه از ایستگاه سینوپتیک کرج برای دوره هیدرولوژیکی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۱ جمع‌آوری شد و تحلیل‌های اقلیمی بر اساس میانگین ۱۲ ساله این داده‌ها انجام گرفت. متغیرهای مورد بررسی شامل حداقل و حداکثر دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، میزان



شکل ۱- موقعیت محل آزمایش، محل جانمایی هرم‌های تقطیری خورشیدی در منطقه مطالعاتی و نحوه تامین آب شور از کانال زهکش

Figure 1- The location of the experimental site, the placement of solar distillation systems, and the method of supplying saline water from the drainage channel

تأمین آب شور

تغییر کیفیت زهاب به محل آزمایش انتقال داده شد. میزان شوری زهاب ذخیره‌شده در مخزن با استفاده از دستگاه هدایت الکتریکی‌سنج، که به‌طور دوره‌ای کالیبره شده بود، در آزمایشگاه کیفیت آب گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران اندازه‌گیری شد و مقدار آن ۴۲۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر ثبت گردید. مشخصات کیفی زهاب سنجش شده در آزمایشگاه کیفیت آب دانشگاه تهران، در جدول ۱ ارائه شده است. برای جلوگیری از تبخیر آب و کاهش اثرهای مخرب تابش خورشیدی بر مخزن، سطح بدنه آن با مقوای کارتنی ضخیم پوشانده شد. این اقدام به حداقل رساندن فرآیندهای تبخیری و واکنش‌های شیمیایی مؤثر بر تغییر شوری طی ماه‌های اجرای آزمایش کمک می‌کند.

منطقه مورد نظر برای تأمین آب شور هرم‌های خورشیدی، پارک جنگلی ثامن‌الائمه در استان قم است که در حدود ۸ کیلومتری شمال شرق مرکز شهر قم و در مختصات جغرافیایی ۳۴° ۳۸' شمالی و ۵۰° ۵۷' شرقی قرار دارد (شکل ۱). با توجه به اینکه تولید زهاب یکی از چالش‌های اصلی این منطقه محسوب می‌شود و آب مورد استفاده در کرج معمولاً دارای شوری کم و کیفیت بالایی است، در این مطالعه از زهاب شور موجود در سیستم زهکشی این پارک استفاده شد. پس از پر شدن مخزن ۱۰۰۰ لیتری با زهاب شور، این زهاب با استفاده از یک وسیله نقلیه مناسب و رعایت کلیه اقدامات احتیاطی برای جلوگیری از آلودگی یا

جدول ۱- مقادیر پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده زهاب جمع‌آوری شده از کانال زهکشی

Table 1- Measured quality parameter values of the drainage water collected from the drainage channel

مقادیر پارامترها Parameter Values	نماد Symbol	پارامتر Parameter	پی‌اچ
۷/۷	-	pH	
۴۲۰۰۰	$\mu\text{S cm}^{-1}$	Electrical Conductivity	هدایت الکتریکی
۹۶۲۵	Mg lit^{-1}	Total hardness as CaCO_3	سختی کل به‌صورت کلسیم کربنات
۱۴۸۹	Mg lit^{-1}	Magnesium (Mg^{2+})	منیزیم
۱۴۰۲	Mg lit^{-1}	Calcium (Ca^{2+})	کلسیم
۷۳۵۶	Mg lit^{-1}	Sodium (Na^+)	سدیم
۶۲۰۵	Mg lit^{-1}	Chlorine (Cl^-)	کلرید
۴۰۰۰	Mg lit^{-1}	Sulphate (SO_4^{2-})	سولفات
۲۵۱۶	Mg lit^{-1}	Bicarbonate (HCO_3^-)	بی‌کربنات

ساخت هرم‌های تقطیری خورشیدی

ذخیره و تبخیر می‌شود. پلی‌اتیلن به دلیل مقاومت شیمیایی بالا و قابلیت تحمل نوسان‌های دمایی به‌عنوان ماده اولیه انتخاب شد. به‌منظور افزایش جذب انرژی خورشیدی، سطح داخلی حوضچه با رنگ سیاه پوشانده شد که منجر به بهبود بهره‌وری در جذب انرژی حرارتی می‌شود. مخزن ذخیره آب شور با یک صفحه شیشه‌ای سکوریت با عبورپذیری ۹۱ درصد تابش خورشیدی پوشانده شد. این شیشه علاوه بر توانایی بالای خیس‌شدگی، موجب بهبود انتقال تابش و

در این مطالعه، هرم‌های تقطیری خورشیدی با طراحی شیب‌دار به‌منظور ارزیابی عملکرد فرآیند شیرین‌سازی در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک کرج و تحت سناریوهای مختلف عملیاتی ساخته شدند. ابعاد مخزن این هرم‌ها ۱×۱ متر و ارتفاع آن‌ها ۰/۱۸ متر در نظر گرفته شد. در بخش مرکزی هر هرم، یک محفظه مکعب مستطیل‌شکل از جنس پلی‌اتیلن با ضخامت شش میلی‌متر طراحی شد که آب شور در آن

هستند. شوری متوسط زهاب شور اندازه‌گیری شده در مخزن برابر با ۴۲۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری شد؛ بنابراین، برای دستیابی به سطوح شوری مشخص شده در هر سناریو لازم بود زهاب شور ذخیره‌شده با آب شیرین رقیق شود. حجم آب موردنیاز برای رقیق‌سازی در هر سناریو با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$EC_{mix} = \frac{EC_{DW} \times V_{DW} + EC_{FW} \times V_{FW}}{V_{DW} + V_{FW}} \quad (1)$$

در رابطه ۱: EC_{mix} شوری هدف در هر سناریو (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)، EC_{DW} شوری زهاب اندازه‌گیری شده با استفاده از دستگاه هدایت الکتریکی سنج در آزمایشگاه آبیاری گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)، EC_{FW} شوری آب مورد استفاده به‌منظور رقیق‌سازی (میکروزیمنس بر متر)، V_{DW} و V_{FW} به ترتیب حجم زهاب شور و آب موردنیاز شیرین برای رقیق‌سازی (لیتر) است.

اجرای آزمایش

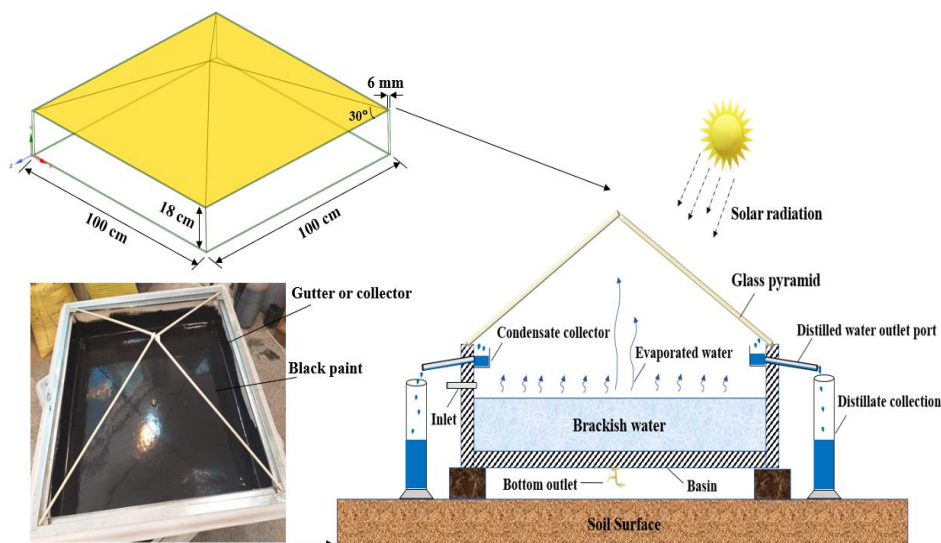
پس از استقرار هرم‌های خورشیدی، در مرحله اولیه و به‌منظور اعتبارسنجی عملکرد این تجهیزات، آب شور خارج از زمان آزمایش به داخل مخزن هرم‌ها اضافه شد تا حجم آب تولیدی از خروجی‌های هر هرم بررسی و ارزیابی شود. به‌منظور کاهش یا حذف تبخیر ناخواسته، تمامی درزهای موجود با استفاده از چسب آکواریوم و چسب سنگ به‌طور کامل پوشش داده شدند تا تلفات آب به حداقل برسد. پس از حصول اطمینان از عملکرد صحیح هرم‌ها، آزمایش‌های اصلی آغاز شد. آزمایش‌ها در دو فصل بهار و تابستان و در بازه‌های زمانی مشخص اجرا شدند. تولید روزانه آب شیرین از ساعت هشت صبح تا هشت شب و تولید شبانه از ساعت هشت شب تا هشت صبح روز بعد به‌طور دقیق اندازه‌گیری شد. این آزمایش‌ها در فصل بهار از تاریخ ۲ خرداد ۱۴۰۱ تا ۴ تیر ۱۴۰۱ و در فصل تابستان از ۱۱ مرداد ۱۴۰۱ تا ۲۵ شهریور ۱۴۰۱ اجرا گردید.

افزایش راندمان میعان می‌شود. زاویه ۳۰ درجه‌ای شیشه نسبت به افق بر اساس شرایط جغرافیایی و با هدف بهینه‌سازی جذب انرژی تابشی طراحی شده است. شیشه سکوریت مقاومت بالایی در برابر ضربه و تغییرات دما دارد. در کناره‌های داخلی مخزن، ناودان‌های کوچکی با مقطع مربعی از جنس آهن گالوانیزه و ضخامت یک میلی‌متر تعبیه شده‌اند که وظیفه جمع‌آوری آب تقطیرشده روی دیواره‌های شیشه‌ای را بر عهده دارند. این ناودان‌ها با شیب یک درصد طراحی شده‌اند و طول و ابعاد مقطع آن‌ها به ترتیب ۱۰۰ سانتی‌متر و دو سانتی‌متر است. آب جمع‌آوری شده از طریق شلنگ‌هایی با قطر ۳۰ میلی‌متر به مخزن خروجی سیستم منتقل می‌شود. در انتهای هر ناودان دو خروجی با قطر ۲۰ میلی‌متر تعبیه شده است تا آب تقطیرشده با کمترین هدررفت انتقال یابد. برای مدیریت نمک‌های تجمع‌یافته طی فرآیند، یک خروجی با قطر ۲۰ میلی‌متر در کف حوضچه نصب شده است. برای تأمین جریان یکنواخت آب شور و جلوگیری از ورود رسوبات به سیستم، یک ورودی با قطر ۲۰ میلی‌متر در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری از دیواره حوضچه طراحی شده است (شکل ۲).

تعریف سناریوهای آزمایش

در این پژوهش، آزمایش‌ها به‌منظور بررسی تأثیر عوامل عملیاتی (مانند عمق آب و شوری) و شرایط هواشناسی (شامل دما و تابش خورشیدی) بر عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی، تحت شرایط اقلیمی فضای باز در کرج، به‌اجرا در آمد. برای بررسی تأثیر عمق‌های مختلف آب شور در مخزن و سطوح مختلف شوری، سناریوهای متعددی تعریف شدند. سناریوهای عمق آب در سه سطح مختلف تعیین شدند که شامل D_1 (یک سانتی‌متر)، D_2 (سه سانتی‌متر)، و D_3 (پنج سانتی‌متر) هستند. علاوه‌براین، سناریوهای شوری در پنج سطح مختلف شامل S_1 ، S_2 ، S_3 ، S_4 و S_5 بررسی شدند که به ترتیب معادل شوری‌های ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰ و ۴۰۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر

ارزیابی بهره‌وری هرم‌های تقطیری خورشیدی تحت تأثیر سطوح مختلف شوری و عمق آب در منطقه نیمه خشک



شکل ۲- شکل شماتیکی از اجزاء و ابعاد هرم تقطیری خورشیدی و نمایی از یک هرم خورشیدی رنگ شده به منظور افزایش تبخیر
Figure 2 - Schematic representation of the pyramid solar still components and dimensions, along with an image of a colored solar pyramid designed to increase evaporation

۲۰ لیتر آب شور به آب شیرین کن‌ها اضافه شد (تیمارهای S₁D₂, S₂D₂, S₃D₂, S₄D₂ و S₅D₂). سرانجام با افزودن ۲۰ لیتر دیگر در دهه سوم، تأثیر سطوح مختلف شوری در همان عمق پنج سانتی‌متر بررسی شد (تیمارهای S₁D₃, S₂D₃, S₃D₃ و S₄D₃). به دلیل بالا بودن هزینه ساخت هرم‌های خورشیدی، امکان افزایش تعداد این هرم‌ها و اجرای هم‌زمان تمام تیمارهای شوری و عمق وجود نداشت؛ بنابراین، در هر دهه از فصل، تنها یک عمق مشخص آزمایش شد. باین‌حال، تحلیل داده‌های هواشناسی تفاوت معنادار را در شرایط آب و هوایی هر دهه از فصل بهار یا تابستان نشان نداد. تمامی تیمارها طبق سناریوهای تعریف شده اعمال شدند (شکل ۳) و حجم آب تقطیر شده روزانه برای هر تیمار به طور دقیق از خروجی‌های هرم‌های تیمارهای مختلف اندازه‌گیری شد.

تحلیل خطا

در این پژوهش، از ابزارهای مختلفی برای اندازه‌گیری تابش کل خورشیدی، دمای محیط و دمای آب شور استفاده شد. تمامی خطاهای احتمالی در این دستگاه‌ها در نظر گرفته

مراحل اجرای آزمایش به شرح زیر است: در دهه اول بهار تأثیر سطوح مختلف شوری در عمق پنج سانتی‌متر بررسی شد (تیمارهای S₁D₃, S₂D₃, S₃D₃, S₄D₃ و S₅D₃). در دهه دوم و پس از تخلیه ۲۰ لیتر آب شور از آب شیرین کن‌ها، تأثیر سطوح مختلف شوری در عمق سه سانتی‌متر ارزیابی شد (تیمارهای S₁D₂, S₂D₂, S₃D₂ و S₄D₂). و سرانجام در دهه سوم پس از تخلیه ۲۰ لیتر دیگر از زهاب شور داخل مخزن، تأثیر سطوح مختلف شوری در عمق یک سانتی‌متر بررسی شد (تیمارهای S₁D₁, S₂D₁, S₃D₁, S₄D₁ و S₅D₁). به منظور بررسی تأثیر شرایط آب و هوایی متفاوت، تمامی تیمارهای تعریف شده در فصل تابستان نیز تکرار شدند. این تیمارهای آزمایشی امکان بررسی تأثیرات هم‌زمان پارامترهای هواشناسی، شوری آب، و عمق‌های مختلف آب شور را فراهم کردند. روش اجرای آزمایش در تابستان بدین صورت است که ابتدا ۱۰ لیتر آب شور به آب شیرین کن‌ها اضافه و تأثیر سطوح مختلف شوری در عمق یک سانتی‌متر بررسی شد (تیمارهای S₁D₁, S₂D₁ و S₃D₁). پس از آن در دهه دوم تابستان برای ارزیابی تأثیر سطوح مختلف شوری در عمق سه سانتی‌متر،

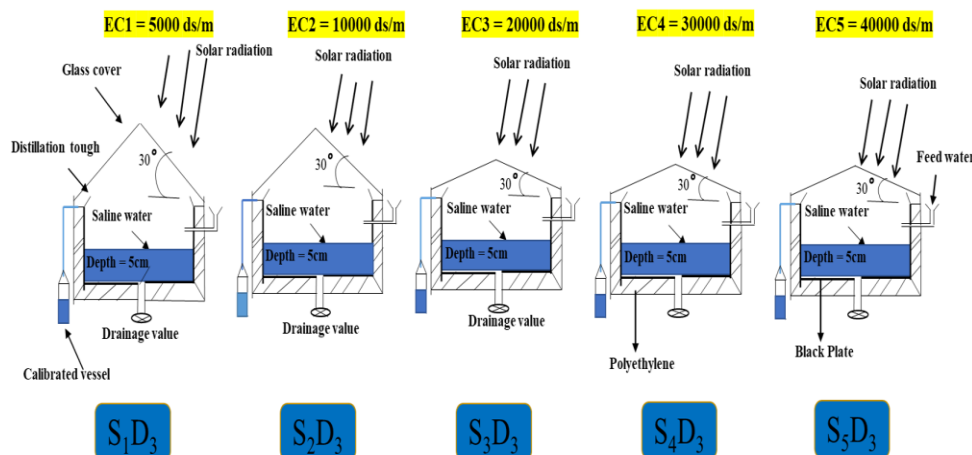
شده است زیرا این خطاها می‌توانند بر دقت نتایج تأثیرگذار باشند. این بخش به تفصیل به محاسبه خطاهای مربوط به دستگاه‌های اندازه‌گیری پرداخته است. به‌طور خاص، برای اندازه‌گیری دمای محیط، دمای آب شور، شدت تابش خورشیدی و میزان آب مقطر تولیدی، به‌ترتیب از نشانگر دما، دماسنج دیجیتال، تابش‌سنج و دو ظرف کالیبره‌شده استفاده شد. دمای محیط، شدت تابش خورشیدی و دمای آب شور به‌صورت ساعتی برای هر آب‌شیرین‌کن خورشیدی هرمی ثبت گردید و تولید آب مقطر نیز به‌طور دوره‌ای در همان بازه زمانی اندازه‌گیری شد. دقت ابزارهای اندازه‌گیری به‌کار رفته در این مطالعه در جدول ۲ آورده شده است. برای ارزیابی مدل‌های رگرسیونی ارائه شده برای شوری و عمق به‌منظور پیش‌بینی عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی از

دو معیار ضریب تعیین (R^2) و خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) استفاده شد تا دقیق‌ترین مدل برای پیش‌بینی عملکرد سامانه‌های هرم تقطیری خورشیدی شناسایی گردد.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

در این دو رابطه: n تعداد داده‌ها، O_i و S_i به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده، $\bar{O}$ و $\bar{S}$ به‌ترتیب میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده، $\hat{y}_i$ مقدار مشاهده شده (واقعی) و y_i مقدار پیش‌بینی شده است.



شکل ۳ - شکل شماتیکی از فرآیند اجرای آزمایش در دهه اول بهار شامل شوری‌های مختلف با عمق ثابت پنج سانتی‌متر
Figure 3 - Schematic representation of the experiment performed in early spring, involving various salinity levels at a fixed water depth of 5 cm

جدول ۲ - دقت و درصد خطا برای ابزارهای اندازه‌گیری در این مطالعه

Table 2 - Precision and error percentage of the measuring devices employed in the research				
محدوده خطا Error range	دقت Precision	واحد Unit	پارامتر Parameter	دستگاه Device
۰ تا ۲۰۰۰	±۱	W m ⁻²	شدت تابش خورشیدی	تابش‌سنج (Pyranometer)
۰ تا ۶۰	±۰/۱	°C	دمای محیط	نشانگر دما (Temperature indicator)
-۵۰ تا ۳۰۰	±۰/۳	°C	دمای محیط و آب شور	دماسنج دیجیتال (Digital thermometer)
۱۰۰۰	±۲	mL	تولید آب مقطر	ظروف کالیبره (Calibrated vessel)

نتایج و بحث

نسبت‌های محاسبه‌شده برای رقیق‌سازی

برای دستیابی به شوری‌های هدف در هر تیمار، حجم آب شیرین موردنیاز به‌منظور مخلوط شدن با زهاب شور با دقت محاسبه شد. جدول ۳ میزان حجم آب شیرین موردنیاز برای رقیق‌سازی در هر تیمار را نمایش می‌دهد. نتایج به‌دست آمده حاکی است برای کاهش شوری زهاب از ۴۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر به ۵۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، حجم آب شیرین موردنیاز به‌طور قابل‌توجهی با افزایش عمق آب تغییر کرده است. برای عمق پنج سانتی‌متر، این مقدار به‌ترتیب ۹۴، ۶۷، ۴۰ و ۱۳ درصد افزایش داشته است. این روند در دیگر عمق‌های آب شور نیز مشاهده شده اما با کاهش عمق، حجم آب شیرین موردنیاز برای رقیق‌سازی کاهش یافته است. این کاهش، به‌ویژه در مناطقی که با بحران کمبود آب مواجه هستند، اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا در این مناطق منابع اصلی آب معمولاً شور هستند. برای بررسی دقیق‌تر، تأثیر عمق‌های مختلف آب شور و شوری‌های بالاتر بر میزان تبخیر مطالعه گردید تا مشخص شود کدام عمق و سطح شوری بیشترین بازدهی را در تولید آب شیرین دارد. نتایج این تحلیل‌ها می‌تواند در طراحی و مدیریت بهینه سامانه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی در شرایط کم‌آبی مؤثر باشد و بهره‌وری منابع آبی را در مناطق خشک و بیابانی افزایش دهد. در صورت استفاده از سیستم‌های هرم تقطیری خورشیدی در بخش کشاورزی و شرب، میزان حجم آب شیرین تولیدی روزانه اهمیت بالایی دارد. با توجه به پایین بودن هزینه این سیستم‌ها، امکان بهره‌گیری از آن‌ها در مزارع کوچک‌مقیاس و برای کشت گیاهان کم‌آبر و مقاوم به شوری وجود دارد. با این حال به دلیل بهره‌وری پایین این سامانه‌ها، بسته به نوع گیاه هدف، می‌توان از ترکیب آب شیرین تولیدی با آب شور موجود در مناطقی استفاده کرد که دارای منابع آب شور فراوان هستند. این رویکرد باعث بهبود کیفیت آب آبیاری می‌شود و امکان استفاده کارآمدتر

از منابع آبی را فراهم می‌کند. بنابراین، در نظر گرفتن تمامی این عوامل در به‌کارگیری این سیستم در بخش کشاورزی می‌تواند منجر به بهینه‌سازی تولید روزانه آب شیرین و افزایش بهره‌وری سامانه‌های آبیاری شود. الکادی والشیبینی (El-Kady and El-Shibini, 2001) با مطالعه تجربی به‌منظور ارزیابی کارایی سیستم‌های تقطیری خورشیدی هرمی در مصر برای تصفیه زهاب کشاورزی و استفاده از آن در آبیاری تکمیلی، این سیستم را به‌عنوان راهکاری پیشنهادی برای نمک‌زدایی ساده در کنار آبیاری قطره‌ای معرفی کردند. یافته‌های این پژوهش بر اهمیت بهره‌گیری از منابع آب غیرمتعارف، ازجمله بازچرخانی زهاب کشاورزی، استفاده از پساب تصفیه‌شده و به‌کارگیری فرآیندهای ساده نمک‌زدایی مبتنی بر انرژی خورشیدی تأکید دارد. علاوه‌براین، پیشنهاد شده است که سامانه یکپارچه آب‌شیرین‌کن خورشیدی و آبیاری قطره‌ای در مناطقی که با منابع آب شور و بارندگی اندک مواجه هستند، مورد آزمایش قرار گیرد، به‌ویژه در شرایطی که ملاحظات اجتماعی-اقتصادی بر معیارهای فنی-اقتصادی اولویت دارند. علاوه‌براین، در پژوهش‌های سلامه و همکاران (Salama et al., 2024) تأثیر رژیم‌های مختلف کم آبیاری بر رشد گیاه لوبیا سبز، کارایی مصرف آب (WUE) و بهره‌وری آب (WP) بررسی نشان داده‌شده است که افزایش دسترسی به آب آبیاری موجب بهبود ویژگی‌های رشدی، عملکرد محصول و افزایش جذب عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، و پتاسیم (NPK) در بخش‌های مختلف گیاه می‌شود. بررسی نسبت ایزوتوپی $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ بیانگر آن است که نیتروژن جذب‌شده از کود در اندام‌های مختلف گیاه، تحت شرایط آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت نگهداشت آب در خاک)، در غلاف‌ها بیشترین مقدار را دارد و پس از آن در ساقه‌ها و ریشه‌ها مشاهده می‌شود. بنابراین، مطالعات جامع‌تری روی سیستم‌های تقطیری خورشیدی توصیه می‌شود تا کارایی این سامانه‌ها در تأمین بخشی یا کل نیاز آبیاری گیاهان،

به‌ویژه در مناطقی با کمبود منابع آب شیرین و وفور آب شور به شکلی دقیق‌تر ارزیابی شود.

تغییرات ساعتی تابش خورشیدی، دمای محیط و آب مخزن

به‌منظور بررسی تغییرات دمایی، دمای آب مخزن و محیط با استفاده از دماسنج دیجیتال اندازه‌گیری شد. شکل ۴ تغییرات دمای آب و محیط را در روزهای مشخص شده از فصل‌های بهار و تابستان، در ارتباط با ساعات روز، نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که دمای محیط طی روزهای مختلف آزمایش و بین دو فصل مورد بررسی تفاوت قابل‌توجهی دارد. از آنجا که دمای هوا از عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد هرم‌های خورشیدی محسوب می‌شوند، نوسان‌های روزانه این پارامترها تأثیر مستقیمی بر میزان تولید آب شیرین در این سامانه‌ها دارد. مقادیر دمای محیط مشخص‌شده در شکل ۴، در فصل بهار از تاریخ ۱۴۰۱/۰۳/۳۰ تا ۱۴۰۱/۰۳/۰۶ و در فصل تابستان از تاریخ ۱۴۰۱/۰۵/۱۴ تا ۱۴۰۱/۰۶/۱۹ نشان داده شده است. در این مطالعه، در کل دوره آزمایش حداکثر دمای محیط برابر با ۴۰/۷۱ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است.

مطابق شکل ۴ بیشترین دمای محیط در هر دو فصل در بازه ۱۲ ظهر تا ۳ بعدازظهر رخ داده است، درحالی‌که با کاهش تابش خورشیدی در ساعات بعدازظهر، دمای محیط به‌تدریج کاهش یافته است. بررسی تغییرات دمای محیط در بهار و تابستان نشان داد که در تاریخ ۶ خرداد، دمای محیط از ۱۷/۸ درجه سانتی‌گراد در ساعات اولیه صبح آغاز شده و تا ظهر به حداکثر مقدار ۲۸ درجه سانتی‌گراد رسیده است. در حالی که در اواخر خرداد نوسان‌های دمایی کاهش یافته و در تاریخ ۳۰ خرداد دمای محیط از ۲۶/۱ درجه سانتی‌گراد در اوایل صبح به ۳۴ درجه سانتی‌گراد در ظهر افزایش یافته است. در فصل تابستان، دمای محیط به‌طور میانگین ۲ تا ۵ درجه بیشتر است و در برخی روزها، حداکثر دما تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد نیز افزایش یافته است. روند کاهش دما پس از ظهر در هر دو فصل مشابه است اما در تابستان دمای محیط در مقادیر بالاتری حفظ شده است. بنابراین، یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر تولید آب شیرین در هرم‌های خورشیدی اختلاف دمای بین آب و پوشش شیشه‌ای است. این اختلاف دما به‌عنوان نیروی محرک فرآیند نمک‌زدایی عمل می‌کند، به‌طوری‌که افزایش آن منجر به بهبود میزان تبخیر و افزایش بازده تولید آب شیرین می‌شود.

جدول ۳ - حجم محاسبه شده زهاب شور و آب شیرین مورد نیاز در تیمارهای مختلف هرم تقطیری خورشیدی
Table 3 - Calculated volume of saline drainage water and required freshwater in different treatments of the solar distillation system

شوری موردنظر ($\mu\text{S cm}^{-1}$) Desired salinity	عمق آب مخزن (cm) Depth of water	تیمار Treatment	حجم آب شیرین (L) Volume of freshwater	حجم آب شور (L) Volume of saline water
۴۰۰۰	۵	S ₅ D ₃	۲/۴	۴۷/۶
۳۰۰۰		S ₄ D ₃	۱۴/۳	۳۵/۷
۲۰۰۰		S ₃ D ₃	۲۶/۲	۲۳/۸
۱۰۰۰		S ₂ D ₃	۳۸/۱	۱۱/۹
۵۰۰		S ₁ D ₃	۴۴/۰	۶/۰
۴۰۰۰	۳	S ₅ D ₂	۱/۴	۲۸/۶
۳۰۰۰		S ₄ D ₂	۸/۶	۲۱/۴
۲۰۰۰		S ₃ D ₂	۱۵/۷	۱۴/۳
۱۰۰۰		S ₂ D ₂	۲۲/۸	۷/۲
۵۰۰		S ₁ D ₂	۲۶/۴	۳/۶
۴۰۰۰	۱	S ₅ D ₁	۰/۵	۹/۵
۳۰۰۰		S ₄ D ₁	۷/۲	۲/۸
۲۰۰۰		S ₃ D ₁	۴/۸	۵/۲
۱۰۰۰		S ₂ D ₁	۲/۴	۷/۶
۵۰۰		S ₁ D ₁	۱/۲	۸/۸

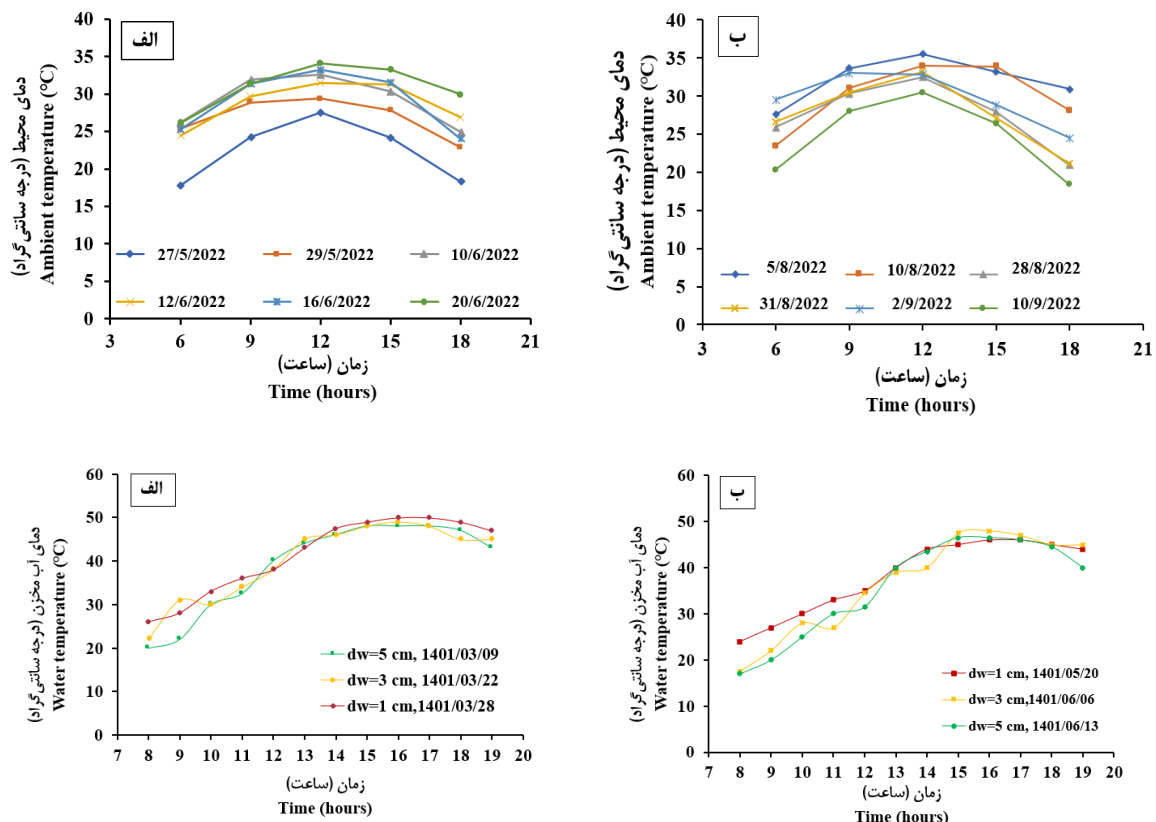
کمترین عمق (۰/۰۲ متر) از آب در هرم تقطیری خورشیدی است. مانوکار و همکاران (Manokar *et al.*, 2020) تأثیر عمق آب و شرایط عایق‌بندی را بر عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی هرمی بررسی کردند. در این مطالعه، عمق آب از ۱ تا ۳/۵ سانتی‌متر تغییر داده شد و تأثیر آن بر تولید آب شیرین با عایق و بدون عایق بررسی گردید و نشان داده شد بیشترین تولید آب شیرین در عمق یک سانتی‌متر در هر دو حالت با عایق و بدون عایق است. در شرایط بدون عایق تولید آب شیرین به ترتیب برابر با ۳/۲۷، ۲/۹۳، ۲/۲۶ و ۱/۵۹ کیلوگرم بر مترمربع برای عمق‌های ۱، ۲، ۳ و ۳/۵ سانتی‌متر مشاهده شد. اشان و همکاران (Ahsan *et al.*, 2014) یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی کم‌هزینه را برای استفاده در مناطق روستایی و ساحلی به منظور تبدیل آب شور به آب آشامیدنی توسعه دادند و بهره‌وری آب را با تغییر عمق‌های آب (۱/۵، ۲/۵ و ۵ سانتی‌متر) ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که بهره‌وری آب به‌طور معکوس با عمق آب نسبت دارد. تیواری و تیواری (Tiwari and Tiwari, 2006) نیز تأثیر عمق آب‌ها را بر انتقال حرارت و جرم در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی در شرایط اقلیمی تابستانی بررسی کردند و دریافتند که برای حداقل عمق آب، به دلیل افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی و تبخیر، بهره‌وری بالاتری حاصل می‌شود.

عملکرد سیستم تقطیری خورشیدی عمدتاً با مقدار آب شیرین تولید شده تعیین می‌شود که به شدت به تابش خورشیدی، دمای محیط و زاویه پوشش‌های شیشه‌ای نسبت به افق بستگی دارد (Hammoody *et al.*, 2023; Jathar *et al.*, 2022). تابش خورشیدی ورودی مهم‌ترین عامل اقلیمی مؤثر بر عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی است. این تابش منبع اصلی تأمین انرژی حرارتی محسوب می‌شود و تأثیر مستقیمی بر راندمان فرآیند تقطیر دارد. از نظر تئوری، شدت تابش خورشیدی با حداکثر میزان تولید آب مقطر در واحد

بررسی تغییرات دمای آب در عمق‌های مختلف یک، سه و پنج سانتی‌متر نشان داد که با کاهش عمق، میزان جذب انرژی خورشیدی و افزایش دما سریع‌تر اتفاق می‌افتد. در عمق یک سانتی‌متری، دمای آب در ساعات ظهر به حداکثر مقدار خود (۵۰ درجه سانتی‌گراد) رسید درحالی‌که در عمق‌های بیشتر افزایش دما تدریجی‌تر بود. این یافته‌ها تأثیر مستقیم عمق آب را بر میزان تبادل حرارتی و جذب انرژی خورشیدی تأیید می‌کند. بالاترین دمای آب در تاریخ‌های ۲۹ خرداد و ۲۱ مرداد، به ترتیب در بهار و تابستان ثبت شد. این نتایج نشان می‌دهد که کنترل عمق آب و بهینه‌سازی زمان‌بندی برداشت انرژی خورشیدی می‌تواند عملکرد سیستم‌های تقطیر خورشیدی را بهبود بخشد. نتایج پژوهش‌های ساتیامورتی و همکاران (Sathyamurthy *et al.*, 2014) نشان داد که عمق آب تأثیر قابل‌توجهی بر تغییرات دمایی و عملکرد هرم‌های خورشیدی دارد. با کاهش عمق آب، دمای آن سریع‌تر افزایش و کاهش یافت و حداکثر دما در کمترین عمق (۰/۰۲ متر) مشاهده شد. این امر منجر به افزایش میزان تبخیر و بهبود فرآیند تقطیر شد. در عمق‌های بیشتر، اثر ذخیره‌سازی گرما موجب افزایش دمای آب در ساعات بعدازظهر گردید. علاوه‌براین، کاهش عمق آب باعث افزایش ضریب انتقال حرارت تبخیری و در نتیجه افزایش عملکرد حرارتی سامانه شد. راجامانیکام و راگوپاتی (Rajamanickam and Ragupathy, 2012) با بررسی تأثیر عمق‌های مختلف آب مخزن هرم‌های تقطیری خورشیدی بر انتقال حرارت و تولید نشان دادند بیشترین حجم آب تولیدی در کمترین عمق (۰/۰۱ متر) برابر با ۳/۰۷ لیتر بر مترمربع در روز است. در مطالعه‌ای دیگر توسط فدا‌تار و ورما (Phadatare and Verma, 2007) تأثیر عمق آب بر انتقال حرارت و جرم داخلی در آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلاستیکی بررسی گردید و نتایج نشان داد که حداکثر میزان تولید آب تقطیرشده برابر با ۲/۱ لیتر بر متر مربع در روز در

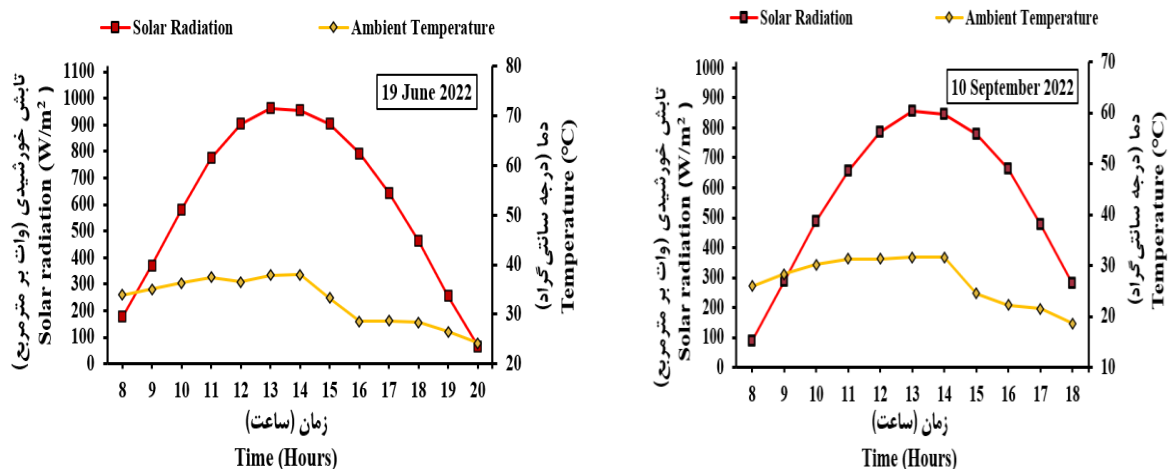
همان‌طور که در شکل ۵ نمایش داده شده است، تابش خورشیدی نیز در هر دو دوره آزمایشی در حوالی ظهر به اوج خود می‌رسد و پس از آن به تدریج کاهش می‌یابد. روند تغییرات دما نشان می‌دهد که دما در هر دو فصل با گذر زمان افزایش یافته است و در ساعات بعد از ظهر به حداکثر مقدار خود رسیده و سپس کاهش یافته است. بنابراین، یافته‌ها حاکی از آن است که در فصل تابستان، به دلیل افزایش دمای محیط و شدت تابش خورشیدی، دمای آب نیز به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که بیشترین افزایش دمای آب با کاهش عمق آب شور همراه است. این امر نشان‌دهنده رابطه معکوس میان عمق آب شور و دمای آب است، به‌طوری‌که کاهش عمق آب شور منجر به افزایش بیشتر دمای آن و افزایش تولید آب شیرین می‌شود.

سطح رابطه مستقیم دارد. برای برآورد دقیق بازده روزانه، تعیین ساعات تابش خورشید ضروری است تا مقدار کل انرژی تابشی روزانه محاسبه و در تحلیل عملکرد سیستم لحاظ شود. تغییرات ساعتی دمای محیط و شدت تابش خورشیدی در روزهای آزمایشی تعیین شده برای آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی هر می‌شکل با پوشش شیشه‌ای و عمق آب پنج سانتی‌متر در شکل ۵ ارائه شده است. داده‌های میدانی جمع‌آوری شده در دو تاریخ ۲۹ خرداد (۱۹ ژوئن) و ۱۹ شهریور (۱۰ سپتامبر) نشان می‌دهد که شدت تابش خورشیدی در خردادماه در بازه‌ای بین ۷۷ تا ۹۶۵ وات بر مترمربع و در شهریورماه در محدوده ۸۷ تا ۸۵۶ وات بر مترمربع متغیر بوده است. به‌طور مشابه، دمای محیط در خردادماه بین ۲۷ تا ۳۸/۴ درجه سانتی‌گراد و در شهریورماه بین ۱۸/۶ تا ۳۱/۶ درجه سانتی‌گراد نوسان داشته است.



شکل ۴ - تغییرات دمای محیط و آب شور موجود در مخزن به صورت ساعتی در روزهای خاص آزمایش در (الف) بهار و (ب) تابستان
Figure 4 - Hourly variations of ambient temperature and saline water temperature in the reservoir during selected test days in (a) spring and (b) summer.

ارزیابی بهره‌وری هرم‌های تقطیری خورشیدی تحت تأثیر سطوح مختلف شوری و عمق آب در منطقه نیمه خشک



شکل ۵ - تغییرات ساعتی دمای محیط و شدت تابش خورشیدی در روزهای آخر ماه‌های خرداد و شهریور

Figure 5- Hourly variations of ambient temperature and solar radiation intensity on the final days of the months of Khordad (June) and Shahrivar (September)

سانتی‌گراد در دمای محیط، آب شیرین تولیدی را به میزان ۸/۲ درصد افزایش می‌دهد. تحقیقات متعدد دیگری نیز اثر تابش خورشیدی را بر عملکرد سیستم بررسی کرده‌اند و به‌طور مداوم نشان داده‌اند که بهره‌وری آب شیرین‌کن‌های خورشیدی با افزایش تابش خورشیدی افزایش می‌یابد (Altarawneh *et al.*, 2017; Hammoodi *et al.*, 2023; Kamal, 1988; Sampathkumar *et al.*, 2010).

از آنجا که پارامترهای هواشناسی دیگری مانند سرعت باد و رطوبت نسبی نیز بر عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی تأثیرگذار هستند، تحقیقات بیشتر برای ارزیابی تأثیر این عوامل بر تولید آب شیرین توسط هرم‌ها در منطقه مطالعاتی کرج ضروری است که در این پژوهش تنها به بیان تأثیر این دو پارامتر بر خروجی هرم‌ها پرداخته شده است. کوفی و همکاران (Koffi *et al.*, 2009) گزارش کردند که در اکثر آزمایش‌های پیشین مربوط به هرم‌های خورشیدی، رطوبت نسبی بین ۴۰ تا ۶۵ درصد متغیر و کمترین مقدار ثبت شده ۴۰ درصد بوده است. این محققان همچنین نشان دادند که با افزایش رطوبت نسبی در دمای محیطی ثابت، میزان تولید آب تصفیه شده کاهش می‌یابد. این کاهش عمدتاً به دلیل ضریب انتقال حرارت همرفتی پایین بین هرم

روندهای مشاهده شده در تغییرات پارامترهای هواشناسی، همبستگی قابل توجهی با نتایج مطالعات تجربی پیشین نشان می‌دهند (Abdelal and Taamneh, 2017; Manokar *et al.*, 2020; Prakash and Jayaprakash, 2021; Sharshir *et al.*, 2019). در مطالعات متعدد تأثیر پارامترهای اقلیمی بر عملکرد آب شیرین‌کن‌های خورشیدی بررسی و نشان داده شده است این پارامترها مستقیماً بر بهره‌وری آب شیرین‌کن‌های خورشیدی تأثیر می‌گذارند. برای نمونه، افزایش دما باعث افزایش بهره‌وری آب شیرین‌کن خورشیدی می‌شود (Arunkumar *et al.*, 2012; Muftah *et al.*, 2014; Tripathi and Tiwari, 2004). Xiao *et al.*, (2013) گزارش کردند که میزان تولید آب شیرین‌کن تقطیری خورشیدی با افزایش اختلاف دما بین مخزن و پوشش تقطیر افزایش می‌یابد و افزایش دمای هوای محیط به‌طور جزئی بازده سیستم‌های تقطیری خورشیدی را بهبود می‌بخشد. به‌طور خاص افزایش ۱۰ درجه فارنهایت در دمای هوا معمولاً منجر به افزایش تقریباً پنج درصد در بازده می‌شود (Madeshwaren *et al.*, 2024). بررسی‌های الهینای و همکاران (Al-Hinai *et al.*, 2002) نیز این یافته‌ها را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد افزایش ۱۰ درجه

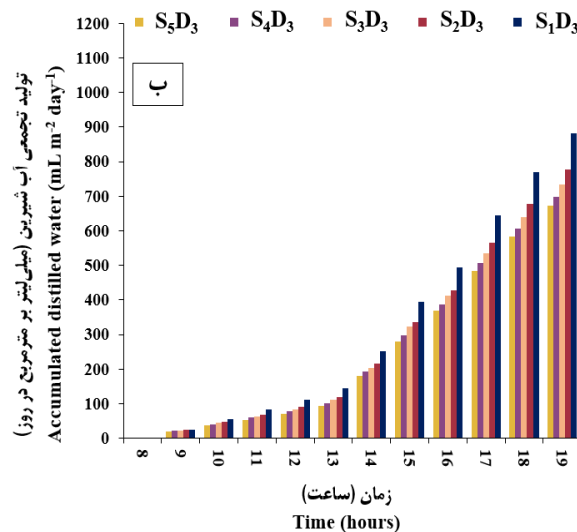
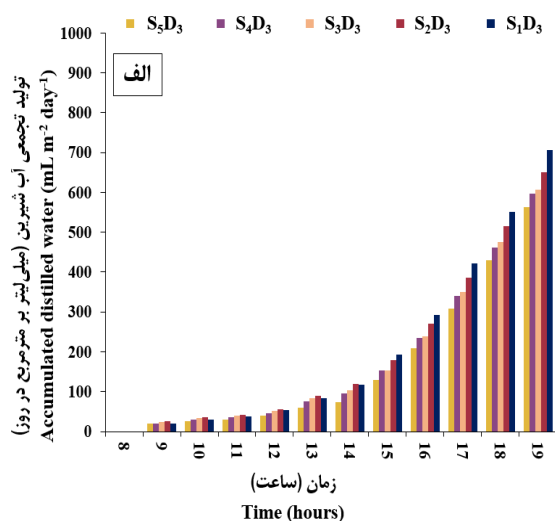
خورشیدی و محیط اطراف و کاهش دمای بخار اشباع درون هرم است (Lindblom and Nordell, 2006; Murugavel *et al.*, 2013). سرعت باد می‌تواند دو اثر متضاد بر هرم‌ها با پوشش شیشه‌ای داشته باشد. از یک سو می‌تواند باعث تسریع در دفع گرما از سطح شیشه‌ای شود، که در نتیجه دمای آن را کاهش و میزان میعان و تبخیر را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر سرعت بالای باد ممکن است منجر به افزایش اتلاف حرارت سیستم از طریق همرفت شده و در نتیجه میزان تبخیر آب را کاهش دهد. تحقیقات مختلف نتایج متفاوتی را در مورد تأثیر باد بر راندمان آب شیرین‌کن‌های خورشیدی نشان داده‌اند (Rahbar and Esfahani, 2012). با کاهش دمای پوشش، بهره‌وری سیستم افزایش می‌یابد، زیرا اختلاف دما بین شیشه و آب بیشتر می‌شود و جریان هوای داخلی بهبود می‌یابد. افزایش سرعت باد باعث تشدید تبادل حرارتی تبخیری و همرفتی بین آب درون هرم و اتمسفر می‌شود و این تبادل حرارتی اثر منفی سرعت بالای باد را تا حدی جبران می‌کند (Tiwari *et al.*, 2009). نگاراجان و همکاران (Nagarajan *et al.*, 2017) به‌صورت تئوری تأثیر جریان هوا بر کل سطح شیشه‌ای یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی هرمی شکل به‌منظور ارزیابی افزایش تولید آب شیرین بررسی کردند. نتایج بررسی نشان داد که با افزایش سرعت هوا به حداکثر مقدار خود (۴۰ متر بر ثانیه)، میزان تولید آب شیرین به‌طور قابل‌توجهی تا ۱۰/۱ کیلوگرم بر مترمربع افزایش می‌یابد. در شرایط واقعی، بهره‌وری تولید آب شیرین به سرعت طبیعی باد وابسته است و نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت باد از ۰/۵ به ۴ متر بر ثانیه، تولید آب را تا ۱۰۴ درصد افزایش می‌دهد. ساتیامورتی و همکاران (Sathyamurthy *et al.*, 2014) تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی هرمی شکل بررسی کردند و نشان دادند افزایش سرعت باد از ۱/۵ به ۴/۵ متر بر ثانیه موجب افزایش ۱۵/۵ درصد در تولید آب شیرین می‌شود.

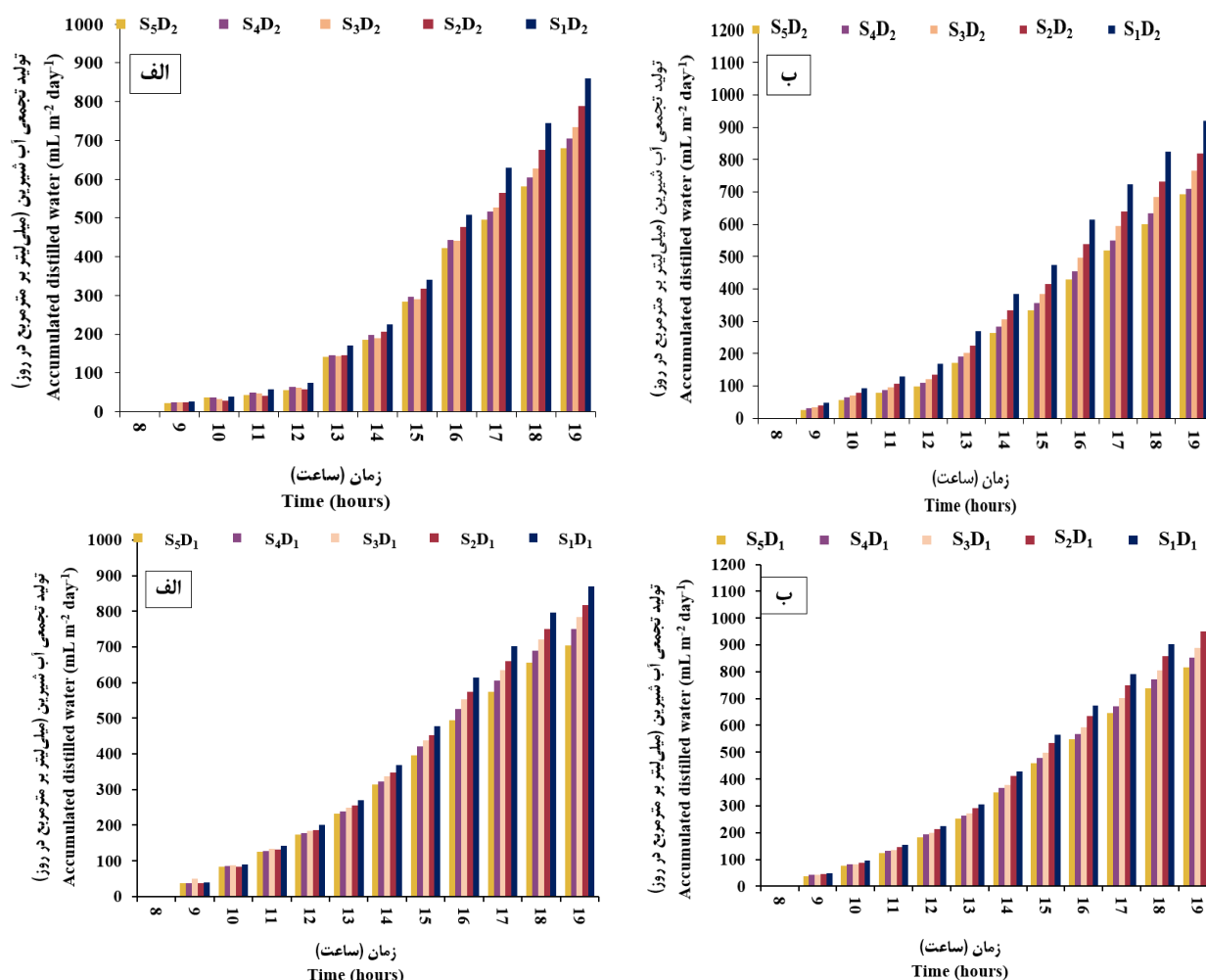
تغییرات تجمعی عملکرد تولیدی تیمارهای آزمایش

میزان تولید تجمعی روزانه آب شیرین در آب‌شیرین‌کن تقطیری خورشیدی هرمی در شکل ۶ ارائه شده است. این شکل میزان تولید تجمعی آب شیرین را در دو بازه زمانی آزمایش شامل (الف) بهار و (ب) تابستان نمایش می‌دهد. متغیرهای بررسی‌شده در این مطالعه شامل پنج سطح شوری (S_1 تا S_5) و سه عمق آب شور (D_1 تا D_2) درون مخزن هرم‌های تقطیری خورشیدی هستند. روند تغییرات عملکرد سیستم در ساعات مختلف روز، از ساعت ۸ تا ۱۹، به‌روشنی در شکل ۶ مشاهده می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد که تولید آب شیرین در ساعات ابتدایی روز به‌آرامی از صفر افزایش می‌یابد و بعد از ظهر به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این تأخیر اولیه در فرآیند تولید ناشی از زمان لازم برای گرم شدن آب و رسیدن آن به دمای مناسب برای تبخیر است. در ساعات بعدازظهر، هم‌زمان با کاهش شدت تابش خورشیدی، میزان تولید آب مقطر نیز روند کاهشی دارد. این الگوی تغییرات نشان‌دهنده وابستگی مستقیم عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی به شدت تابش خورشیدی و شرایط محیطی است. نتایج بررسی‌ها نشان داد که با افزایش شوری از ۵۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، میزان تولید تجمعی آب شیرین در هر دو فصل بهار و تابستان کاهش یافته است. میزان کاهش تولید تجمعی در ساعت اوج تولید آب شیرین برای عمق پنج سانتی‌متر و در شوری‌های ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰ و ۴۰۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، در مقایسه با شوری ۵۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، به‌ترتیب برابر با ۸، ۱۴، ۱۵ و ۲۰ درصد بوده است. این روند کاهش مشابه، با افزایش شوری از تیمار S_1 تا S_5 ، نشان‌دهنده کاهش تجمعی حجم آب شیرین تولیدی به میزان ۱۲، ۱۷، ۲۱ و ۲۴ درصد است. حجم تجمعی روزانه تولید آب شیرین در هرم‌های خورشیدی در فصل بهار و در ساعت ۱۹ برای عمق پنج سانتی‌متر و در

به‌طور میانگین، در تمامی عمق‌ها و در هر دو فصل بهار و تابستان، اختلاف عملکرد بین تیمارهای S_1 و S_5 در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد برآورد شد که نشان‌دهنده اثر قابل توجه شوری بر فرآیند تبخیر است. این یافته بیانگر آن است که برای افزایش بازده سیستم‌های تقطیری هرمی شکل، کاهش شوری آب ذخیره‌شده می‌تواند راهکاری مؤثر باشد. علاوه‌براین، افزایش عمق آب از یک به پنج سانتی‌متر، در فصل تابستان و در شوری ثابت ۵۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، منجر به کاهش میزان تولید آب شیرین از ۱۰۰۱ به ۸۸۱ میلی‌لیتر بر مترمربع در روز شد که نشان‌دهنده کاهش ۱۲ درصد در تولید آب شیرین با افزایش عمق آب شور است. این روند کاهشی در تمامی ساعات روز، فصل‌ها و شرایط شوری مشابه مشاهده شد. به‌طور کلی، نتایج تحقیق نشان می‌دهد در هر دو مجموعه داده‌های مربوط به بهار و تابستان، روند کاهش عملکرد با افزایش شوری و عمق آب مشاهده می‌شود، اما عملکرد کلی سیستم در تابستان بالاتر است. این افزایش عملکرد در تابستان عمدتاً به دلیل شدت بیشتری بودن تابش خورشیدی و دمای بالاتر محیط است که منجر به افزایش میزان تبخیر می‌شود.

شوری‌های S_1 تا S_5 به‌ترتیب برابر با ۷۰۶، ۶۵۱، ۶۰۷، ۵۹۷ و ۵۶۴ میلی‌لیتر بر مترمربع در روز اندازه‌گیری شد. این مقادیر در تابستان تحت شرایط عمق و شوری مشابه به‌ترتیب ۸۸۲، ۷۷۶، ۷۳۴، ۶۹۸ و ۶۷۳ میلی‌لیتر بر مترمربع در روز بوده است که نشان‌دهنده تأثیرات قابل توجه شرایط محیطی بر عملکرد سیستم‌های تقطیری هرمی شکل است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، حجم تجمعی آب شیرین تولیدی در عمق سه سانتی‌متر، با افزایش شوری از تیمارهای S_1 تا S_5 ، در فصل بهار به‌ترتیب برابر با ۸۵۹، ۷۸۸، ۷۳۴، ۷۰۴ و ۶۸۰ میلی‌لیتر بر مترمربع در روز بوده است. مقایسه این مقادیر با تولید آب شیرین در عمق پنج سانتی‌متر، تحت شرایط محیطی مشابه، نشان‌دهنده افزایش میانگین ۱۷ درصد در تولید آب شیرین در عمق سه سانتی‌متر است. افزایش حجم آب شیرین تولیدی در عمق یک سانتی‌متر، در مقایسه با دو تیمار سه و پنج سانتی‌متری، به‌روشنی قابل مشاهده است. بنابراین، نتایج نشان داد که افزایش شوری و عمق آب شور منجر به کاهش حجم آب تقطیرشده توسط هرم‌های خورشیدی می‌شود. این کاهش در عملکرد سیستم، در مورد شوری آب عمدتاً به دلیل افزایش فشار اسمزی و کاهش میزان تبخیر رخ می‌دهد.





شکل ۶- تغییرات تجمعی عملکرد تولیدی تیمارهای مختلف آزمایش در دو فصل (الف) بهار و (ب) تابستان

Figure 6- Cumulative changes in the production performance of different experimental treatments during two seasons: (a) spring and (b) summer.

با توجه به اینکه یافته‌های این پژوهش صرفاً بر شناسایی پارامترهای مؤثر بر عملکرد هرم‌های خورشیدی و روابط میان آن‌ها متمرکز است، مطالعات تکمیلی برای تحلیل اقتصادی این سیستم‌ها ضروری خواهد بود. پیشنهاد می‌شود که در شرایط واقعی کاربرد هرم‌ها در آبیاری تحلیل جامعی از هزینه‌ها و سودآوری آن‌ها بشود تا ارزیابی دقیقی از پتانسیل اقتصادی این فناوری در بخش کشاورزی ارائه گردد. با توجه به تأثیر قابل توجه طراحی هرم‌ها بر عملکرد و میزان تولید آب شیرین، مطالعات تکمیلی برای تعیین طراحی بهینه و انتخاب مواد مناسب از نظر اقتصادی و بهره‌وری تولید ضروری است.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد افزایش عمق آب تأثیر منفی بر میزان تولید آب شیرین دارد و عمق آب در هرم‌های خورشیدی به‌طور مستقیم بر بازده تولید آب خالص تأثیر می‌گذارد. این موضوع به افزایش ظرفیت گرمایی و کاهش راندمان انتقال حرارت مرتبط است. افزایش عمق آب موجب افزایش جرم حرارتی سیستم می‌شود، به‌طوری که با افزایش جرم حرارتی میزان انرژی موردنیاز برای افزایش دمای آب و تبخیر آن افزایش می‌یابد. این امر فرآیند تبخیر را طولانی‌تر می‌کند و در نتیجه باعث کاهش بهره‌وری آب‌شیرین‌کن خورشیدی می‌شود.

رگرسیونی جایگزین در پیش‌بینی عملکرد این سامانه‌ها به کار رود. نتایج حاصل از مدل‌سازی رگرسیونی بر اساس شوری آب ذخیره‌شده در هرم‌ها نشان داد که مدل‌های چندجمله‌ای و گویا عملکرد مشابهی دارند زیرا مقادیر ضریب تعیین آن‌ها برابر است. با این حال، مدل گویا به دلیل کمترین مقدار خطای ریشه میانگین مربعات ($RMSE = 0.36$) نسبت به مدل توانی ($RMSE = 0.40$) دقت بالاتری ارائه کرده است. به طور کلی، مدل‌های غیرخطی شامل مدل‌های توانی، گویا و چندجمله‌ای، در مقایسه با مدل‌های خطی، دقت بالاتری در پیش‌بینی عملکرد سامانه‌های هرم تقطیری خورشیدی نشان دادند. این یافته نشان می‌دهد که رابطه عملکرد این سامانه‌ها با متغیرهای محیطی، مانند عمق آب و شوری اغلب ماهیتی غیرخطی دارد. در حالی که مدل‌های خطی به دلیل سادگی و قابلیت تفسیر بهتر مزایای خاصی دارند. مدل‌های پیچیده‌تر مانند مدل‌های گویا و چندجمله‌ای به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر در توصیف روابط غیرخطی، برای تحلیل داده‌های تجربی مناسب‌تر هستند.

مدل‌های رگرسیونی عمق آب شور و میزان شوری

در این پژوهش، مدل‌های رگرسیونی مختلفی برای بررسی روابط بین عمق آب شور (D) و میزان عملکرد (Y) و بین هدایت الکتریکی (EC) و عملکرد (Y) ارزیابی شد. هر مدل بر اساس معیارهای ضریب تعیین (R^2) و خطای ریشه میانگین مربعات ($RMSE$) تحلیل شد تا دقیق‌ترین مدل برای پیش‌بینی عملکرد سامانه‌های هرم تقطیری خورشیدی شناسایی شود. در ابتدا، مقایسه‌ای جامع میان عملکرد مدل‌های مبتنی بر عمق آب شور ارائه و پس از آن مدل‌های مبتنی بر شوری بررسی شده‌اند. بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۴، مدل توانی با بیشترین مقدار ضریب تعیین ($R^2 = 0.96$) و کمترین مقدار خطای ریشه میانگین مربعات ($RMSE = 1.08$) به عنوان دقیق‌ترین مدل در پیش‌بینی عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی شناخته شد. با این حال، مدل خطی نیز در مقایسه با دیگر مدل‌ها میزان خطای نسبتاً کمتری نشان داده است و می‌تواند به عنوان مدل

جدول ۴- مقایسه مدل‌های رگرسیونی مختلف برای برآورد عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی

Table 4- Comparison of different regression models for estimating the performance of pyramid solar stills			
RMSE	R^2	معادله رگرسیونی Developed regression model	مدل رگرسیونی برای عمق Regression model for depth
۴/۹۶	۰/۹۴	$Y = -6.67 \times D + 100.5$	خطی (Linear)
۵/۸۴	۰/۹۱	$Y = 101.7 \times e^{-0.08084D}$	نمایی (Exponential)
۱/۰۸	۰/۹۶	$Y = 93.72 \times D^{-0.1762}$	توانی (Power)
۶/۶۴	۰/۸۸	$Y = 1027 \times (D + 9.96)^{-1}$	گویا (Rational)
RMSE	R^2	معادله رگرسیونی Developed regression model	مدل رگرسیونی برای شوری Regression model for salinity
۰/۷۵	۰/۹۸	$Y = -0.0003387 \times EC + 85.75$	خطی (Linear)
۰/۴۰	۰/۹۹	$Y = 4.22 \times 10^{-9} \times EC^2 - 527 \times 10^{-7} \times EC + 87.15$	چندجمله‌ای (Polynomial)
۰/۶۵	۰/۹۸	$Y = 86.3 \times e^{-4.354 \times 10^{-6} EC}$	نمایی (Exponential)
۱/۰۸	۰/۹۶	$Y = 156.8 \times EC^{-0.07127}$	توانی (Power)
۰/۳۶	۰/۹۹	$Y = (51.28 \times EC + 5.1 \times 10^6) \times (EC + 5.83 \times 10^4)^{-1}$	گویا (Rational)

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

رگرسیون نشان داد که مدل‌های غیرخطی از جمله مدل توانی برای عمق و مدل گویا برای شوری، نسبت به مدل‌های خطی، دقت بالاتری در پیش‌بینی عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی دارند. ارتباط معناداری نیز میان عرض جغرافیایی و زاویه بهینه شیب پوشش شیشه‌ای تأیید شد که بر اهمیت تنظیم زاویه پوشش متناسب با موقعیت جغرافیایی برای بهبود بازده تقطیر تأکید دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش عمق و شوری آب موجب افزایش کارایی هرم‌های تقطیری خورشیدی می‌شود. طراحی بهینه این سامانه‌ها با در نظر گرفتن شرایط محیطی و عملیاتی می‌تواند تأثیر بسزایی در افزایش تولید آب شیرین در مناطق کم‌آب داشته باشد. پیشنهاد می‌شود عملکرد این سیستم‌ها برای تأمین آب موردنیاز در آبیاری تکمیلی گیاهان مقاوم به شوری و کم‌آب‌بر بررسی شود. امکان ترکیب آب شور منطقه با آب شیرین تولیدی هرم‌ها به‌منظور بهبود کیفیت آب نهایی می‌تواند در افزایش عملکرد محصولات کشاورزی کرج در مقیاس کوچک تحت شرایط کم‌آبی فعلی بررسی گردد. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده به این موارد توجه شود: معرفی متغیرهای جدید، طراحی نوآورانه‌تر (مانند تغییر در ساختار هرم یا استفاده از مواد پیشرفته‌تر مانند نانومواد)، بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته‌تر، زاویه قرارگیری هرم‌ها، بررسی عدم قطعیت نتایج و عوامل مؤثر بر خطای آزمایش، تحلیل جامع محدودیت‌های مطالعه، و ارزیابی هزینه-فایده همراه با مقایسه با فناوری‌های جایگزین.

در این پژوهش، پنج هرم تقطیری خورشیدی مربعی طراحی و ساخته شد و طی بازه زمانی سه‌ماهه تحت شرایط اقلیمی کرج، ایران (ارتفاع ۱۳۰۴ متر؛ موقعیت جغرافیایی ۳۵° ۸۱' شمالی و ۵۰° ۹۸' شرقی) مورد آزمایش قرار گرفتند. هدف این مطالعه، بررسی عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی در شرایط محیطی و عملیاتی مختلف و ارزیابی تأثیر تابش خورشیدی، عمق آب و شوری بر میزان تولید آب شیرین بود. نتایج نشان داد که اختلاف دمای بین آب و پوشش شیشه‌ای نقش کلیدی در فرآیند تقطیر دارد به‌طوری که افزایش این اختلاف دما موجب بهبود میزان تبخیر و افزایش بازده تولید آب شیرین می‌شود. بررسی تغییرات دمایی آب در عمق‌های مختلف نشان داد که در عمق‌های کمتر، جذب انرژی خورشیدی سریع‌تر است و دمای آب در مدت‌زمانی کوتاه‌تر به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در مقابل، افزایش عمق آب تأثیر منفی بر میزان تولید آب شیرین دارد به‌گونه‌ای که در شوری ثابت، افزایش عمق از یک سانتی‌متر به پنج سانتی‌متر، منجر به کاهش ۱۲ درصد در تولید آب شیرین شده است. افزایش شوری از ۵۰۰۰ به ۴۰۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، عملکرد سیستم را به‌طور چشمگیری کاهش داده است. بیشترین میزان تولید آب شیرین (۱۱۰۰ میلی‌لیتر بر مترمربع در روز) در تیمار D_1S_1 طی فصل تابستان به دست آمد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت تابش خورشیدی و دمای محیط بالا در کنار کاهش عمق و شوری آب بر عملکرد سیستم است. علاوه‌براین، تحلیل‌های

مراجع

- Abd Elaziz, M., Essa, F.A., Elsheikh, A.H., 2021. Utilization of ensemble random vector functional link network for freshwater prediction of active solar stills with nanoparticles. *Sustain. Energy Technol. Assessments* 47, 101405.
- Abdelal, N., Taamneh, Y., 2017. Enhancement of pyramid solar still productivity using absorber plates made of carbon fiber/CNT-modified epoxy composites. *Desalination* 419, 117–124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.06.012>
- Abdullah, A.S., Omara, Z.M., Bek, M.A., Essa, F.A., 2020. An augmented productivity of solar distillers integrated to HDH unit: experimental implementation. *Appl. Therm. Eng.* 167, 114723.

- Abujazar, M.S.S., Fatihah, S., Rakmi, A.R., Shahrom, M.Z., 2016. The effects of design parameters on productivity performance of a solar still for seawater desalination: A review. *Desalination* 385, 178–193. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.02.025>
- Aburideh, H., Deliou, A., Abbad, B., Alaoui, F., Tassalit, D., Tigrine, Z., 2012. An experimental study of a solar still: Application on the sea water desalination of Fouka. *Procedia Eng.* 33, 475–484.
- Ahsan, A., Imteaz, M., Thomas, U.A., Azmi, M., Rahman, A., Daud, N.N.N., 2014. Parameters affecting the performance of a low cost solar still. *Appl. Energy* 114, 924–930.
- Akash, B.A., Mohsen, M.S., Nayfeh, W., 2000. Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions. *Energy Convers. Manag.* 41, 883–890.
- Al-Hinai, H., Al-Nassri, M.S., Jubran, B.A., 2002. Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still. *Energy Convers. Manag.* 43, 1639–1650.
- Alawee, W.H., Hammoodi, K., Dhahad, H.A., Omara, Z.M., Essa, F.A., Abdullah, A.S., Amro, M.I., 2023. Effects of magnetic field on the performance of solar distillers: a review study. *Eng. Technol. J.* 41, 121–131.
- Alsumaiei, A.A., 2020. A Nonlinear Autoregressive Modeling Approach for Forecasting Groundwater Level Fluctuation in Urban Aquifers. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w12030820>
- Altarawneh, I., Rawadieh, S., Batiha, M., Al-Makhadmeh, L., Alrowwad, S., Tarawneh, M., 2017. Experimental and numerical performance analysis and optimization of single slope, double slope and pyramidal shaped solar stills. *Desalination* 423, 124–134.
- Arunkumar, T., Vinothkumar, K., Ahsan, A., Jayaprakash, R., Kumar, S., 2012. Experimental study on various solar still designs. *Int. Sch. Res. Not.* 2012, 569381.
- Ashour, E., Tony, M., Purcell, P., 2015. Use of Agriculture-Based Waste for Basic Dye Sorption from Aqueous Solution: Kinetics and Isotherm Studies. *Am. J. Chem. Eng.* 2, 92–98. <https://doi.org/10.11648/j.ajche.20140206.14>
- Awasthi, A., Wankhede, U., Gandhi, K., Rayalu, S., 2023. Carbon nanoparticle facilitated functional pyramid solar distillation unit for wastewater treatment. *J. Environ. Chem. Eng.* 11, 110930. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110930>
- Babalola, T.A., Boyo, A.O., Kesinro, R.O., 2015. Effect of Water Depth and Temperature on the Productivity of a Double Slope Solar Still'. *J. Energy Nat. Resour.* 4, 1–4.
- Chen, C.-Y., Wang, S.-W., Kim, H., Pan, S.-Y., Fan, C., Lin, Y.J., 2021. Non-conventional water reuse in agriculture: A circular water economy. *Water Res.* 199, 117193. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117193>
- E, D.E.M., 1926. Une nouvelle fonction climatologique : L'indice d'aridite. *Meteorologie* 2, 449–459.
- El-Kady, M., El-Shibini, F., 2001. Desalination in Egypt and the future application in supplementary irrigation. *Desalination* 136, 63–72.
- El-Sebaei, A., Khallaf, A.E.-M., 2020. Mathematical modeling and experimental validation for square pyramid solar still. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27, 32283–32295. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07587-5>
- Elshamy, S.M., El-Said, E.M.S., 2018. Comparative study based on thermal, exergetic and economic analyses of a tubular solar still with semi-circular corrugated absorber. *J. Clean. Prod.* 195, 328–339.
- Fathy, M., Hassan, H., Ahmed, M.S., 2018. Experimental study on the effect of coupling parabolic trough collector with double slope solar still on its performance. *Sol. Energy* 163, 54–61.
- Hammoodi, K.A., Dhahad, H.A., Alawee, W.H., Omara, Z.M., 2023. A detailed review of the factors impacting pyramid type solar still performance. *Alexandria Eng. J.* 66, 123–154.
- He, T., Yan, L., 2009. Application of alternative energy integration technology in seawater desalination. *Desalination* 249, 104–108.
- Hollands, K.G.T., 1963. The regeneration of lithium chloride brine in a solar still for use in solar air conditioning. *Sol. Energy* 7, 39–43.
- Jathar, L.D., Ganesan, S., Shahapurkar, K., Soudagar, M.E.M., Mujtaba, M.A., Anqi, A.E., Farooq, M.,

- Khidmatgar, A., Goodarzi, M., Safaei, M.R., 2022. Effect of various factors and diverse approaches to enhance the performance of solar stills: a comprehensive review. *J. Therm. Anal. Calorim.* 147, 4491–4522.
- Kalbasi, R., Esfahani, M.N., 2010. Multi-effect passive desalination system, an experimental approach. *World Appl. Sci. J.* 10, 1264–1271.
- Kamal, W.A., 1988. A theoretical and experimental study of the basin-type solar still under the arabian gulf climatic conditions. *Sol. Wind Technol.* 5, 147–157.
- Khairy, S., Shaban, M., Negm, A.M., Eldeen, O.W., Ramadan, E.M., 2022. Drainage water reuse strategies: Case of El-Bats drain, Fayoum Governorate, Egypt. *Ain Shams Eng. J.* 13, 101681. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101681>
- Khalifa, A.J.N., Hamood, A.M., 2009. Performance correlations for basin type solar stills. *Desalination* 249, 24–28.
- Koffi, B.K., Konan, D.K., Nguessa, R.K., Saraka, J.K., Tanoh, A., Kouacou, M.A., Yeo, Z., Koffi, M., Koua, A.A., 2009. Modelling of solar still for Production of Pure Water in the Abidjan Zones. *Res. J. Phys.* 3, 5–13.
- Kosari, S., Parsinejad, M., Mokhtaran, A., Zebardast, S., 2024. Predicted feasibility and economic return of drainage water recycling in an arid region. *Agric. Water Manag.* 302, 108983. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108983>
- Lindblom, J., Nordell, B., 2006. Water production by underground condensation of humid air. *Desalination* 189, 248–260.
- Madeshwaren, V., Govindaraju, K., Thangavel, S., Thangaraj, R., 2024. Solar still desalination techniques for the minimization of operational time and cost: a review. *Glob. NEST J.* 26.
- Manokar, A.M., Taamneh, Y., Winston, D.P., Vijayabalan, P., Balaji, D., Sathiyamurthy, R., Sundar, S.P., Mageshbabu, D., 2020. Effect of water depth and insulation on the productivity of an acrylic pyramid solar still—An experimental study. *Groundw. Sustain. Dev.* 10, 100319.
- Mansour, S.A., Tony, M.A., Tayeb, A.M., 2019. Photocatalytic performance and photodegradation kinetics of Fenton-like process based on haematite nanocrystals for basic dye removal. *SN Appl. Sci.* 1, 265. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0286-x>
- Mansur, A.A.P., Mansur, H.S., Tabare, C., Paiva, A., Capanema, N.S. V, 2019. Eco-friendly AgInS₂/ZnS quantum dot nanohybrids with tunable luminescent properties modulated by pH-sensitive biopolymer for potential solar energy harvesting applications. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 30, 16702–16717. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-00719-0>
- MasoomiBalsi, M., Kosari, S., Parsinejad, M., Yazdani, M., Navabian, M., 2024. Removal or reduction of nitrogen and phosphorous pollutants from paddy fields drainage water in vegetated drainage ditches. *Iran. J. Soil Water Res.* <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.375972.669702>
- Morote, Á.-F., Olcina, J., Hernández, M., 2019. The Use of Non-Conventional Water Resources as a Means of Adaptation to Drought and Climate Change in Semi-Arid Regions: South-Eastern Spain. *Water.* <https://doi.org/10.3390/w11010093>
- Morse, R.N., Read, W.R.W., 1968. A rational basis for the engineering development of a solar still. *Sol. energy* 12, 5–17.
- Muftah, A.F., Alghoul, M.A., Fudholi, A., Abdul-Majeed, M.M., Sopian, K., 2014. Factors affecting basin type solar still productivity: A detailed review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 32, 430–447.
- Murase, K., Yamagishi, Y., Iwashita, Y., Sugino, K., 2008. Development of a tube-type solar still equipped with heat accumulation for irrigation. *Energy* 33, 1711–1718. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.05.013>
- Murugavel, K.K., Anburaj, P., Hanson, R.S., Elango, T., 2013. Progresses in inclined type solar stills. *Renew. Sustain. energy Rev.* 20, 364–377.
- Murugavel, K.K., Chockalingam, K.K.S.K., Srithar, K., 2008. Progresses in improving the effectiveness of the single basin passive solar still. *Desalination* 220, 677–686.
- Muthu Manokar, A., Kalidas Murugavel, K., Esakkimuthu, G., 2014. Different parameters affecting the rate

- of evaporation and condensation on passive solar still – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 38, 309–322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.092>
- Nagarajan, P.K., El-Agouz, S.A., Arunkumar, T., Sathyamurthy, R., 2017. Effect of forced cover cooling technique on a triangular pyramid solar still. *Int. J. Ambient Energy* 38, 597–604. <https://doi.org/10.1080/01430750.2016.1159609>
- Okeke, C.E., Egarievwe, S.U., Animalu, A.O.E., 1990. Effects of coal and charcoal on solar-still performance. *Energy* 15, 1071–1073.
- Palanikumar, G., Shanmugan, S., Chithambaram, V., Gorjian, S., Pruncu, C.I., Essa, F.A., Kabeel, A.E., Panchal, H., Janarthanan, B., Ebadi, H., 2021. Thermal investigation of a solar box-type cooker with nanocomposite phase change materials using flexible thermography. *Renew. Energy* 178, 260–282.
- Patel, S.G., Bhatnagar, S., Vardia, J., Ameta, S.C., 2006. Use of photocatalysts in solar desalination. *Desalination* 189, 287–291. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.07.010>
- Phadatare, M.K., Verma, S.K., 2007. Influence of water depth on internal heat and mass transfer in a plastic solar still. *Desalination* 217, 267–275.
- Prakash, A., Jayaprakash, R., 2021. Performance evaluation of stepped multiple basin pyramid solar still. *Mater. Today Proc.* 45, 1950–1956. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.227>
- Qadir, M., Sharma, B.R., Bruggeman, A., Choukr-Allah, R., Karajeh, F., 2007. Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. *Agric. water Manag.* 87, 2–22.
- Rababa'h, H.M., 2003. Experimental study of a solar still with sponge cubes in basin. *Energy Convers. Manag.* 44, 1411–1418.
- Rahbar, N., Esfahani, J.A., 2012. Experimental study of a novel portable solar still by utilizing the heatpipe and thermoelectric module. *Desalination* 284, 55–61.
- Rajamanickam, M.R., Ragupathy, A., 2012. Influence of Water Depth on Internal Heat and Mass Transfer in a Double Slope Solar Still. *Energy Procedia* 14, 1701–1708. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1155>
- Salama, M.A., Galal, Y.G.M., Hussien, M.A., Atia, M.F., Eldehn, I.F.M., 2024. Using desalinated water from solar stills to irrigate green beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in different water regimes with an application of ¹⁵N stable isotope. *Egypt. J. Soil Sci.* 64, 31–47. <https://doi.org/10.21608/ejss.2023.228700.1636>
- Sampathkumar, K., Arjunan, T. V., Pitchandi, P., Senthilkumar, P., 2010. Active solar distillation—A detailed review. *Renew. Sustain. energy Rev.* 14, 1503–1526.
- Sathyamurthy, R., Kennady, H.J., Nagarajan, P.K., Ahsan, A., 2014. Factors affecting the performance of triangular pyramid solar still. *Desalination* 344, 383–390.
- Sharshir, S.W., Kandeal, A.W., Ismail, M., Abdelaziz, G.B., Kabeel, A.E., Yang, N., 2019. Augmentation of a pyramid solar still performance using evacuated tubes and nanofluid: experimental approach. *Appl. Therm. Eng.* 160, 113997.
- Shi, L., Wang, X., Hu, Y., He, Y., Yan, Y., 2020. Solar-thermal conversion and steam generation: a review. *Appl. Therm. Eng.* 179, 115691. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115691>
- Singh, A.K., Tripathy, R., Chopra, U.K., 2008. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water–nitrogen interactions in wheat crop. *Agric. Water Manag.* 95, 776–786. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.02.006>
- Tiwari, A.K., Tiwari, G.N., 2006. Effect of water depths on heat and mass transfer in a passive solar still: in summer climatic condition. *Desalination* 195, 78–94.
- Tiwari, G.N., Dimri, V., Chel, A., 2009. Parametric study of an active and passive solar distillation system: Energy and exergy analysis. *Desalination* 242, 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.027>
- Tony, M.A., 2022. Valorization of undervalued aluminum-based waterworks sludge waste for the science of “The 5 Rs’ criteria”. *Appl. Water Sci.* 12, 20. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01554-7>
- Tony, M.A., Nabwey, H.A., 2024. Recent advances in solar still technology for solar water desalination.

- Appl. Water Sci. 14, 147. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02188-1>
- Tripathi, R., Tiwari, G.N., 2006. Thermal modeling of passive and active solar stills for different depths of water by using the concept of solar fraction. *Sol. energy* 80, 956–967.
- Tripathi, R., Tiwari, G.N., 2004. Effect of size and material of a semi-cylindrical condensing cover on heat and mass transfer for distillation. *Desalination* 166, 231–241. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.078>
- Wang, Z., Horseman, T., Straub, A.P., Yip, N.Y., Li, D., Elimelech, M., Lin, S., 2024. Pathways and challenges for efficient solar-thermal desalination. *Sci. Adv.* 5, eaax0763. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0763>
- Xiao, G., Wang, X., Ni, M., Wang, F., Zhu, W., Luo, Z., Cen, K., 2013. A review on solar stills for brine desalination. *Appl. Energy* 103, 642–652.
- Yeh, H.-M., Chen, L.-C., 1986. The effects of climatic, design and operational parameters on the performance of wick-type solar distillers. *Energy Convers. Manag.* 26, 175–180.
- Yeh, H.-M., Chen, L.-C., 1985. Basin-type solar distillation with air flow through the still. *Energy* 10, 1237–1241.
- Yousef, M.S., Hassan, H., 2019. Energetic and exergetic performance assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in a solar distillation system. *Energy Convers. Manag.* 179, 349–361.

Original Research

Evaluation of the Efficiency of Pyramid solar stills under Different Salinity and Water Depth Levels in a Semi-Arid Region

R. Sadeghi, Kh. Ahmadaali*, S. Kosari, S. Zare, Sh. Khalighi Sigaroodi

***Corresponding Author:** Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Received: 27 February 2025, **Accepted:** 15 March 2025

Email: khahmadauli@ut.ac.ir

https://doi.org/ 10.22092/idser.2025.368750.1608

Extended Abstract

Introduction

Freshwater scarcity is a critical global issue, especially in arid and semi-arid regions like the Middle East and North Africa (MENA), where water demand is rising due to population growth and increasing competition across agricultural, domestic, and industrial sectors. To address these challenges, utilizing unconventional water sources such as seawater, brackish water, and agricultural drainage water becomes essential. Among the various desalination methods, solar desalination has emerged as a sustainable and cost-effective solution, particularly for remote areas with abundant solar radiation but limited freshwater resources. Pyramid solar stills, due to their simple design, low operational costs, and minimal maintenance requirements, provide an efficient and environmentally friendly approach to freshwater production. These systems harness renewable solar energy, making them a clean and sustainable alternative that reduces reliance on fossil fuels and minimizes environmental impact. As a result, pyramid solar stills are a practical and viable option for decentralized water supply in water-scarce regions.

Methodology

The experiment was conducted at the Soil and Water Research Farm of the University of Tehran, located in Karaj, to evaluate the freshwater production efficiency of pyramid solar stills under varying salinity levels and water depths. The study area covered a total surface of 70 m² (20 m × 3.5 m). Saline water required for the stills was sourced from a drainage canal. Five pyramid solar stills with glass covers were used, each having a base area of 1 × 1 m and a height of 0.18 m. Three different water depth scenarios were investigated: D₁ (1 cm), D₂ (3 cm), and D₃ (5 cm). Additionally, five salinity levels were considered: S₁ (5000 µS/cm), S₂ (10000 µS/cm), S₃ (20000 µS/cm), S₄ (30000 µS/cm), and S₅ (40000 µS/cm). The experiment was conducted during both spring and summer to account for seasonal variations in meteorological conditions. Finally, different regression models were developed to predict the performance of pyramid solar stills under varying water depths and salinity levels, and their accuracy was evaluated using two statistical indices, R² and RMSE.

Results and Discussion

Meteorological analysis showed that peak ambient temperature and solar radiation occurred between 12 PM and 3 PM in both spring and summer, with temperatures decreasing as solar radiation declined. The key driver of freshwater production in solar still pyramids was the temperature difference between the water and the glass cover, which enhanced evaporation. Water temperature analysis at depths of 1 cm, 3 cm, and 5 cm indicated faster heating at shallower depths, with a peak of 50°C at 1 cm depth. Freshwater yield decreased as salinity increased from 5000 to 40000 µS/cm, with reductions of up to 20% at a depth of 5 cm. Similarly, increasing water depth from 1 cm to 5 cm at 5000 µS/cm salinity reduced freshwater production by 12%.

This decline was attributed to increased osmotic pressure lowering the evaporation rate. Overall, system performance decreased with rising salinity and water depth, though efficiency remained higher in summer. Nonlinear models, including power, rational, and polynomial models, provided better predictions than linear models, highlighting the nonlinear nature of system performance concerning salinity and water depth.

Conclusions

This study underscores the importance of optimizing solar still designs to enhance fresh water production under different environmental and operational conditions. The findings reveal that the temperature difference between the water and glass cover plays a crucial role in the distillation process, with higher temperature gradients leading to improved evaporation rates. Additionally, the results show that reducing water depth and salinity significantly boosts system performance. Nonlinear models were found to be more effective than linear ones in predicting the performance of the stills, reflecting the complex relationships between key variables. Moreover, the research emphasizes the need for considering local environmental conditions, such as latitude and solar radiation, for optimal design. Overall, these insights provide valuable guidance for improving solar still efficiency in arid and water-scarce regions.

Acknowledgement

The authors would like to thank all participants of the present study.

Keywords: Water scarcity, Desalination, Condensation, Solar radiation, Drainage water.

