



مطالعه تجربی اثر نخ‌های هدایت‌کننده آب تقطیر شده بر روی عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی

محمد خلیلی^{۱*}، معین طاهری^۲، میلاد صالحی^۱، زهرا سادات اقدامی^۱

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران
۲- پژوهشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه اراک، اراک، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۰۷
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱

کلمات کلیدی:

بررسی تجربی
آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی
نمک‌زدایی
نخ هدایت‌کننده آب
روش تاگوچی

خلاصه: باتوجه به دسترسی آسان به انرژی خورشید، تصفیه آب با استفاده از انرژی خورشید موردتوجه پژوهشگران می‌باشد. در این پژوهش، یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی ساخته شده و در شهر اراک مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. به همین منظور، تأثیر پنج متغیر ورودی بر میزان استحصال آب به‌عنوان متغیر خروجی، با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی بررسی شده است. متغیرهای ورودی شامل دبی آب شور، زاویه دستگاه، رنگ صفحه جاذب، تعداد و فاصله نخ‌های هدایت‌کننده آب تقطیر شده در هر ردیف بوده‌اند. این تحقیق از این جهت منحصربه‌فرد است که از نخ‌های پلاستیکی برای ایجاد مسیریابی بر روی سطح شیشه استفاده کرده تا آب تقطیر شده را به مخزن آب شیرین هدایت کند. همچنین بررسی هم‌زمان تأثیر پارامترهای ورودی از نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین خروجی آب شیرین، به میزان ۱۹۷۵ میلی‌لیتر بر مترمربع، زمانی حاصل می‌شود که دبی ورودی آب شور ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، زاویه دستگاه ۴۰ درجه، رنگ صفحه جاذب مشکی، تعداد نخ‌های هدایت‌کننده آب در هر ردیف ۲ عدد و فاصله ردیف‌ها ۸ میلی‌متر باشد. همچنین استفاده از ۲ عدد نخ هدایت‌کننده آب در هر ردیف و به فاصله ۸ میلی‌متر از همدیگر سبب افزایش میزان استحصال آب بر واحد سطح شده است.

۱- مقدمه

کندانسور خارجی و مواد تغییر فازدهنده را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده، اثربخشی استفاده از کندانسور خارجی و مواد تغییر فازدهنده را در آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی نشان داده است. مانچاندا و کومار [۳ و ۴] به مطالعه و توسعه یک رویکرد جدید برای استفاده از فضای خالی در پایین قسمت پلکانی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی پرداخته‌اند. در این رویکرد جدید، از یک بازتابنده در زیر دستگاه به‌منظور خشک‌کردن محصولات استفاده شده است. خروجی آب تقطیر شده در دبی کمتر آب شور ورودی به طور محسوسی بیشتر از همین خروجی در دبی بیشتر به‌دست‌آمده است. همچنین آن‌ها به انجام آزمایش بر روی واحد فعال خشک‌کن - تقطیر دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پرداخته‌اند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، بهره‌وری انرژی با دبی کمتر، بیشتر از سایر دبی‌های مورد بررسی، گزارش شده است. ویجایا کومار و همکاران [۵] در خصوص تأثیر افزودن یک سیستم رطوبت‌گیر و استفاده از مواد تغییر فازدهنده مانند موم یا پارافین بر روی یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی غیرفعال ساده به پژوهش پرداخته‌اند.

فرایند نمک‌زدایی به‌وسیله آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی یکی از روش‌های قدیمی تصفیه آب است. همچنین این روش به دلیل اقتصادی بودن و تنها استفاده از انرژی خورشید به‌منظور تبخیر آب شور، موردتوجه پژوهشگران مختلفی قرار گرفته است. الشیخ و همکاران [۱] به معرفی یک مدل شبکه عصبی حافظه کوتاه‌مدت برای پیش‌بینی میزان حجم خروجی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی و روش معمولی پرداخته‌اند. بر اساس نتایج آن‌ها، میزان تولید آب شیرین در آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی در مقایسه با نمونه‌های معمولی بیش از ۱۰۰ درصد افزایش یافته است. طوسی و همکاران [۲] دریافته‌اند که دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی دارای سطح متراکم‌تری در مقایسه با آب‌شیرین‌کن معمولی خورشیدی است. آن‌ها چهار دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک‌پله‌ای، آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با کندانسور خارجی، آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با مواد تغییر فازدهنده و آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m-khalili@araku.ac.ir



بهره‌وری آب شیرین در دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی به مطالعه پرداخته‌اند. از تحقیقات تجربی مشخص شده که افزایش دمای آب و صفحه جاذب تحت‌تأثیر استفاده از نانوذرات اکسید سیلیکون دوده شده در رنگ سیاه است. علاوه بر این، نتایج نشان داده بازده کل آب‌شیرین‌کن خورشیدی برای غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد به ترتیب ۲۷/۲، ۳۴/۲، ۱۸/۳ و ۱۸/۴ درصد است.

فیاض و همکاران [۱۲] در پژوهش خود به بررسی اثر ذرات فلزی تیتانیوم بر دمای سطحی جاذب آب‌شیرین‌کن خورشیدی برای افزایش میزان تولید پرداختند. باتوجه به نتایج ثبت شده، در حالت استفاده از تیتانیوم با رنگ سیاه بازده ۵۴/۳۵ درصد نسبت به حالت عادی افزایش داشته است.

شمروخ و اکاوارا [۱۳] به بررسی اثر ترکیب آب‌شیرین‌کن پلکانی با پره‌های مسی، دیواره‌های پلکانی و بازتابنده‌های داخلی و خارجی پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بازده آب‌شیرین‌کن پلکانی موردنظر نسبت به آب‌شیرین‌کن معمولی بیش از ۱۰۰ درصد افزایش داشته است.

ناگارجو و همکاران [۱۴] روش جدیدی برای ترکیب شن و ماسه برای افزایش عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک شیب با سطح دیافراگم ۱/۵ مترمربع پیشنهاد داده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که راندمان آب‌شیرین‌کن خورشیدی با فرورفتگی‌های شنی در عمق آب ۱ سانتی‌متری ۶۵/۰۸ درصد به‌دست‌آمده درحالی‌که بدون شن و ماسه در عمق آب ۱ سانتی‌متر به ۳۷/۹ درصد محدود می‌شود.

آموری [۱۵] برای بهبود کارایی نمک‌زدایی از ماده‌ای منحصربه‌فرد و جاذب نور به نام هیدروژل استفاده کرده‌اند. نتایج نشان دادند که این ماده می‌تواند بازده دستگاه را از طریق کاهش اتلاف گرما در فرایند انتقال حرارت ناشی از محلی‌سازی گرما در فصل مشترک آب‌وهوا بهبود بخشد. علاوه بر این، هیدروژل‌ها موادی با دوام، شناور، بازیافتی و ضد رسوب هستند که برای برداشت و تقویت تولید بخار کارآمد هستند.

ساکثیول و همکاران [۱۶] به این نتیجه رسیدند که افزودن رنگ به آب شور درون حوضچه تأثیر مستقیمی بر میزان عملکرد دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی دارد.

گناناراج و ولمورگان [۱۷]، با هدف ترکیب متغیرهای مؤثر بر آب‌شیرین‌کن خورشیدی به‌منظور افزایش بهره‌وری، به بررسی اثر چهار متغیر داخلی آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی در مقایسه با دستگاه آب‌شیرین‌کن تک حوضچه‌ای با استفاده از روش تاگوچی پرداخته‌اند. آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی تک حوضچه‌ای و پلکانی که با روش تاگوچی، سطح هر یک

نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داده که با افزودن مواد تغییرفازدهنده به آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با سیستم رطوبت‌گیر، تولید آب مقطر به‌صورت پیوسته انجام‌گرفته و درنهایت باعث افزایش بازدهی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی شده است.

جاثار و همکاران [۶] آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی از نوع مقعر را به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار داده و با انجام تجزیه‌وتحلیل آماری به بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر کارایی دستگاه پرداخته‌اند. بر اساس نتایج تجربی، یک مدل رگرسیون توسعه‌یافته در نرم‌افزار آماری مینی‌تب پیشنهاد شده است. نتایج آماری نشان داد که مدل پیشنهادی برای تخمین کارایی مناسب بوده است و بر اساس آن بیشترین بهره‌وری روزانه به مقدار ۳/۷ لیتر بر مترمربع در روز در به‌دست‌آمده است.

عیسی و همکاران [۷] باهدف بهبود عملکرد حرارتی آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی پژوهشی صورت داده‌اند. نتایج تجربی نشان داده که استفاده از آسترهای راه‌راه و خمیده بهره‌وری آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی اصلاح‌شده را افزایش داده است.

ماندال و اسلام [۸] به بررسی عددی آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی بر پایه نانوسیال پرداخته‌اند. دو نوع نانوسیال آلومینیوم اکسید-آب و مس-آب در داخل آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی مورد استفاده قرار گرفته است. هر دو نانوسیال بهره‌وری ساعتی را افزایش داده‌اند. همچنین مس-آب باعث بهره‌وری بیشتری در مقایسه با آب‌شیرین‌کن خورشیدی بدون نانوسیال شده است.

رامالینگام و همکاران [۹] به بررسی تأثیر استفاده از مواد ذخیره‌ساز انرژی و مواد سوختی استفاده شده در آب‌شیرین‌کن خورشیدی باهدف بهبود راندمان تولید آب شیرین پرداخته‌اند. باتوجه به نتایج تخلخل، جذب، افزایش مویرگی و انتقال حرارت دیسک با جنس الیاف پوسته نارگیل خشک‌شده نسبت به دیگر مواد افزایش بیشتری داشته است.

بالاچاندران و همکاران [۱۰] به بررسی افزایش بهره‌وری آب شیرین تولیدشده در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی پیشنهادی با استفاده از مواد جاذب جدید پرداخته‌اند. نتایج نشان داده که استفاده از مواد با جذب‌کنندگی بیشتر باعث افزایش سرعت تبخیر می‌شود. همچنین بهره‌وری آب شیرین در آب‌شیرین‌کن خورشیدی پیشنهادی حدوداً ۱/۵ لیتر بیشتر از آب‌شیرین‌کن معمولی بوده است.

ساتیامورتی و همکاران [۱۱] در رابطه با تأثیر استفاده از نانوذرات اکسید سیلیکون دوده شده در رنگ سیاه و در غلظت‌های مختلف بر افزایش

آب شیرین کن خورشیدی، عمق آب شور است که با کاهش عمق آب شور دما افزایش یافته و تقطیر بیشتری صورت گرفته است. همچنین استفاده یکپارچه از آلومینیوم به عنوان صفحه جاذب ۵۳ درصد و استفاده از کندانسور خارجی، بازتابنده‌های داخلی و خارجی تا حدود ۱۶۵ درصد باعث افزایش تولید آب شیرین شده است.

خلیفه و حمود [۲۶] به بررسی پارامترهایی از جمله عمق آب شور، زاویه شیشه پوششی و رنگ در یک دستگاه آب شیرین کن خورشیدی بر میزان استحصال آب شیرین پرداختند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که بیشترین میزان استحصال آب شیرین در روز در حالتی است که زاویه شیب شیشه نزدیک به عرض جغرافیایی محل آزمایش باشد.

عصاری و همکاران [۲۷] به بررسی عددی میزان بهره‌وری و انتقال حرارت در دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی با تغییر زاویه پوشش شیشه‌ای و ارتفاع پله‌ها پرداختند. نتایج پژوهش آنها در تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان داد که برای زاویه شیشه در بازه ۵۵ الی ۶۵ درجه، با افزایش زاویه میزان استحصال و انتقال حرارت بیشتر شده و همچنین در خصوص ارتفاع پله‌ها در بازه انتخابی بین ۱ الی ۶ سانتی‌متر، با افزایش ارتفاع پله، میزان استحصال و انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

جدول ۱ به طور مختصر نتایج پژوهش‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. محدودیت استفاده از دستگاه آب شیرین کن خورشیدی، میزان کم استحصال آب شیرین بر واحد سطح است. با توجه به پژوهش‌های انجام شده می‌توان با شناسایی متغیرهای تأثیرگذار و بهبود آنها، میزان استحصال آب بر واحد سطح را افزایش داد. با توجه به پژوهش‌های انجام شده در گذشته و شناسایی پارامترهای تأثیرگذار، نوآوری پژوهش صورت گرفته نسبت به دیگر پژوهش‌ها، ایجاد مسبرهایی بر روی سطح شیشه با استفاده از نخ برای هدایت آب تقطیر شده به مخزن آب شیرین می‌باشد. همچنین نوآوری دیگر پژوهش انجام شده بررسی تأثیر استفاده هم‌زمان از پنج متغیر دبی ورودی آب شور، زاویه دستگاه، رنگ صفحه جاذب، تعداد و فاصله نخ‌های هدایت کننده آب تقطیر شده در هر ردیف و مطالعه برهم‌کنش آنها است.

۲- دستگاه آب شیرین کن خورشیدی

در سیستم‌های تقطیر خورشیدی آب شور را به ظرف کم عمقی که کاملاً آب‌بندی شده و با هوای خارج ارتباطی ندارد، وارد می‌کنند. پوشش شفافی مانند شیشه و یا پلاستیک، سطح فوقانی ظروف مربوطه را می‌پوشاند. انرژی خورشیدی با طول موج‌های مختلف از شیشه گذشته و نور خورشید

از متغیرهای آن طراحی شده، نسبت به آب شیرین کن‌های معمولی به ترتیب ۱۷۵ و ۱۳۲/۲ درصد افزایش بهره‌وری داشته‌اند.

پانچال و همکاران [۱۸] به بررسی تأثیر پره‌های عمودی و شیب‌دار بر روی بازده دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پرداخته‌اند. آنها دریافته‌اند که به علت افزایش دما عملکرد دو دستگاه آب شیرین کن خورشیدی مجهز شده به پره، عملکرد بهتری نسبت به دستگاه آب شیرین کن معمولی داشته است. نوگریا یا و همکاران [۱۹] عوامل مؤثر بر خروجی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی را مورد بررسی قرار داده‌اند. تحقیقات نشان داد که کاهش عمق آب شور به دلیل افزایش دما باعث افزایش بهره‌وری شده است.

پانچال و همکاران [۲۰] به بررسی میزان خروجی آب شیرین کن خورشیدی با استفاده از نانوسیال‌های اکسید منیزیم و اکسید تیتانیوم پرداخته‌اند. آنها به این نتیجه رسیدند که عملکرد آب شیرین کن خورشیدی پلکانی با استفاده از نانوسیال‌های اکسید منیزیم و اکسید تیتانیوم افزایش داشته است.

ژیائو و همکاران [۲۱] به منظور افزایش انتقال حرارت برای آب شیرین کن خورشیدی به بررسی و ارائه یک نوع جدید از صفحه‌های حرارتی پرداخته‌اند. نتایج مقایسه‌ها نشان داده که وقتی عمق کانال پایینی ۰/۰۱ متر باشد، میانگین سرعت انتقال حرارت از صفحه جاذب به آب شور بهبود یافته است. در نتیجه میانگین دمای آب شور بیشتر شده و به تبع آن بهره‌وری روزانه آب شیرین افزایش داشته است. همچنین، میانگین بازده حرارتی و راندمان انرژی افزایش یافته‌اند.

کابیل و همکاران [۲۲] به بررسی چندین متغیر برای بهبود دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پرداخته‌اند. آنها دریافته‌اند که افزایش بهره‌وری آب تقطیر شده روزانه برای یک دستگاه خورشیدی پلکانی با سیستم فتوولتائیک و گردش آب حدود ۷۸/۲۴ درصد بیشتر از یک دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی معمولی است.

عمر و همکاران [۲۳] به اصلاح آب شیرین کن خورشیدی از طریق بازتابنده‌های داخلی پرداخته‌اند. نتایج نشان داده‌اند که بهره‌وری آب شیرین کن خورشیدی پلکانی اصلاح شده با بازتابنده افزایش داشته است.

کابیل و همکاران [۲۴ و ۲۵] همچنین در یک پژوهش نظری و تجربی به بررسی عوامل بهبود عملکرد دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پرداخته‌اند. نتایج آنها نشان داده است که حداکثر بهره‌وری از دستگاه آب شیرین کن پلکانی در شرایطی حاصل شده که عمق پله ۵ میلی‌متر و عرض پله ۱۲۰ میلی‌متر باشد. علاوه بر این، یکی از عوامل مؤثر بر بهبود عملکرد

جدول ۱. جمع‌بندی نتایج پژوهش‌های گذشته (ادامه دارد)

Table 1. Summarizing the results of past researches(Continue)

نتیجه	نویسندگان	سال
افزایش ۱۰۰ درصدی میزان تولید آب شیرین در آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی در مقایسه با نمونه‌های معمولی.	الشیخ و همکاران [۱]	۲۰۲۱
اثر بخشی استفاده از کندانسور خارجی و مواد تغییر فاز دهنده در آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی.	طوسی و همکاران [۲]	۲۰۲۱
میزان استحصال برای دبی ورودی ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، ۱۵ درصد بیشتر نسبت به دبی آب شور با مقدار ۶۵ میلی‌لیتر بر دقیقه است.	مانچاندا و کومار [۳] و [۴]	۲۰۲۱
استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، باعث افزایش میزان استحصال می‌شود.	ویجایا کومار و همکاران [۵]	۲۰۲۱
استفاده از آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی مقعر باعث افزایش راندمان می‌شود.	جاثر و همکاران [۶]	۲۰۲۱
استفاده از آسترهای راه‌راه و خمیده بهره‌وری آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی را افزایش داده می‌دهد.	عیسی و همکاران [۷]	۲۰۲۱
استفاده از نانوسیال میزان استحصال را به صورت ساعتی افزایش می‌دهد.	ماندال و اسلام [۸]	۲۰۲۱
استفاده از پوست نارگیل خشک شده باعث افزایش میزان استحصال می‌شود.	رامالینگام و همکاران [۹]	۲۰۲۱
استفاده از مواد با جذب‌کنندگی بیشتر باعث افزایش سرعت تبخیر می‌شود.	بالاچاندان و همکاران [۱۰]	۲۰۲۱
استفاده از نانوذرات اکسید سیلیکون دوده شده در رنگ سیاه باعث افزایش میزان استحصال آب می‌شود.	ساتامورتی و همکاران [۱۱]	۲۰۲۰
استفاده از تیتانیوم با رنگ سیاه باعث افزایش ۵۴/۳۵ درصدی بازده نسبت به حالت عادی می‌شود.	فیاض و همکاران [۱۲]	۲۰۲۲
استفاده از پره‌های مسی و بازتابنده‌های داخلی و خارجی، باعث افزایش عملکرد دستگاه می‌شود.	شمروخ و اکاوارا [۱۳]	۲۰۲۰
استفاده از شن و ماسه بر روی سطح جاذب باعث افزایش راندمان به میزان ۲۷/۱۸ درصد می‌شود	ناگاراجو و همکاران [۱۴]	۲۰۲۲
معرفی یک ماده جاذب نور و نمک‌زدا به نام هیدروژل به منظور افزایش بازده شیرین‌سازی.	آموری [۱۵]	۲۰۲۲
افزودن رنگ به آب شور درون حوضچه تأثیر مستقیمی بر میزان عملکرد دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی دارد.	ساکشیول و همکاران [۱۶]	۲۰۲۲
با استفاده از روش تاگوچی به بررسی پارامترهای داخلی دو نوع از دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک حوضچه و پلکانی پرداختند	گناناراج و ولمورگان [۱۷]	۲۰۲۰
با استفاده از باله‌های عمودی و شیب‌دار، به علت افزایش دما میزان استحصال دستگاه افزایش می‌یابد.	پانچال و همکاران [۱۸]	۲۰۲۰

جدول ۱. جمع‌بندی نتایج پژوهش‌های گذشته

Table 1. Summarizing the results of past researches

کاهش عمق آب شور باعث افزایش تبخیر بیشتر می‌شود.	نوگریا یا و همکاران [۱۹]	۲۰۲۱
استفاده از نانوسیال‌های اکسید منیزیم و اکسید تیتانیوم، باعث افزایش میزان استحصال آب می‌شود.	پانچال و همکاران [۲۰]	۲۰۱۹
به بررسی یک نوع جدید از دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی پرداخته شد و نتیجه حاصل شد بیشترین استحصال زمانی است که عمق کانال پایینی ۰/۰۱ متر باشد.	ژبائو و همکاران [۲۱]	۲۰۱۹
استفاده از سیستم فتوولتائیک و گردش آب باعث افزایش حدود ۷۸/۲۴ درصدی بهره‌وری دستگاه می‌شود.	کابیل و همکاران [۲۲]	۲۰۱۹
استفاده از بازتابنده باعث افزایش میزان استحصال می‌شود.	عمرا و همکاران [۲۳]	۲۰۱۳
کاهش عمق آب شور باعث تقطیر بیشتر شده و صفحه جاذب از جنس آلومینیوم ۵۳ درصد میزان استحصال را افزایش می‌دهد. استفاده از کندانسور و بازتابنده باعث افزایش ۱۶۵ درصدی میزان استحصال می‌شود.	کابیل و همکاران [۲۴ و ۲۵]	۲۰۱۲
زاویه بهینه دستگاه، نزدیک به عرض جغرافیایی محل است.	خلیفه و حمود [۲۶]	۲۰۰۹
با افزایش زاویه پوشش شیشه‌ای میزان استحصال و انتقال حرارت بیشتر شده و همچنین، با افزایش ارتفاع پله نیز میزان استحصال و انتقال حرارت افزایش می‌یابد.	عصاری و همکاران [۲۷]	۲۰۲۲



شکل ۱. نمای کلی دستگاه

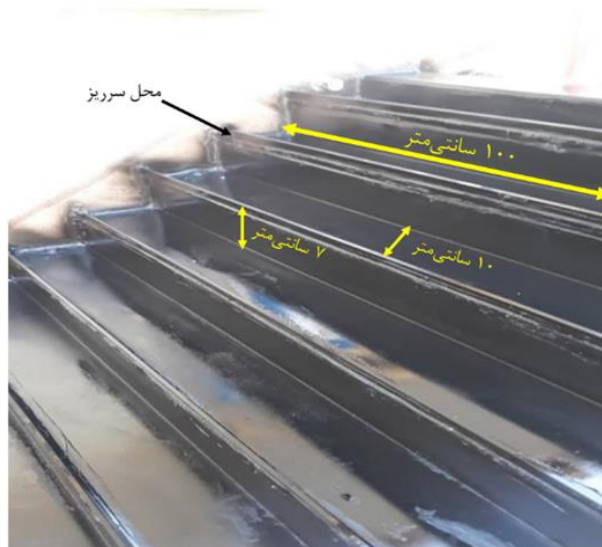
Fig. 1. Overview of the device

شور بالای دستگاه منتقل می‌شود. حرکت ماریپیچ آب شور در دستگاه باعث کاهش رسوب آب شور روی سطح و همچنین افزایش فرصت برای جذب انرژی خورشید توسط آب و تبخیر آن می‌شود. دستگاه ساخته شده دارای منبع آب شور، در بالای دستگاه و یک منبع جمع‌آوری آب شیرین، در پایین دستگاه می‌باشد. در آخرین پله، خروجی‌ای برای آب شور و هدایت مجدد آن به منبع آب شور در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ نمای کلی بدنه دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی ساخته شده در این پژوهش نشان شده است.

در مشاهدات میدانی، تأثیر نخ هدایت‌کننده مشخص شده است؛ به گونه‌ای که در قسمت‌های نزدیک به نخ هدایت‌کننده بر روی شیشه، آب تقطیر شده جریان یافته و با سهولت بیشتری به پایین شیشه و سپس به داخل مخزن آب شیرین‌کن هدایت می‌شود. همچنین به منظور چرخش آب به صورت ماریپیچ ۱۰ پله تعبیه شده که در هر پله از سرریزهایی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ارتفاع هر پله ۷ سانتی‌متر عرض آن ۱۰۰ سانتی‌متر و طول هر پله ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و به دلیل دما و رطوبت بالای داخل محفظه از ورق گالوانیزه به‌عنوان جنس داخلی دستگاه و پله‌ها استفاده گشته است.

با آب داخل ظرف و سطح جاذب برخورد نموده و آب گرم می‌شود. پوشش شفاف مانع خروج نور خورشید از محفظه شده و بعلاوه باعث می‌شود که افت گرمایی از طریق جابه‌جایی به مقدار زیادی کاهش یابد. به این ترتیب انرژی گرمایی خورشید در دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی محصور شده و موجب افزایش دمای آب و تولید بخار آب در محفظه می‌گردد. به تدریج که رطوبت نسبی در محفظه افزایش می‌یابد، بخار آب در اثر دفع گرما از شیشه، روی سطح داخلی شیشه تقطیر شده و آب شیرین حاصله به طرف محل جمع‌آوری در انتهای پوشش حرکت می‌کند. به این ترتیب با استفاده از انرژی خورشید و عمل تقطیر، آب شیرین تهیه می‌شود. آب نمک غلیظ شده نیز به طور مداوم یا متناوب از دستگاه خارج می‌شود. مهم‌ترین عامل مؤثر در آب شیرین‌کن‌های خورشیدی شدت نور خورشید است؛ زیرا میزان تولید آب شیرین با شدت تابش خورشید نسبت مستقیم دارد [۲۸].

نحوه عملکرد آب شیرین‌کن‌های خورشیدی پلکانی در این پژوهش به صورتی است که آب شور از مخزن بالای دستگاه وارد پله اول شده و پس از پوشش سطح پله اول، از سرریز در نظر گرفته شده در انتهای پله اول، وارد پله دوم می‌شود. آب شور تا انتهای پله آخر این مسیر را طی می‌کند و پس از آن به وسیله شیر خروجی از پله آخر از دستگاه خارج شده و مجدد به مخزن آب



شکل ۲. طراحی پله‌های دستگاه

Fig. 2. Design of device stairs

آن‌ها در نظر گرفته شده است که در جدول ۲ متغیرهای مورد بررسی به همراه سطح‌های آن‌ها آورده شده است. همچنین جدول ۳، جدول طراحی آزمایش به روش تاگوچی را نشان می‌دهد.

۴- تحلیل نتایج

با انجام آزمایش‌های مختلف مطابق با طراحی آزمایش صورت گرفته و با اندازه‌گیری حجم آب خروجی تولیدشده در هر آزمایش، تأثیر هر کدام از متغیرهای دبی ورودی آب شور، زاویه دستگاه، رنگ صفحه جاذب، تعداد و فاصله نخ‌های هدایت‌کننده آب تقطیرشده در هر ردیف مورد بررسی قرار گرفته است. میزان استحصال آب بر واحد سطح، از هر آزمایش با بشر (با دقت ۵ میلی‌لیتر) اندازه‌گیری شده و برای تعیین صحت حجم خوانده شده، با توجه به چگالی آب و وزن بشر و استفاده از ترازوی دیجیتال وزن آب به دست آمده از آزمایش اندازه‌گیری شده است. در جدول ۴ و شکل ۳ نتایج خروجی هر کدام از آزمایش‌ها آورده شده است.

با استفاده از نتایج جهت تعیین سطوح با بهترین عملکرد متغیرهای آزمایش، از نسبت سیگنال به نویز استفاده شده است. نسبت سیگنال به نویز نشان‌دهنده مقدار حساسیت پارامتر مورد بررسی به متغیرهای غیرقابل کنترل در یک آزمایش کنترل شده می‌باشد [۳۰]. متغیرهای غیرقابل کنترل، عوامل ایجادکننده نویز در روند آزمایش هستند که در این آزمایش می‌توان به دمای محیط و شدت میزان وزش باد اشاره کرد.

۳- طراحی آزمایش به روش تاگوچی

به منظور دستیابی به بهینه‌ترین تعداد آزمایش، به طراحی مجموعه‌ای از آزمایش‌ها پرداخته می‌شود. از جمله روش‌های طراحی آزمایش می‌توان به روش‌هایی مانند تاگوچی، روش سطح پاسخ، یا روش سعی و خطا اشاره کرد. روش تاگوچی با رویکردی کارا برای بهینه‌سازی متغیرهای هر الگوریتم، مجموعه محدودی از آزمایش‌ها را ارائه می‌کند که نتایج حاصل از آزمایش‌ها بر روی تمامی ناحیه آزمایشی که توسط فاکتورها و سطوح تنظیم آن‌ها ساخته می‌شود، معتبر هستند. این روش کیفیت را بر اساس انحراف از مقدار مطلوب بیان کرده و دو روش را برای آنالیز داده‌ها پیشنهاد می‌دهد. روش اول روشی استاندارد است که نتایج حاصل از انجام تنها یک بار آزمایش را با استفاده از آنالیز میانگین^۱ بهینه‌سازی می‌کند. روش دوم، روش آنالیز نسبت سیگنال به نویز^۲ است که در آن انحراف‌های ممکن بین داده آزمایشگاهی و مقدار مطلوب را به کمک یک تابع ضرر مدل‌سازی می‌کند. مقدار این تابع با توجه به ماهیت تابع پاسخ از میان سه حالت هر چه بیشتر بهتر، هر چه کمتر بهتر و هر چه به مقدار اسمی نزدیک‌تر بهتر باشد انتخاب می‌شود [۲۹]. در این پژوهش به منظور بهینه‌کردن تعداد آزمایش‌ها، با استفاده از نرم‌افزار مینی تب نسخه ۲۱/۱ به طراحی آزمایش به روش تاگوچی پرداخته شده است.

در پژوهش انجام شده، به منظور بررسی تأثیر هر متغیر، سه سطح برای

1 Analysis of Means (ANOM)

2 Signal to noise ratio

جدول ۲. سطح متغیرهای در نظر گرفته شده برای آزمایش‌ها

Table 2. Level of variables considered for tests

متغیر	واحد	نماد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
دبی ورودی آب شور	میلی‌لیتر بر دقیقه	Q	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
زاویه دستگاه	درجه	A	۳۵	۴۰	۴۵
رنگ صفحه جاذب	-	C	نقره‌ای	زرد	مشکی
تعداد نخ هدایت‌کننده آب تقطیرشده در هر ردیف	-	N	۱	۲	۳
فاصله ردیف نخ هدایت‌کننده آب تقطیرشده	سانتی‌متر	D	۴	۸	۱۲

۴-۲- زاویه دستگاه

باتوجه به اینکه مختصات جغرافیایی محل انجام آزمایش ۳۴ درجه شمالی و ۴۹ درجه شرقی بوده است، به‌منظور استفاده بیشتر از انرژی خورشیدی جهت دستگاه به سمت جنوب تنظیم گردیده است. باتوجه به زمان آزمایش که در خرداد و تیرماه انجام شده است و به‌منظور بررسی اثر زاویه شیشه روی دستگاه بر میزان تولید آب شیرین، سه زاویه ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه مورد مطالعه قرار گرفته است. شایان‌ذکر است که پس از انجام آزمایش‌ها، بدین نتیجه رسیده شد که شاید بهتر بود باتوجه به این که عرض جغرافیایی ۳۴ درجه است، در طراحی آزمایش، سطوح به‌صورت متقارن حول این زاویه طراحی شوند. یعنی به‌عنوان نمونه ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه که به ترتیب حدوداً برابر زوایای بهینه تابستانی، سالیانه و زمستانی خواهند بود. مطابق با شکل ۴-ب و باتوجه به انجام آزمایش‌ها در فصل تابستان، مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه شیشه روی دستگاه، میزان استحصال آب بر واحد سطح آب‌شیرین‌کن خورشیدی کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که با افزایش زاویه دستگاه در فصل تابستان، میزان انعکاس نور خورشید از روی سطح شیشه افزایش پیدا کرده و عملاً انرژی تابشی کمتری به سطح جاذب می‌رسد [۳۳-۳۴]. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که شیب بهینه در سال تقریباً برابر با عرض جغرافیایی مکان است [۳۵].

۴-۳- رنگ صفحه جاذب

یکی از متغیرهای مؤثر در پژوهش‌های انجام شده، رنگ صفحه جاذب بوده است. در این پژوهش به‌منظور توسعه پژوهش‌های گذشته از سه رنگ نقره‌ای، زرد و مشکی استفاده شده است. باتوجه به شکل ۴-پ رنگ مشکی

جهت استخراج نسبت سیگنال به نویز، از نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است. به‌منظور بررسی نسبت سیگنال به نویز و همچنین به‌دست‌آوردن سطوح مناسب هر یک از پارامترهای ورودی، از یک تابع زیان استفاده شده است. تابع زیان از نوع هرچه بیشتر بهتر در نظر گرفته شده، به این دلیل که بیشترین میزان استحصال آب بر واحد سطح، مدنظر است؛ بنابراین مشخصه کیفی هرچه بیشتر بهتر بر اساس معادله (۱) محاسبه می‌شود [۳۰]:

$$S/N = -10 \log_{10} \left(1/n \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (1)$$

که Y_i از نتایج به‌دست‌آمده و n تعداد آزمایش‌ها است. در شکل ۴ نمودار نسبت سیگنال به نویز در آزمایش تاگوچی آورده شده است. در ادامه، باتوجه به نتایج شکل ۴ تأثیر متغیرهای آزمایش بر روی خروجی مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱- متغیر دبی ورودی آب شور ورودی به دستگاه

در پژوهش صورت‌گرفته برای دبی ورودی آب شور، ۳ دبی متفاوت ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه مورد استفاده قرار گرفت. هدف از بررسی سطوح مختلف دبی، قابل قیاس بودن نتایج این مقاله با کارهای گذشته و سنجش صحت نتایج بوده است. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده و شکل ۴-الف، این نتیجه دریافت می‌شود که با افزایش دبی ورودی آب شور، میزان استحصال آب بر واحد سطح کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش آن است که با افزایش دبی ورودی، عمق آب شور بر روی پله‌ها نیز افزایش یافته و میزان تبخیر سطحی کاهش می‌یابد [۳۱].

جدول ۳. طراحی آزمایش به روش تاگوچی

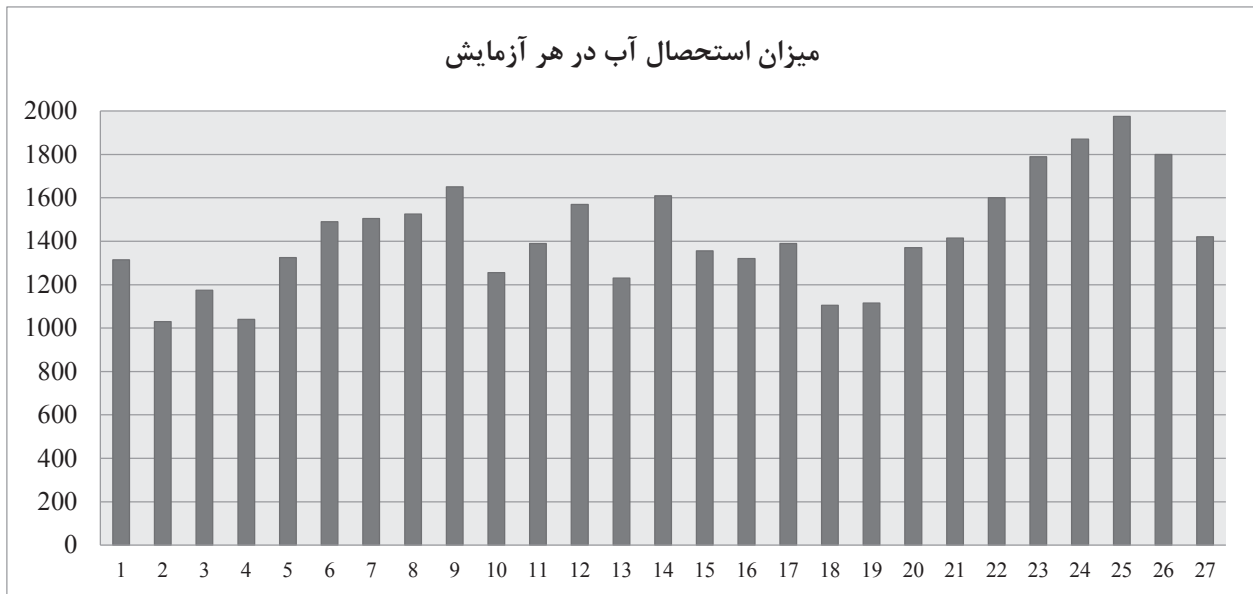
Table 3. Experiment design by Taguchi method

شماره آزمایش	دبی ورودی (میلی لیتر بر دقیقه)	زاویه دستگاه (درجه)	رنگ صفحه جاذب	تعداد نخ‌های هدایت‌کننده آب تقطیرشده	فاصله ردیف‌های نخ هدایت‌کننده آب تقطیرشده (سانتی‌متر)
۱	۱۵۰	۴۰	نقره‌ای	۱	۱۲
۲	۵۰	۴۰	نقره‌ای	۱	۱۲
۳	۱۰۰	۴۰	نقره‌ای	۱	۱۲
۴	۱۵۰	۴۵	نقره‌ای	۲	۴
۵	۵۰	۴۵	نقره‌ای	۲	۴
۶	۱۰۰	۴۵	نقره‌ای	۲	۴
۷	۱۵۰	۳۵	نقره‌ای	۳	۸
۸	۵۰	۳۵	نقره‌ای	۳	۸
۹	۱۰۰	۳۵	نقره‌ای	۳	۸
۱۰	۱۵۰	۳۵	زرد	۲	۱۲
۱۱	۵۰	۳۵	زرد	۲	۱۲
۱۲	۱۰۰	۳۵	زرد	۲	۱۲
۱۳	۱۵۰	۴۰	زرد	۳	۴
۱۴	۵۰	۴۰	زرد	۳	۴
۱۵	۱۰۰	۴۰	زرد	۳	۴
۱۶	۱۵۰	۴۵	زرد	۱	۸
۱۷	۵۰	۴۵	زرد	۱	۸
۱۸	۱۰۰	۴۵	زرد	۱	۸
۱۹	۱۵۰	۴۵	مشکی	۳	۱۲
۲۰	۵۰	۴۵	مشکی	۳	۱۲
۲۱	۱۰۰	۴۵	مشکی	۳	۱۲
۲۲	۱۵۰	۳۵	مشکی	۱	۴
۲۳	۵۰	۳۵	مشکی	۱	۴
۲۴	۱۰۰	۳۵	مشکی	۱	۴
۲۵	۱۵۰	۴۰	مشکی	۲	۸
۲۶	۵۰	۴۰	مشکی	۲	۸
۲۷	۱۰۰	۴۰	مشکی	۲	۸

جدول ۴. میزان استحصال آب در هر آزمایش

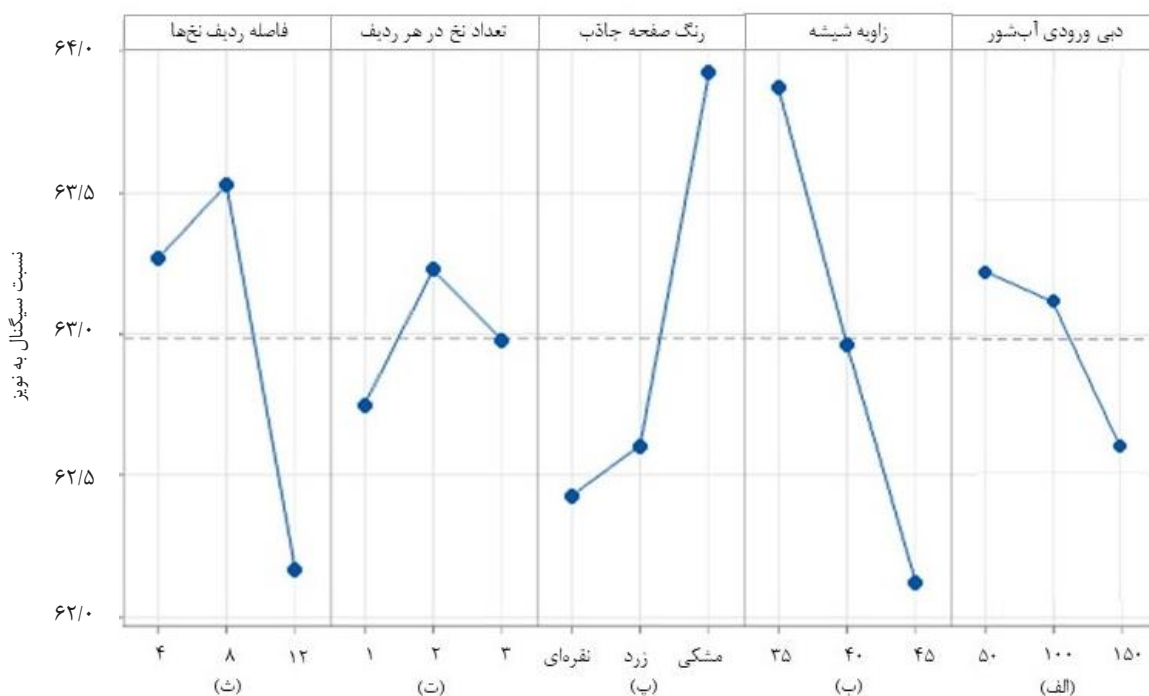
Table 4. The amount of water production in each test

شماره	میزان استحصال آب بر واحد	شماره	میزان استحصال آب بر واحد	شماره	میزان استحصال آب بر واحد
آزمایش	سطح (میلی لیتر بر مترمربع)	آزمایش	سطح (میلی لیتر بر مترمربع)	آزمایش	سطح (میلی لیتر بر مترمربع)
۱	۱۳۱۵	۱۰	۱۲۵۵	۱۹	۱۱۱۵
۲	۱۰۳۰	۱۱	۱۳۹۰	۲۰	۱۳۷۰
۳	۱۱۷۵	۱۲	۱۵۷۰	۲۱	۱۴۱۵
۴	۱۰۴۰	۱۳	۱۲۳۰	۲۲	۱۶۰۰
۵	۱۳۲۵	۱۴	۱۶۱۰	۲۳	۱۷۹۰
۶	۱۴۹۰	۱۵	۱۳۵۵	۲۴	۱۸۷۰
۷	۱۵۰۵	۱۶	۱۳۲۰	۲۵	۱۹۷۵
۸	۱۵۲۵	۱۷	۱۳۹۰	۲۶	۱۸۰۰
۹	۱۶۵۰	۱۸	۱۱۰۵	۲۷	۱۴۲۰



شکل ۳. میزان استحصال آب در هر آزمایش (میلی لیتر بر مترمربع)

Fig. 3. The amount of water production in each test (milliliters per square meter)



شکل ۴. نمودار تأثیرات اصلی برای نسبت سیگنال به نویز

Fig. 4. Main Effects Plot for SN ratios

جاری شدن در طول نخ‌ها به علت وزن زیاد به داخل حوضچه‌ها سقوط می‌کند. باتوجه به توضیحات داده شده همان گونه که در شکل ۴-ت مشاهده می‌شود، از بین تعداد نخ‌های هدایت‌کننده آب در هر ردیف، تعداد ۲ نخ بیشترین میزان استحصال آب بر واحد سطح را نسبت به دو حالت دیگر داشته است.

۴-۵- متغیر فاصله بین ردیف‌های نخ هدایت‌کننده آب تقطیر شده در این پژوهش برای فاصله میان ردیف‌های نخ‌های هدایت‌کننده آب تقطیر شده، سه فاصله ۴، ۸ و ۱۲ سانتی‌متری در نظر گرفته شده است. زمانی که فاصله میان ردیف‌های نخ‌های هدایت‌کننده آب تقطیر شده ۴ سانتی‌متر باشد، این نخ‌ها مساحت بیشتری از سطح شیشه را پوشانده و علاوه بر این که قطرات آب بیشتری بر روی شیشه به سمت مخزن هدایت می‌گردد؛ تا حدی نیز جلوی عبور نور خورشید از شیشه و رسیدن آن به صفحه جاذب گرفته می‌شود. با افزایش فاصله میان ردیف‌ها به ۸ و ۱۲ سانتی‌متر، انرژی خورشیدی بیشتری نسبت به حالت قبل به صفحه جاذب

و بعد از آن رنگ زرد بیشترین تأثیر را در افزایش تولید آب شیرین داشته‌اند. دلیل این امر در جذب انرژی خورشید هر یک از رنگ‌ها است، به طوری که رنگ مشکی، زرد و نقره‌ای به ترتیب بیشترین جذب انرژی خورشید را دارند.

۴-۴- متغیر تعداد نخ هدایت‌کننده آب تقطیر شده در هر ردیف به منظور هدایت بهتر قطرات آب تقطیر شده بر روی سطح شیشه در دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با استفاده از نخ پلاستیکی مسیره‌ای ایجاد گردیده است. به این طریق، قطره‌های آب تقطیر شده نزدیک به این نخ‌ها، به جای جاری شدن روی سطح شیشه و طی کردن مسیر پر پیچ‌وخم و طولانی، در کنار این نخ‌های هدایت‌کننده آب، مسیری کوتاه‌تر را به سمت مخزن آب شیرین طی می‌کنند.

کاملاً روشن است که با افزایش تعداد نخ‌های هدایت‌کننده آب در هر ردیف، قطرات بیشتری از آب تقطیر شده بر روی شیشه به همدیگر چسبیده و در طول نخ به سمت مخزن جریان پیدا می‌کنند؛ اما زمانی که در طول مسیر، قطرات به هم چسبیده بیش از اندازه بزرگ شوند، این قطرات به جای

باتوجه به جدول ۵ که با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب به‌دست‌آمده است، به‌استثنای متغیرهای زاویه شیشه (A) و تعداد نخ‌های هدایت‌کننده آب تقطیر شده در هر ردیف (D)، باقی متغیرها در سطح معنی‌دار خوبی (مقدار احتمال کمتر از ۰/۰۵) قرار دارند.

همچنین در جدول ۶ باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده، آنالیز واریانس خروجی از نرم‌افزار مینی‌تب آورده شده است. آنالیز واریانس میزان تأثیر متغیرهای معادله رگرسیون را مشخص می‌نماید و در تحلیل و مدل‌سازی آزمایش‌ها نقش بسزایی دارد. جدول آنالیز واریانس در طراحی آزمایش‌ها میزان اثر متغیرهای ورودی و برهم‌کنش‌های آن‌ها را بر روی پاسخ خروجی مشخص می‌نماید [۳۶]. در این جدول متغیرها، درجه آزادی^۷ آن‌ها، مجموع مربعات تنظیم‌شده^۸، میانگین مربعات تنظیم‌شده^۹، مقدار اف^{۱۰} و مقدار احتمال ذکر شده‌اند.

صفر بودن مقدار احتمال و برابر بودن مقدار اف با ۲۰۲/۵۲، معنی‌دار بودن مدل را بیان می‌کند.

همچنین، از نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها برای تأیید این فرض که باقیمانده‌ها به طور معمول توزیع شده‌اند، استفاده می‌شود. نمودار احتمال عادی باقیمانده‌ها باید تقریباً از یک خط مستقیم که به آن خط برازش گفته می‌شود، پیروی کند. خط برازش نشان‌دهنده باقی‌مانده‌های مدل و نقاط، مقادیر حقیقی باقی‌مانده‌های به‌دست‌آمده از مدل رگرسیون هستند. شکل ۵ نشان می‌دهد که مدل رگرسیون به دلیل نزدیک بودن برهم‌کنش‌ها به خط توزیع نرمال، از لحاظ فرضیات زیربنایی از جمله نرمال بودن باقی‌مانده‌ها در وضعیت مطلوبی قرار دارد.

در جدول ۷ مدل خلاصه شده آورده شده است. ستون دوم نشان‌دهنده ضریب تعیین^{۱۱}، ستون سوم نشان‌دهنده ضریب تعیین تعدیل شده^{۱۲} و ستون چهارم نشان‌دهنده ضریب تعیین پیش‌بینی شده^{۱۳} است.

ضریب تعیین، نشان‌دهنده آن است که چه میزان از تغییرات متغیر وابسته، تحت تأثیر متغیر مستقل بوده و تا چه حدی تغییرات آن مربوط به سایر عوامل موجود می‌باشد. ضریب تعیین همیشه بین ۰ و ۱۰۰ درصد خواهد بود که عدد صفر درصد نشانگر آن است که مدل رگرسیون هیچ ارتباطی بین متغیرهای وابسته و مستقل را در اطراف میانگین آن نشان نمی‌دهد و عدد

می‌رسد. البته می‌بایست به این نکته توجه نمود که در فاصله ۱۲ سانتی‌متری ردیف‌ها نسبت به فاصله ۸ سانتی‌متری آن‌ها، تعداد نخ کمتری بر روی سطح شیشه استفاده شده و در نتیجه میزان هدایت آب تقطیر شده بر روی شیشه به سمت مخزن نیز کمتر می‌باشد. با عنایت به مطالب گفته شده و باتوجه به شکل ۴-ث فاصله ۸ سانتی‌متر، فاصله بهینه میان ردیف‌های نخ هدایت‌کننده آب تقطیر شده می‌باشد.

۴-۶- تحلیل معادله رگرسیون

رگرسیون خطی نوعی تابع پیش‌بینی‌کننده خطی است که در آن یک متغیر وابسته به‌صورت ترکیبی خطی از متغیرهای مستقل پیش‌بینی می‌شود، به این معنی که هرکدام از متغیرهای مستقل در ضریبی که در فرایند تخمین برای آن متغیر به‌دست‌آمده ضرب می‌شوند. جواب نهایی، مجموع حاصل‌ضرب‌ها به‌علاوه یک مقدار ثابت خواهد بود که آن‌هم در فرایند تخمین به‌دست‌آمده است. معادله (۲) نشان‌دهنده معادله رگرسیون حاصل از داده‌های به‌دست‌آمده در آزمایش‌ها می‌باشد، که حجم آب شیرین تولید شده را بر حسب متغیرهای آزمایش و برهم‌کنش آن‌ها محاسبه می‌کند.

$$V = 7.77Q + 15.11A + 447C + 315N - 21.4D - 12.41QC + 10.72QN + 0.0273Q^2C - 0.0313Q^2N - 0.1442QAN + 1.677QC^2 - 2.70AN^2 \quad (2)$$

شرح متغیرهای مورد‌استفاده در معادله (۲) مطابق با جدول ۲ است. در ادامه به‌منظور تعیین میزان دقت معادله رگرسیون به‌دست‌آمده بر حسب متغیرهای آزمایش و همچنین میزان تأثیرگذاری هر متغیر بر روی خروجی مطلوب (حجم آب شیرین تولیدی)، بررسی‌های بیشتری انجام می‌شود. به این منظور، در جدول ۵ از طریق بررسی مقدار احتمال^۱ و مقدار تی^۲، میزان مؤثر بودن هرکدام از متغیرهای موجود در معادله رگرسیون تعیین می‌گردد. در جدول ۵ متغیرها^۳، ضرایب^۴ آن‌ها، خطای استاندارد ضرایب^۵ و عامل تورم واریانس^۶ نیز ذکر گردیده است.

7 Degrees of Freedom (DF)

8 Adjusted Sum of Squares (Adj SS)

9 Adjusted Mean of Squares (Adj MS)

10 F-Value

11 R-Squared (R-Sq)

12 Adjusted R-Squared (R-Sq(adj))

13 Predicted R-Squared (R-Sq(pred))

1 P-Value

2 T-Value

3 Term

4 Coefficient (Coef)

5 Standard Error of Coefficient (SE Coef)

6 Variance Inflation Factor (VIF)

جدول ۵. بررسی اثر هر متغیر بر معادله رگرسیون

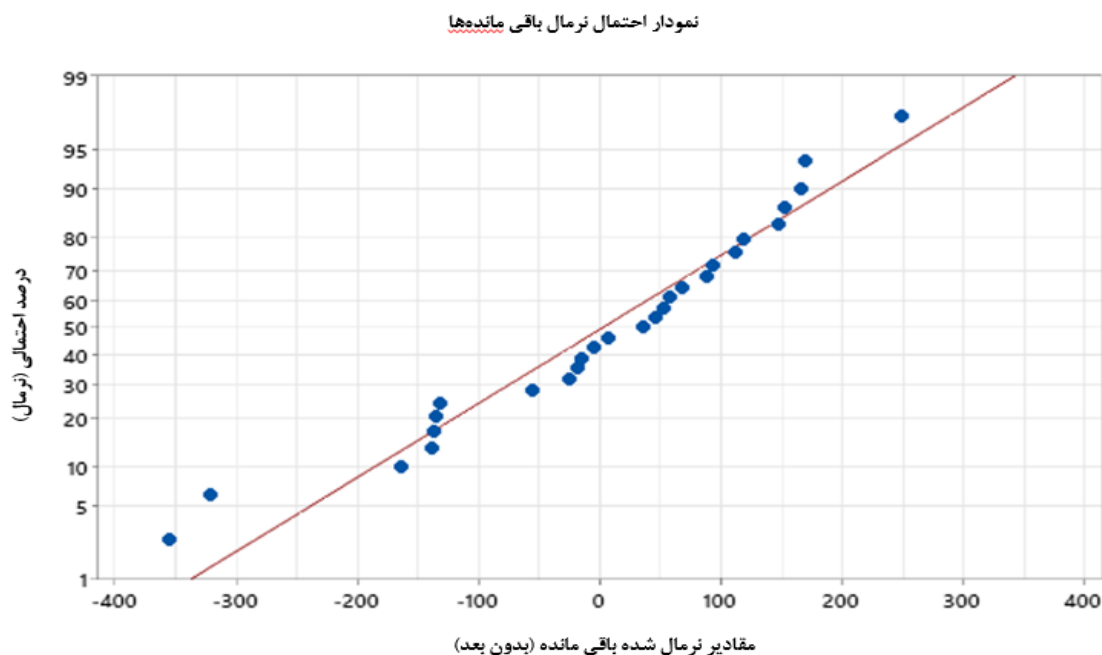
Table 5. Examining the effect of each variable on the regression equation

متغیر	ضرایب	خطای استاندارد ضرایب	مقدار تی	مقدار احتمال	عامل تورم واریانس
Q	۹/۵۷	۳/۲۸	۲/۹۲	۰/۰۰۹	۱۰۹/۵۷
A	۴/۹۰	۵/۲۳	۰/۹۴	۰/۳۶۱	۳۸/۶۲
C	۲۵۶	۱۰۲	۲/۵۰	۰/۰۲۲	۴۲/۸۲
N	۸۵۶	۱۵۷	۵/۴۶	۰/۰۰۰	۱۰۰/۱۲
D	-۲۰/۱	۱۰/۳	-۱/۹۵	۰/۰۶۶	۶/۸۷
$Q*C$	-۶/۷۶	۲/۸۱	-۲/۴۱	۰/۰۲۷	۳۷۵/۵۹
$Q*A*N$	-۰/۰۵۰۱	۰/۰۲۱۷	-۲/۳۱	۰/۰۳۳	۳۶/۳۱
$Q*C*C$	۱/۵۲۵	۰/۶۶۸	۲/۲۸	۰/۰۳۵	۱۴۸/۳۵
$A*N*N$	-۴/۰۰	۱/۱۹	-۳/۳۷	۰/۰۰۳	۶۴/۸۴

جدول ۶. جدول آنالیز واریانس

Table 6. Variance analysis table

متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات تنظیم شده	میانگین مربعات تنظیم شده	مقدار اف	مقدار احتمال
رگرسیون	۹	۵۶۳۳۳۸۵۲	۶۲۵۹۳۱۷	۲۰۲/۵۲	۰/۰۰۰
Q	۱	۲۶۳۲۵۴	۲۶۳۲۵۴	۸/۵۲	۰/۰۰۹
A	۱	۲۷۱۱۷	۲۷۱۱۷	۰/۸۸	۰/۳۶۱
C	۱	۱۹۲۸۹۵	۱۹۲۸۹۵	۶/۲۴	۰۰۲۲
N	۱	۹۲۲۲۲۲	۹۲۲۲۲۲	۲۹/۸۴	۰/۰۰۰
D	۱	۱۱۷۹۶۸	۱۱۷۹۶۸	۳/۸۲	۰/۰۶۶
$Q*C$	۱	۱۷۸۹۹۵	۱۷۸۹۹۵	۵/۷۹	۰/۰۲۷
$Q*A*N$	۱	۱۶۴۳۷۹	۱۶۴۳۷۹	۵/۳۲	۰/۰۳۳
$Q*C*C$	۱	۱۶۱۳۲۲	۱۶۱۳۲۲	۵/۲۲	۰/۰۳۵
$A*N*N$	۱	۳۵۱۱۶۶	۳۵۱۱۶۶	۱۱/۳۶	۰/۰۰۳
خطا	۱۸	۵۵۶۳۲۳	۳۰۹۰۷		
مجموع	۲۷	۵۶۸۹۰۱۷۵			



شکل ۵. نمودار توزیع نرمال معادله رگرسیون

Fig. 5. Normal distribution diagram of the regression equation

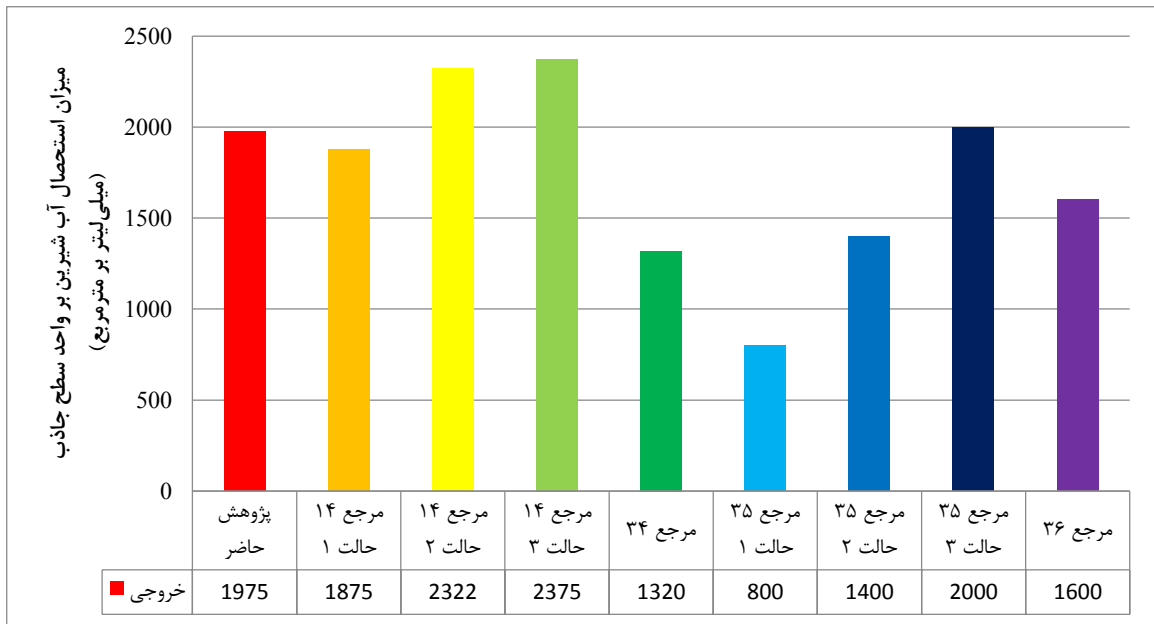
جدول ۷. مدل خلاصه شده

Table 7. Abbreviated model

انحراف معیار	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل شده	ضریب تعیین پیش بینی شده
۱۷۵/۸۰۳	٪ ۹۹/۰۲	٪ ۹۸/۵۳	٪ ۹۷/۸۱

نشان داده شده توسط ضریب تعیین، با فرض تأثیر همه متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته می باشد، در صورتی که درصد نشان داده شده توسط ضریب تعیین تعدیل شده، تنها حاصل از تأثیر واقعی متغیرهای مستقل بر وابسته است و نه همه متغیرهای مستقل. تفاوت دیگر این است که مناسب بودن متغیرها برای مدل توسط ضریب تعیین حتی با وجود مقدار بالا قابل مشخص نیست، در صورتی که می توان به مقدار برآورد شده ضریب تعیین تعدیل شده اعتماد کرد. با این وجود به دلیل آنکه مقدار ضریب تعیین تعدیل شده نیز مقداری نزدیک به ۱۰۰ درصد می باشد و اختلاف کمی با ضریب تعیین دارد، می توان نتیجه گرفت که مدل رگرسیون به دست آمده از لحاظ فرضیات

۱۰۰ درصد بیان می کند که مدل رگرسیون تمامی تغییرپذیری داده های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین می نماید. از لحاظ تئوری اگر ضریب تعیین برابر با ۱۰۰ درصد باشد، تمامی مقادیر مشاهده شده با مقادیر برازش شده یکسان خواهد بود و همه نقاط داده ها بر روی خط برازش شده قرار خواهند گرفت. با توجه به جدول ۷، مقدار ضریب تعیین ۹۹/۰۲ درصد می باشد که این مقدار به دلیل نزدیک بودن به عدد ۱۰۰ درصد قابل قبول است [۳۷]. تفاوت مهم میان ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده این است که ضریب تعیین فرض می کند که هر متغیر مستقل مشاهده شده در مدل، تغییرات موجود در متغیر وابسته را تبیین می کند. بنابراین درصد



شکل ۶. مقایسه بیشترین میزان استحصال آب شیرین بر واحد سطح جاذب

Fig. 6. Comparison of the maximum production of fresh water per unit area of absorbent surface

پرداخته‌اند، میزان تولید آب شیرین آن‌ها از ساعت ۹ صبح تا ۱۷ عصر در بهترین حالت برابر ۱۳۲۰ میلی لیتر بر مترمربع بوده است [۳۸]. همچنین الهراشه و همکاران [۳۹] میزان استحصال آب از ساعت ۹ صبح تا ۱۷ در شرایط مختلف آزمایش را به ترتیب حدود ۸۰۰، ۱۴۰۰ و ۲۰۰۰ میلی لیتر بر مترمربع به دست آورده‌اند. کابیل و همکاران [۴۰] برای دبی ورودی ۱۶۸ میلی لیتر بر دقیقه، از ساعت ۹ صبح تا ۱۷ عصر، میزان استحصال آب ۱۶۰۰ میلی لیتر بر مترمربع را به دست آورده‌اند.

شکل ۶ بیشترین میزان استحصال آب شیرین بر واحد سطح جاذب در پژوهش حاضر، نسبت به نتایج موجود در برخی پژوهش‌های گذشته که شرایط نزدیک‌تری به پژوهش حاضر را داشته‌اند، را نشان می‌دهد. تفاوت موجود در نتایج این مقاله با سایر کارهای انجام شده، به مواردی از قبیل شرایط آزمایش، ساعات انجام آزمایش، مدت‌زمان انجام آزمایش، مکان انجام آزمایش و غیره برمی‌گردد.

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش صورت‌گرفته یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی ساخته و با انجام آزمایش‌هایی تأثیر متقابل پنج متغیر دبی ورودی آب شور، زاویه دستگاه، رنگ صفحه جاذب، تعداد و فاصله نخ‌های هدایت‌کننده آب تقطیرشده در هر ردیف مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، نوآوری

آماری، قابل قبول است [۳۷].

ضریب تعیین پیش‌بینی شده، نشان می‌دهد یک مدل رگرسیونی به چه میزان می‌تواند پاسخ‌ها را برای مشاهدات جدید پیش‌بینی کند و باتوجه به اختلاف آن با ضریب تعیین در خصوص مناسب بودن مدل رگرسیون می‌توان نظر داد [۳۷].

نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که اختلاف سه ضریب مذکور، کمتر از ۲ درصد بوده که اختلاف کمی است و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که معادله رگرسیون (۲)، مدل مناسبی است.

باتوجه به آزمون‌های آماری گفته شده و بررسی آن‌ها به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که معادله (۲) مدل مناسبی برای نتایج خروجی آزمایش‌ها است.

۵- مقایسه میزان استحصال آب شیرین

در پژوهش انجام شده، بیشترین میزان استحصال آب شیرین بر واحد سطح جاذب، در طول روز از ساعت ۱۰ الی ۱۶ برابر ۱۹۷۵ میلی لیتر بر مترمربع بوده است. پانچال و همکاران [۱۸] که اثر استفاده از پرها را در آب‌شیرین‌کن خورشیدی بررسی نموده‌اند، میزان استحصال آب را از ساعت ۹ الی ۱۸ به ترتیب در سه حالت معمولی، پره عمودی و پره مایل، به ترتیب ۱۸۷۵، ۲۳۲۲ و ۲۳۷۵ میلی لیتر بر مترمربع به دست آورده‌اند. در پژوهشی که علاءالدین و همکاران به بررسی تأثیر مواد ذخیره‌ساز گرما و فتیله‌ها

۷- فهرست علائم

متغیر	نماد
زاویه دستگاه (درجه)	A
رنگ صفحه جاذب	C
فاصله نخ‌های هدایت‌کننده آب تقطیرشده (سانتی‌متر)	D
تعداد نخ‌های هدایت‌کننده آب تقطیرشده	N
دبی ورودی آب شور (میلی‌لیتر بر دقیقه)	Q
حجم آب خروجی تولیدشده (میلی‌لیتر)	V

منابع

- [1] A.H. Elsheikh, V.P. Katekar, O.L. Muskens, S.S. Deshmukh, M. Abd Elaziz, S.M. Dabour, Utilization of LSTM neural network for water production forecasting of a stepped solar still with a corrugated absorber plate, *Process Safety and Environmental Protection*, 148 (2021) 273-282.
- [2] S.S.A. Toosi, H.R. Goshayeshi, S.Z. Heris, Experimental investigation of stepped solar still with phase change material and external condenser, *Journal of Energy Storage*, 40 (2021) 102681.
- [3] H. Manchanda, M. Kumar, Thermo-techno-economical experimental evaluation of a stepped solar distillation system with energy loss utilization, *Process Safety and Environmental Protection*, 148 (2021) 473-481.
- [4] H. Manchanda, M. Kumar, Performance evaluation of a locally designed stepped solar distillation-cum-active drying unit, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(6) (2022) 4383-4395.
- [5] V. Vijayakumar, N. Manu, M. Vasudevan, M. Kiran, C. Rejeesh, Phase change materials for improved performance and continuous output in stepped solar stills equipped with HDH, *Materials Today: Proceedings*, 47 (2021) 5064-5068.
- [6] L.D. Jathar, S. Ganesan, S. Gorjian, An experimental and statistical investigation of concave-type stepped solar still with diverse climatic parameters, *Cleaner Engineering and Technology*, 4 (2021) 100137.
- [7] F.A. Essa, Z. Omara, A. Abdullah, S. Shanmugan, H. Panchal, A.E. Kabeel, R. Sathyamurthy, M.M.

صورت‌گرفته در این پژوهش استفاده از نخ هدایت‌کننده آب تقطیرشده بوده است.

باتوجه به نتایج آزمایش بیشترین میزان استحصال آب بر واحد سطح، زمانی به‌دست‌آمده که دبی ورودی آب شور ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، زاویه دستگاه ۴۰ درجه، رنگ صفحه جاذب مشکی، تعداد نخ‌های هدایت‌کننده آب تقطیرشده در هر ردیف ۲ عدد و فاصله ردیف‌ها ۸ میلی‌متر بوده است. در این حالت حجم خروجی به‌دست‌آمده ۱۹۷۵ میلی‌لیتر بر مترمربع بوده است. همچنین کمترین میزان استحصال آب بر واحد سطح به میزان ۱۰۳۰ میلی‌لیتر بر مترمربع در حالتی به‌دست‌آمده که دبی ورودی آب شور ۱۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، زاویه دستگاه ۴۰ درجه، رنگ صفحه جاذب نقره‌ای، تعداد نخ‌های هدایت‌کننده آب تقطیرشده در هر ردیف ۱ عدد و فاصله ردیف‌ها ۱۲ میلی‌متر بوده است.

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل سیگنال به نویز و تحلیل رگرسیون نشان می‌دهند که متغیرهای زاویه دستگاه و رنگ صفحه جاذب بیشترین تأثیر را بر میزان آب شیرین تولیدی داشته‌اند. همچنین این نتیجه دریافت شده که آب شور با دبی ورودی ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، زاویه دستگاه ۳۵ درجه، رنگ صفحه جاذب مشکی، تعداد ۲ عدد نخ هدایت‌کننده آب تقطیرشده در هر ردیف، فاصله ردیف‌های نخ هدایت‌کننده آب تقطیرشده از یکدیگر برابر با ۸ سانتی‌متر، بهترین سطح برای متغیرها بوده‌اند.

در ادامه این پژوهش می‌توان با استفاده از روش‌های آماری دیگر به بررسی تأثیر هر متغیر پرداخت. یکی از روش‌های آماری مناسب برای تحلیل داده‌ها، آنالیز حساسیت^۱ است. آنالیز حساسیت روشی برای شناسایی تأثیرگذاری عوامل ورودی بر عوامل خروجی است. با استفاده از آنالیز حساسیت می‌توان دریافت هر یک از عوامل ورودی به چه میزان بر عامل خروجی تأثیرگذار خواهد بود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه اراک برای انجام آزمایش‌های میدانی سپاسگزاری می‌نمایند. همچنین نویسندگان از سرکار خانم دکتر سمیه غفوری (استادیار گروه ریاضی دانشگاه اراک) جهت راهنمایی در تحلیل داده‌های این پژوهش کمال تقدیر و تشکر را دارند.

1 Sensitivity analysis

- with sand troughs, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50 (2022) 101884.
- [15] K.E. Amori, Hydrogel materials as absorber for improving water evaporation with solar still, desalination and wastewater treatment, *Materials Today: Proceedings*, 60 (2022) 1548-1553.
- [16] T. Sakthivel, T. Arjunan, L. Natrayan, P. Kumar, P.P. Patil, R. Manikandan, A. Muniappan, P. Paramasivam, Experimental investigation on the effectiveness of solar still and its effect on adsorption with various dyes, *Adsorption Science & Technology*, 2022 (2022).
- [17] S.J.P. Gnanaraj, V. Velmurugan, An experimental investigation to optimize the production of single and stepped basin solar stills-a Taguchi approach, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, (2020) 1-24.
- [18] H. Panchal, D. Mevada, K.K. Sadasivuni, F. Essa, S. Shanmugan, M. Khalid, Experimental and water quality analysis of solar stills with vertical and inclined fins, *Groundwater for Sustainable Development*, 11 (2020) 100410.
- [19] S.K. Nougriaya, M. Chopra, B. Gupta, P. Baredar, Stepped solar still: A review on designs analysis, *Materials Today: Proceedings*, 46 (2021) 5647-5660.
- [20] H. Panchal, R. Sathyamurthy, A. Kabeel, S. El-Agouz, D. Rufus, T. Arunkumar, A. Muthu Manokar, D.P. Winston, A. Sharma, N. Thakar, Annual performance analysis of adding different nanofluids in stepped solar still, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138(5) (2019) 3175-3182.
- [21] L. Xiao, R. Shi, S.-Y. Wu, Z.-L. Chen, Performance study on a photovoltaic thermal (PV/T) stepped solar still with a bottom channel, *Desalination*, 471 (2019) 114129.
- [22] A.-E.E. Kabeel, H.A.E.D. Mohamad, S. Majeed, Comparative Experimental Study Between Conventional Stepped Solar Still and an Active Stepped Solar Still Incorporated with a Water Circulation System, *Journal of Engineering Research*, 3(June) (2019) 48-52.
- [23] Z. Omara, A.E. Kabeel, M. Younes, Enhancing the stepped solar still performance using internal reflectors, Athikesavan, A. Elsheikh, M. Abdelgaied, Augmenting the productivity of stepped distiller by corrugated and curved liners, CuO/paraffin wax, wick, and vapor suctioning, *Environmental Science and Pollution Research*, 28(40) (2021) 56955-56965.
- [8] T. Mondol, M.A. Islam, Effect of step size and nanofluid on the performance of stepped solar still, in: *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, 2021, pp. 050018.
- [9] V.K. Ramalingam, A. Karthick, M.P.V. Jeyalekshmi, A.M.M.A.J. Decruz, A.M. Manokar, R. Sathyamurthy, Enhancing the fresh water produced from inclined cover stepped absorber solar still using wick and energy storage materials, *Environmental Science and Pollution Research*, 28(14) (2021) 18146-18162.
- [10] G.B. Balachandran, P.W. David, A.B. Alexander, M.M. Athikesavan, K.K.S. Kumar, V. Palanichamy, A.E. Kabeel, R. Sathyamurthy, F.P.G. Marquez, A relative study on energy and exergy analysis between conventional single slope and novel stepped absorbable plate solar stills, *Environmental Science and Pollution Research*, 28(41) (2021) 57602-57618.
- [11] R. Sathyamurthy, M. Balasubramanian, M. Devarajan, S.W. Sharshir, A.M. Manokar, Experimental study on enhancing the yield from stepped solar still coated using fumed silica nanoparticle in black paint, *Materials Letters*, 272 (2020) 127873.
- [12] H. Fayaz, S. Rasachak, M.S. Ahmad, L. Kumar, B. Zhang, M. Mujtaba, M.E.M. Soudagar, R. Kumar, M.R. Omidvar, Improved surface temperature of absorber plate using metallic titanium particles for solar still application, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52 (2022) 102092.
- [13] A.N. Shmroukh, S. Ookawara, Evaluation of transparent acrylic stepped solar still equipped with internal and external reflectors and copper fins, *Thermal Science and Engineering Progress*, 18 (2020) 100518.
- [14] V. Nagaraju, G. Murali, A.K. Bewoor, R. Kumar, M. Sharifpur, M.E.H. Assad, M.M. Awad, Experimental study on performance of single slope solar still integrated

- investigation of a double-effect solar still in comparison with a single-effect solar still, *Desalination*, 150(1) (2002) 75-83.
- [33] A.S. Nafey, M. Abdelkader, A. Abdelmotalip, A. Mabrouk, Parameters affecting solar still productivity, *Energy conversion and management*, 41(16) (2000) 1797-1809.
- [34] A.J.N. Khalifa, On the effect of cover tilt angle of the simple solar still on its productivity in different seasons and latitudes, *Energy conversion and management*, 52(1) (2011) 431-436.
- [35] M.A.b.H.M. Yakup, A. Malik, Optimum tilt angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam, *Renewable Energy*, 24(2) (2001) 223-234.
- [36] D.C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, John Wiley & sons, 2017.
- [37] M.R. Delozier, S. Orlich, Discovering influential cases in linear regression with MINITAB: Peeking into multidimensions with a MINITAB macro, *Statistical Methodology*, 2(2) (2005) 71-81.
- [38] A. Alaudeen, K. Johnson, P. Ganasundar, A.S. Abuthahir, K. Srithar, Study on stepped type basin in a solar still, *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 26(2) (2014) 176-183.
- [39] M. Al-harahsheh, M. Abu-Arabi, H. Mousa, Z. Alzghoul, Solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and PCM, *Applied Thermal Engineering*, 128 (2018) 1030-1040.
- [40] A. Kabeel, R. Sathyamurthy, D. Mageshbabu, B. Madhu, P. Anand, P. Balakrishnan, Effect of mass flow rate on fresh water improvement from inclined PV panel basin solar still, *Materials Today: Proceedings*, 32 (2020) 374-378.
- Desalination*, 314 (2013) 67-72.
- [24] A. Kabeel, A. Khalil, Z. Omara, M. Younes, Theoretical and experimental parametric study of modified stepped solar still, *Desalination*, 289 (2012) 12-20.
- [25] A. Kabeel, Z. Omara, M. Younes, Techniques used to improve the performance of the stepped solar still—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46 (2015) 178-188.
- [26] A.J.N. Khalifa, A.M. Hamood, Experimental validation and enhancement of some solar still performance correlations, *Desalination and water treatment*, 4(1-3) (2009) 311-315.
- [27] M. Assari, R. Mirzavand, H. Basirat Tabrizi, A. Jafar Gholi Beik, Effect of steps height and glass cover angle on heat transfer performance for solar distillation: Numerical study, *International Journal of Engineering*, 35(1) (2022) 237-247.
- [28] P. Gleick, E. Chalecki, A. Wong, Measuring Water Well-Being: Water Indicators and Indices. In “The world’s water, 2002-2003: the biennial report on freshwater resources” Ed. Gleick, in, PH Island Press. Washington, DC, 2002.
- [29] A. Atarodi, H. Karami, A. Ardeshir, K. Hosseini, Optimization of the Geometric Parameters of the Protective Spur Dike using Taguchi Method and GRA, *JWSS-Isfahan University of Technology*, 24(1) (2020) 13-26.
- [30] G. Taguchi, S. Chowdhury, Y. Wu, *Taguchi’s quality engineering handbook*, John Wiley & Sons, 2004.
- [31] S. Theodoridis, K. Koutroumbas, *Pattern recognition*, Elsevier, 2006.
- [32] H. Al-Hinai, M. Al-Nassri, B. Jubran, Parametric

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Khalili, M. Taheri, M. Salehi, Z. Sadat Eghdami, *Experimental Study of the Effect of Distilled Water-Conducting Threads on the Performance of Stepped Solar Still*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(9) (2022) 2103-2120.

DOI: 10.22060/mej.2022.21132.7382

