



شبیه‌سازی و طراحی بهینه استخر خورشیدی جهت آبیاری زیرسطحی

محمد رضا احمدی مقدم^۱، سعید فراهات^{۱*}، علیرضا عینعلی^۲، جعفر ولیزاده^۳

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
^۲گروه زیست‌شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۳۱ مرداد ۱۳۹۶
بازنگری: ۸ آبان ۱۳۹۶
پذیرش: ۷ آذر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۳ آذر ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

سامانه آبیاری زیرسطحی
شبیه‌سازی
روش تاگوچی
تولید آب شیرین
استخر خورشیدی

چکیده: امروزه با توجه به کاهش منابع آب‌های شیرین در دسترس و آلودگی آن، دستیابی به آب شیرین برای مصارف کشاورزی و آشامیدن ضروری است. در این مقاله به شبیه‌سازی یک سامانه آبیاری زیرسطحی خورشیدی به‌عنوان یکی از روش‌های کارآمد تهیه آب شیرین برای مصارف آشامیدن و کشاورزی، پرداخته شد. سامانه مورد بررسی از یک استخر به‌عنوان واحد رطوبت‌زنی و لوله‌های دفن شده در خاک به‌عنوان واحد چگالنده تشکیل شده است. در این شبیه‌سازی ۸ پارامتر رطوبت نسبی، دمای آب استخر، فشار، دمای لوله، سطح مقطع ورودی هوا، دمای هوا، قطر لوله و سرعت هوا در سه سطح و ۲۷ آزمایش به‌روش تاگوچی، برای محاسبه بیشترین مقدار آب شیرین تولید شده در هر متر لوله تعریف گردید. به‌منظور استفاده حداکثری از تابش خورشید از آینه استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که رطوبت، دمای لوله، سرعت و سطح مقطع ورودی هوای پایین‌تر باعث تولید آب شیرین بیشتر می‌گردد. همچنین افزایش دمای آب و دمای هوای و قطر لوله بیشتر با مقدار تولید آب نسبت مستقیم دارد و فشار بهینه نیز ۹۵ کیلوپاسکال است. مقدار بهینه به‌دست آمده توسط روش تاگوچی، $5/15 \text{ kg/m.day}$ می‌باشد که $5/23\%$ خطا را در مقایسه با نتایج آزمایش نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

بیشتر مبتنی بر استفاده از منابع انرژی ارزان در دسترس و یا رایگان بوده و استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر به‌جای انرژی‌های فسیلی به‌طور عمده از سال ۱۹۷۳ میلادی صورت گرفته است [۲]. کشاورزی نیز برای توسعه، ۷۰ تا ۹۰ درصد از آب استفاده می‌کند. امروزه زمین‌های زیر کشت آبی حدود 20% کل زمین‌های زراعی را تشکیل می‌دهند و سهمی حدود 40% از تولید غذا و همچنین مصرف سالیانه 72% از آب‌های جهان را تشکیل می‌دهند لذا تأمین آب مورد نیاز کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است [۳ و ۴].

پژوهشگران به دنبال راه‌های دستیابی به آب شیرین از آب دریا و آب‌های شورمرزه با مصرف انرژی و هزینه کمتر می‌باشند. یکی از کارآمدترین روش‌ها، آبیاری زیرسطحی با استفاده از فرآیند رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی^۱ می‌باشد که آب شور را برای مصارف آبیاری و شرب مهیا می‌کند. بر اساس تعریف انجمن مهندسان کشاورزی و زیستی آمریکا^۲، آبیاری زیرسطحی^۳ نوعی روش آبیاری قطره‌ای است که لوله و قطره‌چکان‌ها در زیر سطح خاک قرار دارند که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود [۵]. آبیاری زیرسطحی، آب را به‌طور مستقیم به محیط ریشه گیاه از طریق قطره‌چکان‌های در خاک می‌رساند و

حدود 70% از سطح زمین را آب پوشانده است اما 97% از این آب‌ها شور و بد مزه هستند و 2% نیز در قطب‌ها و یخچال‌های طبیعی به‌صورت یخ و دور از دسترس قرار گرفته‌اند، بنابراین تنها 1% از این منابع در دسترس و مناسب شرب و استفاده‌های کشاورزی می‌باشد. از طرفی رقابت بین مصرف‌کننده شهری و کشاورزی برای این آب در حال افزایش است. این وضعیت در منطقه مدیترانه و خاورمیانه به‌علت آب و هوای خشک و نیمه خشک، بارش کم و تبخیر و تعرق بالا تشدید شده است [۶]. برای پاسخ به این مشکل در کشورهای حاشیه خلیج فارس و اکثر کشورهای دنیا، انرژی‌های تجدیدناپذیر از قبیل گاز طبیعی و گازوئیل برای شیرین کردن آب دریا مورد استفاده قرار می‌گیرند. وابستگی به سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی منجر به دو نوع نگرانی شده است. از یک طرف نگرانی از اثرات زیست محیطی و دوم نگرانی از اتمام ذخایر که نیاز به کشف منابع انرژی جایگزین را اهمیت می‌دهد. از این‌رو بررسی روش‌ها و راه‌های هرچه اقتصادی‌تر کردن عوامل، کارکرد و شیوه‌های مؤثر برای افزایش تولید آب شیرین برای استفاده شرب و کشاورزی از اهمیت خاصی برخوردار بوده است. روش‌های شیرین نمودن آب

¹Humidification-dehumidification

²American Society of Agricultural and Biological Engineers

³Subsurface irrigation

یکی از روش‌های آبیاری کارآمد است که سبب صرفه‌جویی در مصرف آب می‌شود [۶]. ایران در ردیف غنی‌ترین کشورها از نظر برخورداری از انرژی خورشیدی محسوب شده و از لحاظ جغرافیایی بر روی کمربند خورشیدی قرار گرفته است که در آن ۲۵۰ تا ۳۰۰ روز در طول سال را روزهای آفتابی اختصاص داده‌اند که امکان استفاده از این طرح را فراهم می‌سازد [۷]. آبیاری زیرسطحی اولین بار در سال ۱۹۸۰ در کالیفرنیا مطرح شد و به تدریج با بهبود مصالح، این روش نیز در سال‌های اخیر توسعه یافت.

گلمن [۸] در سال ۱۹۸۶ تحقیقی را بر روی لوله‌های دارای منفذ و بدون منفذ دفن شده در خاک انجام داد. نتایج نشان دادند که نرخ انتقال حرارت در لوله‌های با منفذ نسبت به لوله‌های بدون منفذ ۵۰٪ بیشتر است لذا لوله‌های منفذدار دارای چگالش بیشتری خواهند بود. هات مچر و همکاران [۹] در سال ۱۹۹۲ به بررسی سامانه آبیاری زیرسطحی در عمق ۴۰ سانتی‌متر با روش آبیاری فارو^۱ برای یونجه پرداختند و نتیجه گرفتند که در سامانه آبیاری زیرسطحی عملکرد محصول ۲۰٪ افزایش یافته و میزان آب مصرفی این روش نیز ۹۴٪ روش آبیاری فارو بوده است. اُران و همکاران [۱۰] در سال ۱۹۹۹ به بررسی سامانه آبیاری زیرسطحی با استفاده از آب‌های نامتعارف پرداخته و کاهش آلودگی منابع آب و خاک و کاهش آلودگی شاخ و برگ و محصول کشت شده را از مزایای استفاده از این روش آبیاری دانسته‌اند. آیراس و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۱ در یک پروژه سه ساله، یک سامانه آبیاری زیرسطحی قطره‌ای را با یک سامانه آبیاری شیاری در حضور آب‌های زیرزمینی شور کم‌عمق برای دو محصول گوجه فرنگی و پنبه مقایسه کردند. عملکرد پنبه تحت آبیاری زیرسطحی قطره‌ای در طول سه سال بهبود یافت در حالی که در آبیاری شیاری ثابت باقی ماند و برای گوجه فرنگی نیز بازده در آبیاری زیرسطحی بیشتر از آبیاری شیاری بود.

لیندبلام و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۷ چگالش زیرسطحی هوای مرطوب برای تولید آب قابل خوردن و آبیاری زیرسطحی را بررسی کردند. این سامانه آبیاری در چند کشور شمال آفریقا از جمله تونس و الجزایر مورد استقبال واقع شد. میزان نرخ آب تولید شده برای آشامیدن $1/8 \text{ kg/m.day}$ برای هر لوله بود. هنگام استفاده از لوله‌های زهکشی برای آبیاری زیرسطحی قطره‌ای این مقدار به $3/1 \text{ kg/m.day}$ افزایش یافت. یامال و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۸ تأثیر عوامل مختلف بر روی عملکرد یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از فرآیند رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی را تحت شرایط اقلیمی شهر آنکارا در ترکیه بررسی کردند و بهبود قابل توجهی را در بهره‌وری از سامانه با افزایش درجه حرارت آب اولیه در داخل مخزن ذخیره‌سازی مشاهده کردند.

پایر و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۸ تأثیر مقدار آبیاری اعمال شده با آبیاری زیرسطحی قطره‌ای بر تبخیر و تعرق ذرت، عملکرد و راندمان مصرف آب در آب و هوای نیمه‌خشک را بررسی کردند. در این مطالعه روابط خوبی بین شاخص‌های عملکرد محصول و تبخیر و تعرق ذرت به‌دست آمد. جلیبی

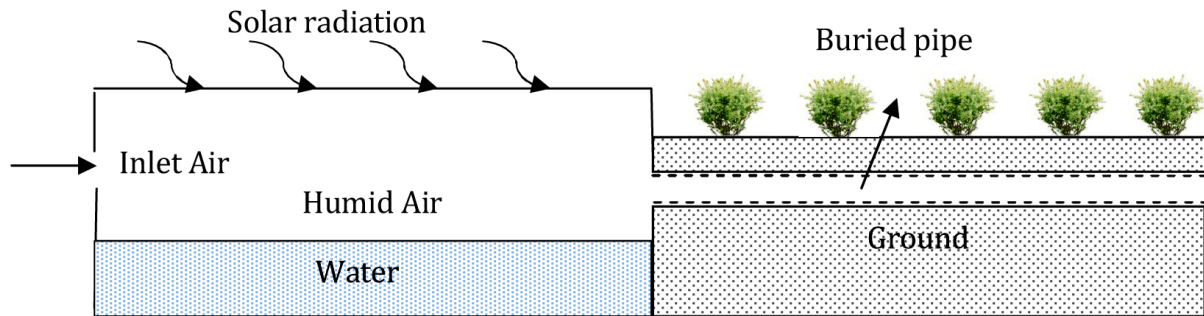
^۱Furrow irrigation

و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۲ آبیاری سطحی و زیرسطحی را بر عملکرد کمی و کیفی پنبه بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که بیشترین کارایی و عملکرد مصرف آب در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مشاهده شد. هیرد و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۲ در یک پژوهش چند ساله از لحاظ اقتصادی، آبیاری زیرسطحی قطره‌ای در تولید علوفه را در استرالیا بررسی کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که نرخ بازگشت سرمایه برای توجیه سامانه آبیاری زیرسطحی قطره‌ای برای مراتع چند ساله مناسب و کافی است.

دورتاسانتوس و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۵ به بررسی سامانه‌های آبیاری زیرسطحی و سطحی در کاشت گیاه جاتروفا در زمین‌های کشاورزی متروک در جزیره فوئرته و نتورا واقع در جزایر قناری اسپانیا که یکی از مناطق بسیار خشک اتحادیه اروپا بوده است پرداختند. ارزیابی در ۴۸ ماه انجام شد و نشان داد که آب استفاده شده برای آبیاری در سامانه آبیاری زیرسطحی قطره‌ای کمتر از سامانه آبیاری سطحی بود. کابیل و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۵ در یک پژوهش مروری تولید آب برای نیازهای آبیاری و آشامیدنی در مناطق خشک با استفاده از سامانه بسته گلخانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مزایای طرح‌های جدید آبیاری را از نظر فنی و اقتصادی با طرح‌های پیشین مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که آبیاری‌های نوین نظیر آبیاری زیرسطحی قطره‌ای دارای کارایی و صرفه‌جویی بیشتر در مقایسه با سایر روش‌های آبیاری می‌باشد.

آیراس و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۵ به بررسی سامانه آبیاری زیرسطحی در بخش تولید کشاورزی در هر دو محصول سالپانه و چند ساله در کالیفرنیا پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که سامانه آبیاری زیرسطحی مزایای قابل توجهی در افزایش عملکرد، کیفیت محصول، کاهش آبیاری و کاهش هزینه‌های زراعی برای کنترل علف‌های هرز و سموم در مقایسه با سایر روش‌های آبیاری دارا می‌باشد. آکاتی و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۶ یک آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی را به‌منظور شیرین‌سازی و آبیاری زیرسطحی بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که میزان بهینه آب تولید شده در هر متر لوله برابر با $3/8121 \text{ kg/m.day}$ می‌باشد. روبلز و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۶ اثر آبیاری زیرسطحی قطره‌ای بر نوسانات قطر تنه درخت لیمو بالغ را در مقایسه با آبیاری قطره‌ای سطحی مقایسه کردند. نتایج نشان دادند که استفاده از سامانه آبیاری زیرسطحی باعث افزایش بهره‌وری مصرف آب و صرفه‌جویی ۱۹ درصدی مصرف آب در مقایسه با سامانه آبیاری سطحی گردید. یان مو و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۷ یک روش کاشت جدید برای آبیاری زیرسطحی به نام ردیف جایگزین-کاشت تخت را که شامل حذف خاک سطحی مرطوب و پس از آن کاشت دانه بود بررسی کردند و دریافتند که رطوبت خاک در این روش بالاتر از سایر روش‌های آبیاری از جمله آبیاری سطحی بود و باعث صرفه‌جویی در مصرف آب گردید.

با توجه به بررسی‌ها و نکات ذکر شده در مورد انواع روش‌های آبیاری و مشکلات موجود در مناطق خشک و نیمه خشک و از طرفی هزینه فراوان



شکل ۱: شماتیک سامانه آبیاری زیر سطحی خورشیدی

Fig. 1. Schematic of solar submarine irrigation system

- هوای خروجی از استخر در شرایط اشباع فرض شده است.
- از اتلاف حرارت و جرم تجهیزات دستگاه به محیط صرف نظر شده است.
- سرعت هوای روی سطح آب درون استخر برابر با سرعت فن فرض شده است.

اجزای تشکیل دهنده سامانه از یک استخر خورشیدی به عنوان واحد رطوبت زن و لوله دفن شده در خاک به عنوان واحد چگالنده تشکیل شده است که به بررسی و فرمول بندی آن‌ها پرداخته می شود.

۲-۱- استخر خورشیدی به عنوان واحد رطوبت زنی

یکی از اجزای این سامانه می باشد که هدف آن افزایش نسبت رطوبت و افزایش دمای هوای خروجی از استخر است. آب با دمای مشخص وارد استخر خورشیدی می شود. ارتفاع آب درون حوضچه کم و در حدود ۲ الی ۱۰ سانتی متر می باشد. قسمت ورودی استخر به سمت جهت باد غالب قرار داده می شود. با تابش خورشید بر آن، آب تبخیر شده و تبادل گرما و جرم بین دو سیال صورت می گیرد. هوا گرم شده و دمای آن افزایش می یابد. در طول استخر رطوبت هوا افزایش یافته تا به شرایط اشباع یا نزدیک به اشباع برسد، سپس با استفاده از یک فن، این هوای مرطوب و گرم به سمت لوله های دفن شده در خاک به عنوان واحد چگالنده منتقل می شود. روی استخر با شیشه پوشانده شده است که با ایجاد یک حالت گلخانه ای به بالا رفتن دمای هوا و رطوبت در استخر کمک می کند. نمایی از واحد رطوبت زنی در شکل ۲ آورده شده است.

۲-۱-۱- معادلات حاکم در استخر خورشیدی

در آغاز، قانون اول ترمودینامیک برای یک حجم کنترل هوای درون حوضچه و بالای آب نوشته می شود. با به کار بردن قانون اول ترمودینامیک و موازنه انرژی و جرم برای حجم کنترل، معادلات حاکم بر حوضچه به دست می آید. در شکل ۳ حجم کنترل آورده شده است.

چون ضریب جذب هوا کوچک می باشد، از انتقال حرارت تشعشع بین

استفاده از سوخت های فسیلی برای شیرین سازی آب و همچنین انتقال آب به مناطق دارای مشکل کمبود آب، در این پژوهش یک روش و سامانه ترکیبی جهت شیرین سازی خورشیدی^۱ و آبیاری برای مصارف آشامیدن و کشاورزی مورد بررسی قرار می گیرد به طوری که از هوای مرطوب درون لوله دفن شده در خاک جهت چگالش آب استفاده می شود. در این سامانه از انرژی خورشیدی به عنوان یک انرژی تجدیدپذیر و پاک استفاده می شود. در پژوهش های گذشته فرض بر وجود آب و در دسترس بودن منابع آبی بوده است و سپس به بررسی تأثیر روش آبیاری زیرسطحی در کاهش مصرف آب در مقایسه با روش های آبیاری دیگر پرداخته شده اما در این پژوهش فرض بر کمبود منابع آبی بوده و آب شیرین قابل استفاده برای آبیاری از آب شور و غیر قابل شرب به دست آورده شده است.

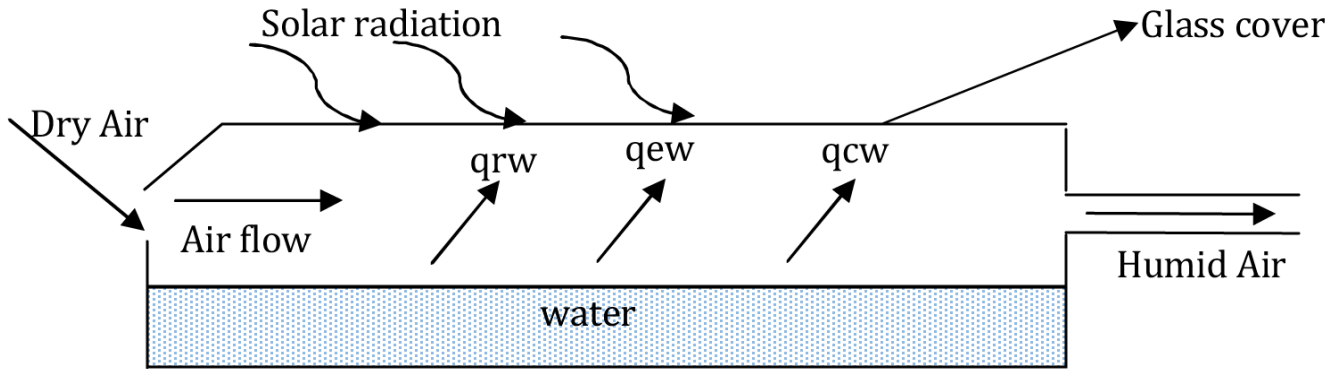
۲- تشریح سامانه

سامانه آبیاری زیرسطحی خورشیدی به علت استفاده از انرژی تجدیدپذیر خورشید و همچنین امکان استفاده از آب های شور مزه و غیر قابل شرب از کارآیی بسیاری بالایی برخوردار بوده و از نظر اقتصادی بسیار به صرفه می باشد زیرا تنها هزینه اولیه مربوط به ساخت سامانه می باشد و منبع انرژی آن خورشید است که به صورت رایگان و همیشگی در دسترس است. این فن آوری توانایی بسیار دقیقی اضافه کردن آب، مواد مغذی و دیگر مواد شیمیایی به منطقه ریشه گیاه در زمان خاص و فرکانس مورد نیاز را دارد علاوه بر آن کنترل علف های هرز به طور مؤثری بهتر می شود [۶]. در شکل ۱ سامانه آبیاری زیرسطحی خورشیدی مشاهده می گردد.

فرض هایی که برای ساده سازی مسأله مورد استفاده قرار گرفته اند عبارتند از:

- تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی ناچیز است.
- دمای آب درون استخر ثابت است.
- هوا و بخار آب به شکل گاز کامل در نظر گرفته شده اند.
- فرآیند در شرایط پایا فرض شده است.

¹Solar desalination



شکل ۲: شماتیک استخر خورشیدی
Fig. 2. Schematic of solar pool

با جایگذاری رابطه (۷) در رابطه (۶)، فرمول (۸) حاصل می‌گردد.

$$h_{ao} - h_{ai} = C_{pa}(T_o - T_i) \quad (7)$$

$$C_{pa}(T_o - T_i) + \omega_o h_{vo} - \omega_i h_{vi} = \frac{1}{\dot{m}_a}(Q_{cw} + Q_{ew}) \quad (8)$$

در رابطه (۸)، T_i دمای هوای ورودی به استخر خورشیدی می‌باشد. C_{pa} ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت می‌باشد که در جداول ترمودینامیکی موجود می‌باشد یا می‌توان به صورت تقریبی از رابطه (۹) به دست آورد [۲۲].

$$C_p = 999.2 + 0.1434 \times T + 1.101 \times 10^{-4} \times T^2 - 6.758 \times 10^{-8} \times T^3 \quad (9)$$

آنتالپی بخار آب در گستره دمایی $10 < T < 50$ درجه سانتی‌گراد را می‌توان با خطای ناچیز از معادله (۱۰) به دست آورد [۲۳].

$$h_g(T) = 2501.3 + 1.82T, h_v \cong h_g \quad (10)$$

در تمام روابط بالا، دما بر حسب درجه سانتیگراد است. در معادله (۸) هدف یافتن نسبت رطوبت (ω_o) و دمای هوا خروجی استخر (T_o) می‌باشد. با معلوم بودن دمای هوای ورودی، آنتالپی با استفاده از جداول ترمودینامیکی به دست می‌آید. نسبت رطوبت هوای اشباع و آنتالپی هوای مرطوب با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) تعریف می‌شود [۲۴].

$$\omega_a = 7.7 \times 10^{-7} T^3 - 1.95 \times 10^{-5} T^2 + 0.00071T + 0.002 \quad (11)$$

$$h_a = 2.82 \times 10^{-5} T^4 - 0.00106T^3 + 0.0615T^2 + 1.32T + 10.5 \quad (12)$$

آب و هوا صرف نظر می‌شود. در شکل ۳ پارامترهای Q_{cw} و Q_{ew} به ترتیب انتقال حرارت جابه‌جایی بین آب و هوای عبوری و انتقال حرارت ناشی از تبخیر بین آب و هوا بوده و واحد آن‌ها وات می‌باشد که از روابط (۱) و (۲) به دست می‌آید [۲۱]. به علت کوچک بودن ضریب هدایت هوا از انتقال حرارت هدایت صرف نظر شده است.

$$Q_{cw} = h_c \cdot \Delta T \cdot A \quad (1)$$

$$Q_{ew} = \left(\frac{h_e}{c_a}\right) \cdot L_W \cdot (X_s - X_n) \cdot A \quad (2)$$

در رابطه (۲)، c_a گرمای ویژه هوای ورودی به استخر می‌باشد که مقدار آن ثابت و برابر 1005 J/kg.K می‌باشد. ΔT اختلاف دمای آب استخر و دمای هوا می‌باشد. از حجم کنترل شکل ۳ روابط (۳) و (۴) به دست می‌آید.

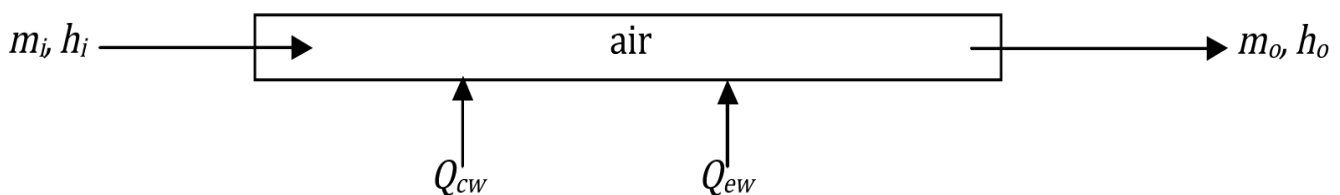
$$\dot{Q}_{cw} + \sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_o h_o \quad (3)$$

$$(\dot{m}_a h_{ao} + \dot{m}_{vo} h_{vo}) - (\dot{m}_a h_{ai} + \dot{m}_{vi} h_{vi}) = Q_{cw} + Q_{ew} \quad (4)$$

نسبت رطوبت طبق رابطه (۵) به دست می‌آید. با تقسیم رابطه (۴) بر \dot{m}_a که نرخ جریان هوا می‌باشد، رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (5)$$

$$h_{ao} + \omega_o h_{vo} - h_{ai} - \omega_i h_{vi} = \frac{1}{\dot{m}_a}(Q_{cw} + Q_{ew}) \quad (6)$$



شکل ۳: حجم کنترل هوا درون استخر خورشیدی
Fig. 3. Control volume of the air inside the solar pool

T_s دمای آسمان بوده و طبق رابطه (۲۱) به دست می آید [۲۷].

$$T_s = 0.0552 \times T_a^{1.5} \quad (21)$$

پس از محاسبه دمای هوای مرطوب و دمای شیشه در طول تبخیر کننده، حجم کنترل را برای آب درون استخر در نظر گرفته و دمای آب برای هر حجم کنترل محاسبه می شود. در شکل ۴ حجم کنترل آب درون استخر خورشیدی مشاهده می گردد.

از تعادل انرژی برای حجم کنترل آب، رابطه (۲۲) به دست می آید.

$$C_w \frac{T_w^{k+1} - T_w^k}{\Delta t} = A \alpha_w \tau_g G - Q_{cw} - q_{rw} A - Q_{ew} - q_{kw} A \quad (22)$$

در معادله (۲۲)، q_{rw} انتقال حرارت تشعشعی بین آب و شیشه و q_{kw} انتقال حرارت هدایت بین آب و محیط اطراف تبخیرکننده است که توسط روابط (۲۳) و (۲۴) به دست می آید.

$$q_{rw} = 0.9 \sigma (T_w^4 - T_g^4) \quad (23)$$

$$q_{kw} = K_{bs} (T_w - T_a) \quad (24)$$

در رابطه (۲۲) دمای آب مجهول است. مقدار 0.9 در رابطه (۲۳) مربوط به ضریب صدور است. مقدار انرژی که از خورشید بر واحد زمان به صورت عمود بر یک سطح وارد می شود را ثابت خورشیدی (G_{sc}) می نامند. مقدار این ثابت 1353 W/m^2 تعیین شد که در سال ۱۹۷۱ توسط سازمان فضایی ناسا و سال ۲۰۱۶ توسط انجمن تست و مواد آمریکا پذیرفته شد. مقدار تابش نرمال وارده بر سطح زمین در n امین روز سال از رابطه (۲۵) به دست می آید [۲۸].

$$G = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \quad (25)$$

مقدار n بین ۱ تا ۳۶۵ می باشد. مقدار زاویه انحراف خورشید از رابطه (۲۶) به دست می آید [۲۸].

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (26)$$

در معادله های ارائه شده برای استخر، از روش حل عددی تفاضل محدود استفاده می شود. هوا درون حجم کنترل حوضچه به اندازه Δx حرکت کرده

h_c ضریب انتقال حرارت جابه جایی و L_w گرمای نهان تبخیر آب می باشد که از فرمول های (۱۳) و (۱۴) به دست می آید [۲۱].

$$h_c = 2.8 + 3 \times v_a \quad (13)$$

$$L_w = 2500.8 - 2.36 \times T + 0.0016 \times T^2 - 0.00006 \times T^3 \quad (14)$$

واحد گرمای نهان تبخیر در رابطه بالا kJ/kg می باشد که برای برقراری تعادل دیمانسیون باید در 1000 ضرب شود تا واحد گرمای تبخیر J/kg شود. دمای آب در رابطه بالا برحسب $^\circ\text{C}$ است. X_g رطوبت مخصوص هوای اشباع در دمای آب تبخیرکننده و X_n رطوبت مخصوص هوا موجود در تبخیرکننده است که مقدار آن از روابط (۱۵) و (۱۶) به دست می آید.

$$X_s = \frac{P_{ws}}{P_{tot}} \cdot \frac{M_w}{M_a} \quad (15)$$

$$X_n = \frac{P_{gs}}{P_{tot} - P_{gs}} \times 0.622 \quad (16)$$

با استفاده از موازنه جرم، رطوبت مخصوص هوای خروجی از هر المان از رابطه (۱۷) محاسبه می گردد.

$$\omega_o = \omega_o + \frac{g_s}{m_a} \quad (17)$$

g_s نرخ جرم آب تبخیر شده از سطح استخر خورشیدی می باشد که از رابطه (۱۸) به دست می آید که در این رابطه Θ ضریب تبخیر می باشد که از رابطه (۱۹) محاسبه می شود [۲۵].

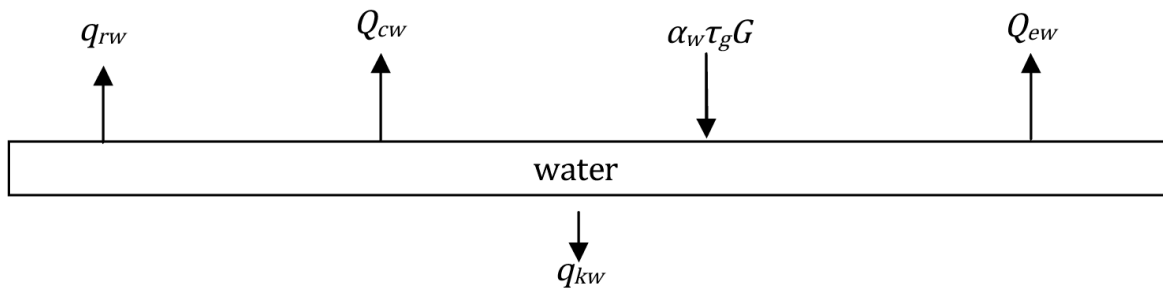
$$g_s = \left(\frac{h_c}{C_a}\right) \cdot (X_s - X_n) \cdot A \quad (18)$$

$$\Theta = 25 + 19 \times v_a \quad (19)$$

a_p سرعت هوا روی سطح آب درون استخر می باشد. با حل روابط (۸) تا (۱۹) دمای هوای خروجی از هر المان در طول تبخیر کننده محاسبه می گردد. دمای شیشه، با نوشتن تعادل انرژی برای شیشه از رابطه (۲۰) محاسبه می گردد [۲۶].

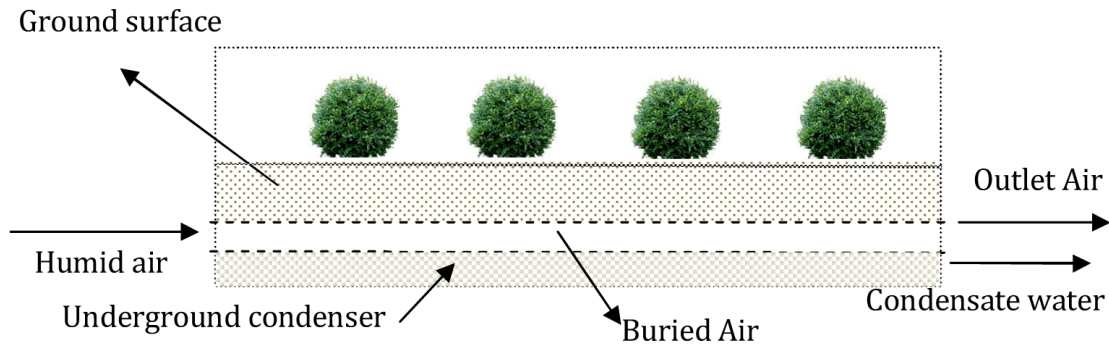
$$T_g = \frac{(0.02612T_w - 15.76T_w + 2392)T_w + A_r h_w T_a + A_r (0.048T_a - 9)T_s}{(0.02612T_w - 15.76T_w + 2392) + A_r h_w + A_r (0.048T_a - 9)} \quad (20)$$

¹American Society of Testing and Materials



شکل ۴: حجم کنترل آب درون استخر خورشیدی

Fig. 4. Control volume of the water inside the solar pool



شکل ۵: شماتیک لوله دفن در خاک

Fig. 5. Schematic of pipe inside the soil

$$\rho_{v,s} = \frac{e^{(77.345+0.0057(T+273.15)) - \frac{7235}{T+273.15}}}{(T+273.15)^{8.2}} \quad (30)$$

پس از محاسبه انتقال حرارت بین هوا و دیواره لوله دفن شده در زمین، جرم آب چگالیده شده از رابطه (۳۱) محاسبه می‌شود [۴]. نسبت رطوبت هوا در انتهای هر جز لوله از رابطه (۳۲) محاسبه می‌گردد.

$$m_c = \pi D \Delta Z \frac{q_{cond}}{L} \quad (31)$$

$$\omega_{i+1} = \omega_i + \frac{m_c}{m_a} \quad (32)$$

روش حل لوله مشابه استخر خورشیدی، تفاضل محدود می‌باشد. برای هر جزء لوله با انجام تمام مراحل فوق، میزان آب شیرین تولید شده و نسبت رطوبت محاسبه می‌گردد و این عمل تا هنگامی که رطوبت هوای درون لوله صفر شود ادامه پیدا می‌کند.

۳- مراحل انجام پژوهش و بررسی نتایج

این سامانه از یک استخر تشکیل شده است که آب با ارتفاع بسیار کم درون آن قرار دارد که با عبور جریان هوا از روی سطح آن، هوا گرم و رطوبت آن افزایش می‌یابد. در انتهای استخر، ورودی لوله دفن شده در خاک به‌عنوان واحد چگالنده قرار دارد. هوا که دما و رطوبت آن افزایش یافته به کمک یک فن که در انتهای استخر و ورودی قسمت چگالنده قرار دارد وارد لوله شده و در اثر تبادل حرارت و از دست دادن گرما، آب شیرین تولید می‌شود که توسط منافذ روی لوله به پای ریشه گیاه می‌رسد و یا برای مصارف آشامیدن جمع‌آوری می‌گردد. فن مورد استفاده علاوه بر کمک به تبخیر سطحی آب استخر، هوای مرطوب واحد رطوبت‌زنی را به قسمت چگالنده بهتر می‌رساند. نوآوری این طرح به‌منظور استفاده بهینه از تابش خورشیدی، قرار دادن یک صفحه آینه‌ای برای تابش بیشتر نور خورشید به آب درون استخر است. این آینه در ضلع شمالی استخر و به سمت جنوب قرار می‌گیرد تا در طول روز که خورشید از سمت شرق طلوع و به سمت غرب غروب می‌کند میزان تابش خورشیدی به استخر افزایش یابد. هدف از این کار، استفاده حداکثری

و مقدار دمای آب درون حوضچه، هوا خروجی از آن حجم کنترل و دمای شیشه به‌دست می‌آید. برای حجم کنترل بعدی، مقادیر ورودی برابر با مقادیر خروجی حجم کنترل قبلی می‌باشد و این عمل تا جایی که هوای ورودی به انتها حوضچه برسد، ادامه پیدا می‌کند.

۲-۲- لوله دفن شده در خاک به‌عنوان واحد چگالنده

چگالش زمانی روی می‌دهد که دمای بخار کمتر از دمای اشباع شود. در صنعت این فرآیند معمولاً بر اثر تماس بین بخار و یک سطح سرد به‌وجود می‌آید. هوا که درون استخر رطوبت و دمای آن بالا رفته، وارد لوله شده و در اثر برخورد هوای مرطوب به سطح لوله سرد دفن شده در زمین به‌عنوان چگالنده، تبادل حرارت و چگالش صورت می‌گیرد که آب تولید شده برای شرب جمع‌آوری یا مستقیماً از طریق لوله‌های دارای منفذ به پای ریشه گیاه منتقل می‌شود.

۲-۲-۱- معادلات حاکم در لوله

با در نظر گرفتن حجم کنترل شکل ۵، انتقال حرارت بین هوا و دیواره لوله دفن شده درون زمین به‌وسیله معادله (۲۷) تعریف می‌گردد [۴].

$$q_{cond} = L h_m (\phi \rho_{v,s}(T_a) - \rho_{v,s}(T_p)) \quad (27)$$

در رابطه (۲۷)، h_m ضریب جابه‌جایی جرم است که از رابطه (۲۸) محاسبه می‌شود.

$$h_m = S h_D \frac{D_{AB}}{D} \quad (28)$$

$S h_D$ عدد شرود لوله می‌باشد که برای جریان آرام توسعه یافته درون لوله برابر با ۳/۶۶ می‌باشد [۲۹]. D_{AB} ضریب پخش دایفری بوده و طبق رابطه (۲۹) که توسط بولز و تو در سال ۱۹۷۶ ارائه شد، محاسبه می‌گردد [۳۰].

$$D_{AB} = -2.775 \times 10^{-6} + 4.479 \times 10^{-8} T + 1.656 \times 10^{-10} T^2 \quad (29)$$

$\rho_{v,s}$ چگالی بخار اشباع می‌باشد که طبق معادله (۳۰) محاسبه می‌شود [۴].

اکنون تأثیر استفاده از آینه که با افزایش تابش خورشید به سطح استخر سبب افزایش دمای آب درون استخر می‌شود مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حالت دمای هوای ورودی 25°C می‌باشد. طول استخر خورشیدی 20 m و عرض آن 10 m می‌باشد. رطوبت نسبی 20% ، سرعت هوای روی سطح آب 0.1 m/s و سطح مقطع ورودی 0.1 m^2 در نظر گرفته شده است. دمای آب درون استخر خورشیدی به ترتیب 25°C و 30°C و 35°C و 40°C و 45°C و 50°C در نظر گرفته شده است. در شکل ۶ تغییرات دمای هوای ورودی به استخر در هر المان طول استخر آورده شده است. در شکل ۶ مشاهده می‌گردد هرچه دمای آب درون استخر بالاتر باشد، دمای هوای خروجی از استخر به علت تبادل حرارت بیشتر بین آب و هوا درون استخر افزایش می‌یابد. به علت آن که در ابتدا دمای هوای ورودی ظرفیت بیشتری برای پذیرش رطوبت و بالا رفتن دما را دارد لذا شیب نمودار در آغاز تندتر می‌باشد و هر چه به سمت انتهای استخر حرکت شود شیب نمودار کمتر می‌شود. مقدار آب تبخیر شده در هر جزء طول استخر برای دماهای آب ذکر شده در شکل ۷ و مقدار آب چگالیده شده در طول جزء لوله نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. دمای لوله به‌عنوان واحد چگالنده ثابت 15°C فرض شده است.

در شکل شماره ۷ مشاهده می‌گردد با بالا رفتن دمای آب درون استخر، جرم آب تبخیر شده از سطح استخر افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث تولید بخار آب بیشتر می‌گردد که این بخار آب با انتقال به لوله توسط فن همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد باعث افزایش بیشتر مقدار آب تولیدی می‌گردد. علت تولید آب بیشتر آن است که درصد رطوبت‌پذیری هوا در طول رطوبت‌زن افزایش یافته و به شرایط اشباع نزدیک شده است در نتیجه رطوبت بیشتری به لوله دفن شده در خاک به‌عنوان واحد چگالنده می‌رسد.

از انرژی در ساعت خورشیدی و بالا بردن دمای آب درون استخر است. همچنین در کف استخر، از پارچه سیاه پرزدار به‌علت بالا بودن ضریب جذب گرما آن استفاده می‌شود. هدف از استفاده از پارچه سیاه پرزدار، بالا بردن میزان تبخیر در استخر می‌باشد. ابعاد صفحه آینه‌ای در این پژوهش برابر با ابعاد استخر در نظر گرفته شده است. ساعت خورشیدی که مدت زمان عبور خورشید از نصف‌النهار ناظر است از رابطه (۳۳) محاسبه می‌گردد [۲۸].

$$\text{solar time} = \text{standard time} + 4(l_{st} - l_{IOC}) + E \quad (33)$$

در رابطه (۳۳)، l_{st} نصف‌النهار استاندارد منطقه محلی، l_{IOC} عرض جغرافیایی محلی و E معادله زمان می‌باشد که از رابطه (۳۴) به‌دست می‌آید [۲۸].

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B) \quad (34)$$

مقدار B در فرمول (۳۴) از رابطه (۳۵) محاسبه می‌گردد [۲۸].

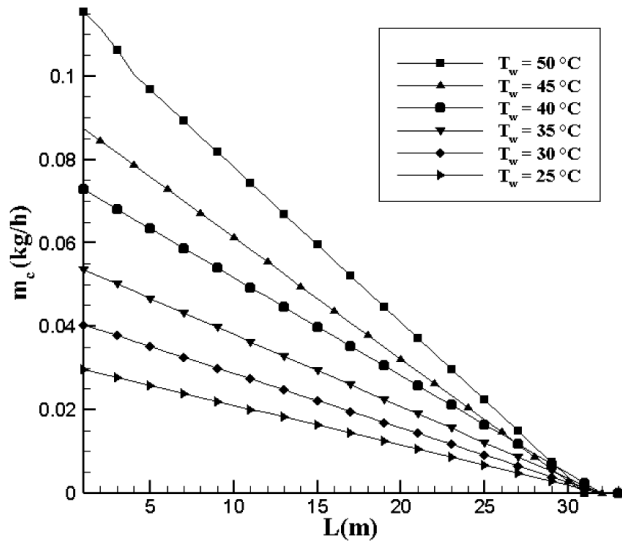
$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (35)$$

زاویه آینه برای هر منطقه متفاوت می‌باشد و با توجه به زاویه تابش خورشید و زاویه بهینه صفحات فتوولتائیک می‌توان آن را محاسبه کرد. به‌عنوان مثال مقدار بهینه زاویه صفحات فتوولتائیک در شهر زاهدان $27/9$ درجه می‌باشد [۳۱] پس مقدار زاویه آینه‌ها در این شهر به‌صورت تجربی با استفاده از روابط هندسی 55 درجه است. در این زاویه بیشترین بازتابش خورشید از سطح آینه به استخر وجود دارد. به‌منظور صحت‌سنجی کد نوشته شده، آب تولید شده کار حاضر با نتایج پژوهش عددی اُکاتی و همکاران [۱۹] و پژوهش عددی لیندبلاد و همکاران [۱۲] مقایسه گردید که نزدیک بودن نتایج با یکدیگر مشاهده شد. در جدول ۱ مقایسه نتایج، شرایط شبیه‌سازی و درصد خطا آورده شده است.

جدول ۱: مقایسه بین نتایج پژوهش حاضر و پژوهش عددی اُکاتی و همکاران [۱۹] و پژوهش عددی لیندبلاد و همکاران [۱۲]

Table 1. Comparison between the results of this research and numerical research of okati *et al* and numerical research of Lindblom *et al*

پارامتر	کار حاضر	کار اُکاتی و همکاران [۱۹]	کار لیندبلاد و همکاران [۱۲]
دما ($^{\circ}\text{C}$)	۶۰	۶۰	۶۰
رطوبت نسبی (%)	۷۰	۷۰	۷۰
سرعت (m/s)	۳/۵	۳/۵	۳/۵
قطر لوله (m)	۰/۲	۰/۲	۰/۲
آب تولیدشده (kg/m.day)	۲/۲۸	۲/۴۳	۲/۲۴
درصد خطا (%)		۶/۱۷	۱/۷۸



شکل ۸: میزان آب چگالیده شده در هر متر لوله ۱۵°C برای دماهای مختلف آب استخر

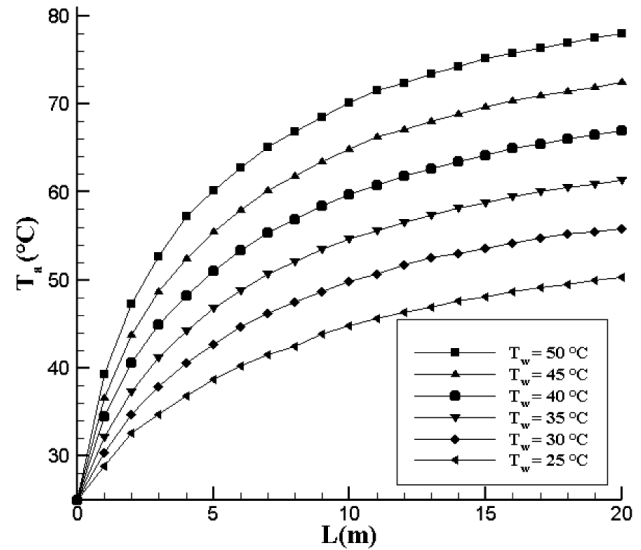
Fig. 8. The amount of condensed water per meter of 15°C pipe for various pool water temperature

که در طول لوله بین ۳۰ m تا ۳۲ m رطوبت هوا درون لوله صفر می‌شود و دیگر امکان چگالش و تولید آب بیشتر در لوله وجود ندارد.

با توجه به محدود بودن تابش خورشید در طول شبانه روز، استفاده از صفحه آینه‌ای باعث افزایش بهره‌وری مفید از مدت زمان تابش نور خورشید می‌شود. در شکل ۹ نمایی از سامانه آبیاری زیرسطحی خورشیدی مشاهده می‌شود.

اکنون به منظور بهینه‌سازی سامانه از روش تاگوچی با معرفی میزان آب تولید شده به‌عنوان تابع هدف استفاده می‌شود. تاگوچی روش خود را بر مبنای تعامد آرایه‌ها بیان کرد که کمترین تعداد آزمایش‌های ممکن را پیشنهاد می‌دهد. جهت ارزیابی و انتخاب پارامترهای بهینه، روش تاگوچی از یک مقدار آماری که نسبت سیگنال به نویز (S/N) نامیده می‌شود و معیاری جهت نمایش میزان سیگنال مفید یعنی میزان آب تولید شده در مقابل سیگنال دیگر یعنی پارامترهای موثر بر تولید آب می‌باشد، استفاده می‌کند که در حقیقت تابع لگاریتمی خروجی مناسب است. روش تاگوچی به بررسی کیفیت در هنگام طراحی تأکید دارد، درحالی که روش‌های متداول بر مبنای بازرسی و کنترل کیفیت در حین فرآیند شبیه‌سازی و یا بعد از شبیه‌سازی تأکید دارد و استفاده از این روش سبب صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌گردد. در این حالت ابعاد استخر ۱۰ m × ۱۰ m در نظر گرفته شده است. پارامترهای موثر بر تولید آب در سه سطح^۱ مختلف معرفی می‌شود که مطابق با اقلیم آب و هوایی ایران در نظر گرفته شده است و بیانگر آب هوای گرم و خشک، معتدل و سرد می‌باشد که در جدول ۲ آورده شده است. همچنین امکان بررسی سایر شرایط آب و هوایی نظیر گرم و مرطوب وجود

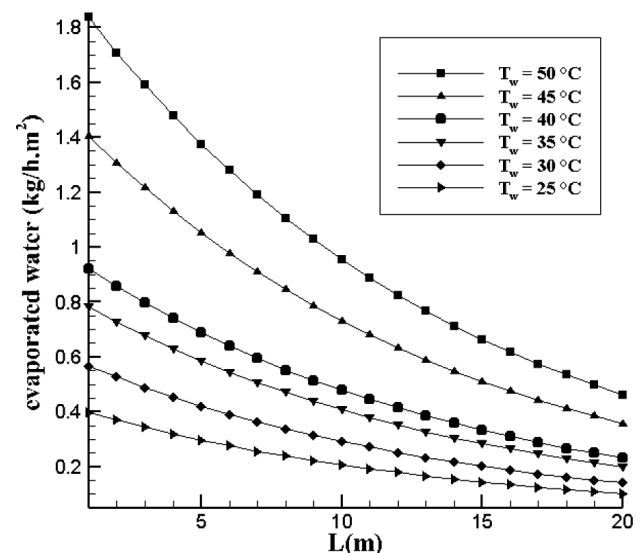
^۱Level



شکل ۶: تغییرات دمای هوای ۲۵°C در طول استخر برای دماهای مختلف آب استخر

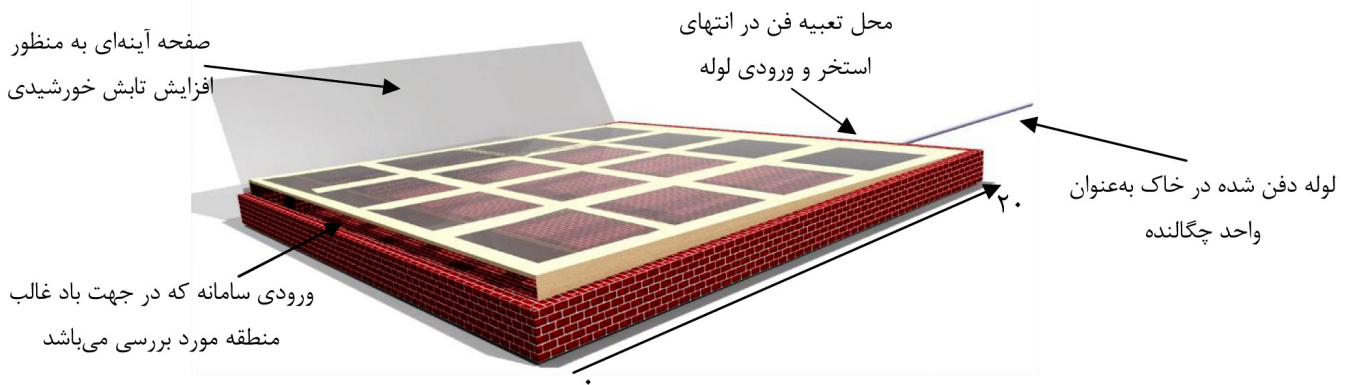
Fig. 6. 25°C air temperature changes along the pool for various pool water temperature

بنابراین با افزایش دمای آب استخر و به‌دنبال آن افزایش مقدار آب تبخیر شده از سطح استخر، مقدار آب تولید شده افزایش می‌یابد. پس نتیجه می‌شود استفاده از آینه و پارچه سیاه پرزدار برای افزایش میزان تابش ورودی به استخر و افزایش تبخیر سطحی، باعث افزایش دمای آب درون استخر و در نتیجه تولید آب بیشتر در لوله می‌شود. بیشترین مقدار آب تولید شده برای دمای آب استخر ۵۰°C و به میزان ۱/۸۴۴۸۱۰۳ kg/h به‌دست آمد. در این پژوهش طول لوله نامحدود فرض شده است. در شکل ۸ مشاهده می‌گردد



شکل ۷: میزان آب تبخیر شده در طول استخر برای دماهای مختلف آب استخر

Fig. 7. The amount of water evaporated along the pool for various pool water temperature



شکل ۹: شماتیک سامانه آبیاری زیر سطحی

Fig. 9. Schematic of solar submarine irrigation system

اکنون به بررسی و بحث نتایج حاصل از تحلیل نرم افزار مینی تب پرداخته می‌شود. هدف از این پژوهش دستیابی به میزان آب تولید شده بیشتر برای مصرف می‌باشد. در کلیه مراحل این بخش طول لوله ۱ متر می‌باشد. در ابتدا تأثیر پارامتر رطوبت نسبی همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، بررسی می‌گردد. سطح شماره ۱ رطوبت نسبی ۲۰٪ یعنی مناطق خشک و نیمه‌خشک، سطح شماره ۲ رطوبت نسبی ۵۰٪ که مربوط به مناطق نیمه مرطوب و سطح ۳ رطوبت نسبی ۸۰٪ یعنی مناطق مرطوب را نشان می‌دهد.

دارد زیرا در بهینه‌سازی حالتی که دمای هوا بالا و رطوبت نیز بالا باشد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

روش تاگوچی با استفاده از پارامتر و سطح‌های تعریف شده، ۲۷ آزمایش را معرفی می‌کند. هر آزمایش ابتدا در نرم افزار متلب^۱ شبیه‌سازی و محاسبه شده و نتایج حاصل وارد مینی تب^۲ شده است. آزمایش‌های معرفی شده در جدول ۳ و نتایج آزمایش‌ها در جدول ۴ آورده شده است. پارامترهای جدول ۳ در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۲: پارامتر و سطح‌های موثر بر آزمایش

Table 2. Parameters and levels affecting the test

شماره پارامتر	پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
۱	رطوبت نسبی (%)	۲۰	۵۰	۸۰
۲	دمای آب	۴۰	۵۰	۶۰
۳	فشار (kPa)	۹۵	۱۰۰	۱۰۵
۴	دمای لوله (°C)	۱۵	۲۰	۲۵
۵	سطح مقطع ورودی هوا (m ²)	۰/۱	۰/۵	۰/۹
۶	دمای هوا (°C)	۴۰	۳۵	۳۰
۷	قطر لوله (m)	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۵
۸	سرعت هوا (m/s)	۰/۰۱	۰/۰۵	۱/۰

^۱MATLAB

^۲MINITAB

جدول ۳: آزمایش‌های معرفی شده

Table 3. Introduced tests

شماره پارامتر								شماره آزمایش
۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۰/۰۱	۰/۱	۴۰	۰/۹	۱۵	۱۰۵	۵۰	۵۰	۱۵
۰/۱	۰/۱۵	۳۵	۰/۱	۲۰	۹۵	۴۰	۵۰	۱۶
۰/۰۱	۰/۰۵	۳۰	۰/۵	۲۰	۹۵	۴۰	۵۰	۱۷
۰/۰۵	۰/۱	۴۰	۰/۹	۲۰	۹۵	۴۰	۵۰	۱۸
۰/۰۱	۰/۱	۳۰	۰/۱	۲۰	۱۰۵	۶۰	۸۰	۱۹
۰/۰۵	۰/۱۵	۴۰	۰/۵	۲۰	۱۰۵	۶۰	۸۰	۲۰
۰/۱	۰/۰۵	۳	۰/۹	۲۰	۱۰۵	۶۰	۸۰	۲۱
۰/۰۵	۰/۱	۳۰	۰/۱	۲۵	۹۵	۵۰	۸۰	۲۲
۰/۱	۰/۱۵	۴۰	۰/۵	۲۵	۹۵	۵۰	۸۰	۲۳
۰/۰۱	۰/۰۵	۳۵	۰/۹	۲۵	۹۵	۵۰	۸۰	۲۴
۰/۱	۰/۱	۳۰	۰/۱	۱۵	۱۰۰	۴۰	۸۰	۲۵
۰/۰۱	۰/۱۵	۴۰	۰/۵	۱۵	۱۰۰	۴۰	۸۰	۲۶
۰/۰۵	۰/۰۵	۳۵	۰/۹	۱۵	۱۰۰	۴۰	۸۰	۲۷

شماره پارامتر								شماره آزمایش
۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۰/۰۱	۰/۰۵	۴۰	۰/۱	۱۵	۹۵	۶۰	۲۰	۱
۰/۰۵	۰/۱	۳۵	۰/۵	۱۵	۹۵	۶۰	۲۰	۲
۰/۱	۰/۱۵	۳۰	۰/۹	۱۵	۹۵	۶۰	۲۰	۳
۰/۰۵	۰/۰۵	۴۰	۰/۱	۲۰	۱۰۰	۵۰	۲۰	۴
۰/۱	۰/۱	۳۵	۰/۵	۲۰	۱۰۰	۵۰	۲۰	۵
۰/۰۱	۰/۱۵	۳۰	۰/۹	۲۰	۱۰۰	۵۰	۲۰	۶
۰/۱	۰/۰۵	۴۰	۰/۱	۲۵	۱۰۵	۴۰	۲۰	۷
۰/۰۱	۰/۱	۳۵	۰/۵	۲۵	۱۰۵	۴۰	۲۰	۸
۰/۰۵	۰/۱۵	۳۰	۰/۹	۲۵	۱۰۵	۴۰	۲۰	۹
۰/۰۱	۰/۱۵	۳۵	۰/۱	۲۵	۱۰۰	۶۰	۵۰	۱۰
۰/۰۵	۰/۰۵	۳۰	۰/۵	۲۵	۱۰۰	۶۰	۵۰	۱۱
۰/۱	۰/۱	۴۰	۰/۹	۲۵	۱۰۰	۶۰	۵۰	۱۲
۰/۰۵	۰/۱۵	۳۵	۰/۱	۱۵	۱۰۵	۵۰	۵۰	۱۳
۰/۱	۰/۰۵	۳۰	۰/۵	۱۵	۱۰۵	۵۰	۵۰	۱۴

سطح شماره ۳ فشار ۱۰۵ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد. سطح ۱ بالاتر از دو سطح دیگر قرار دارد لذا بیشترین مقدار آب شیرین در این سطح و فشار ۹۵ کیلوپاسکال به دست می‌آید.

در بررسی پارامتر شماره ۴ یعنی دمای لوله در شکل ۱۳، سطح شماره ۱ که مربوط به دمای لوله 15°C می‌باشد بالاتر از دو سطح دیگر مشاهده می‌گردد. سطح شماره ۲ مربوط به دمای لوله 20°C و سطح شماره ۳ مربوط به دمای لوله 25°C می‌باشد. با بالا رفتن شماره سطح مشاهده می‌گردد که نمودار شکل نزولی دارد پس مقدار آب چگالیده شده با کاهش دمای لوله، افزایش می‌یابد. محل دفن لوله و دمای خاک در عمقی که لوله کار گذاشته شده است با هم ارتباط مستقیم دارند و در این پژوهش دمای لوله برابر با

سطح شماره ۱ بالاتر از دو سطح دیگر بوده و نشان دهنده تولید آب بیشتر در رطوبت نسبی ۲۰٪ می‌باشد. همچنین با بیشتر شدن مقدار رطوبت نسبی در این پژوهش، مقدار آب تولیدی برای لوله به طول واحد کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۱ و بررسی پارامتر دمای آب، سطح شماره ۳ که مربوط به دمای 60°C است، از دو سطح شماره ۱ و شماره ۲ که به ترتیب نشان دهنده دمای 40°C و 50°C است بالاتر بوده و سطح شماره ۱ پایین‌ترین مقدار را دارا می‌باشد پس با افزایش دمای آب درون استخر، میزان آب تولید شده برای لوله به طول واحد افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۲ تأثیر فشار محیط مورد بررسی قرار گرفته است. سطح شماره ۱ فشار ۹۵ کیلوپاسکال، سطح شماره ۲ فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال و

جدول ۴: نتایج آزمایش‌ها

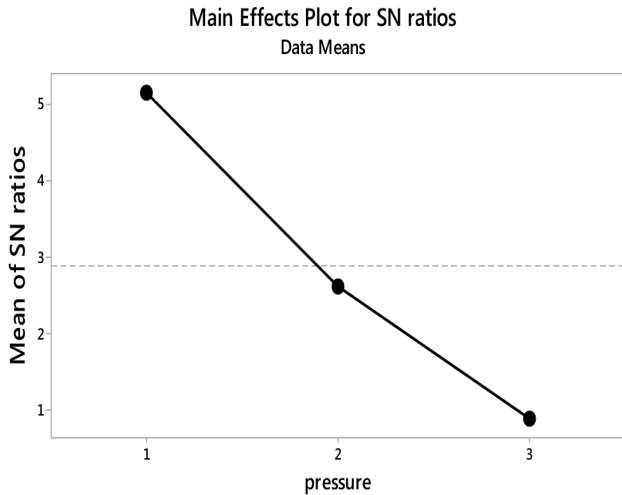
Table 4. Tests results

شماره آزمایش	جرم آب (kg/m.day)
۱۵	۱/۸۷۷۰
۱۶	۱/۶۱۶۰
۱۷	۱/۷۰۷۶
۱۸	۱/۸۵۲
۱۹	۱/۱۴۱۴
۲۰	۱/۳۸۸۳
۲۱	۰/۹۰۶۳
۲۲	۰/۶۷۷۰
۲۳	۱/۹۱۶۲
۲۴	۰/۸۳۷۷
۲۵	۱/۰۶۶۳
۲۶	۲/۰۹۲۶
۲۷	۱/۱۵۲۰

شماره آزمایش	جرم آب (kg/m.day)
۱	۵/۴۳۴۸
۲	۲/۷۹
۳	۰/۷۰۳۰
۴	۰/۷۲۱۲
۵	۰/۸۹
۶	۱/۶۲۶۱
۷	۲/۹۱۳۳
۸	۳/۸۹۴۹
۹	۰/۷۵۱
۱۰	۱/۸۵۷۳
۱۱	۰/۳۷۲۶
۱۲	۱/۱۶۳۶
۱۳	۱/۷۲۲۶
۱۴	۰/۷۷۵۳

برای لوله به طول واحد نیز کاهش می‌یابد. می‌توان با تغییر سطح مقطع هوای ورودی به استخر، میزان آب تولید شده را کنترل کرد. تغییر سطح مقطع هوای ورودی باعث تغییر در دبی هوای ورودی به استخر می‌شود. در بررسی پارامتر دمای هوای ورودی به استخر، سه دمای 35°C و 30°C به‌عنوان سه سطح مورد بررسی در روش تاگوچی معرفی می‌گردد. مشاهده می‌شود که سطح شماره ۱ یعنی دمای هوا 40°C بالاتر از دو سطح دیگر یعنی دماهای 35°C و 30°C قرار دارد و میزان آب تولید شده با افزایش دمای هوای ورودی به حوضچه، افزایش می‌یابد که در این‌جا بیشترین دمای هوای ورودی 40°C است. تأثیر این پارامتر در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود. در شکل ۱۶ پارامتر قطر لوله بررسی می‌گردد. مشاهده می‌گردد که

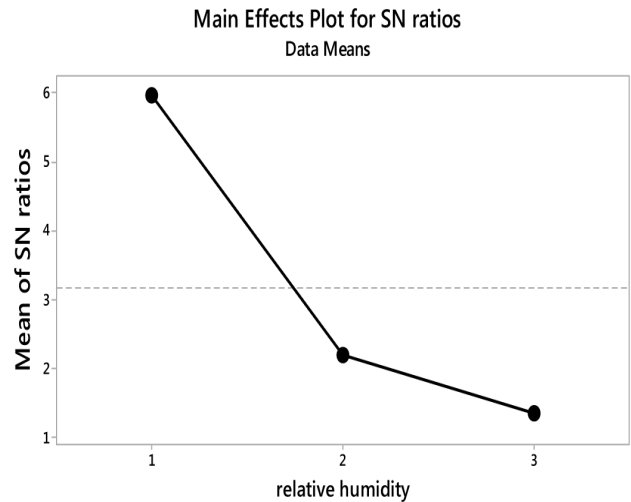
دمای خاک در عمق مورد بررسی فرض شده است. دمای خاک تا عمق ۱۰ سانتی‌متری ابتدا اندکی در مقایسه با دمای سطح خاک افزایش می‌یابد و سپس از عمق ۱۰ سانتی‌متری تا عمق ۳۰ سانتی‌متری دما کاهش می‌یابد. از عمق ۳۰ سانتی‌متر به بعد دمای خاک مجدد افزایش را نشان می‌دهد [۳۲]. عمق لوله برای مصارف کشاورزی با توجه به نوع گیاه بین ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد و برای مصارف آشامیدن عمق ۳۰ سانتی‌متر مناسب می‌باشد. در بررسی پارامتر سطح مقطع هوای ورودی به استخر در شکل ۱۴ مشاهده گردید که سطح شماره ۱ که نشان دهنده سطح مقطع هوای ورودی 1 m^2 است بالاتر از دو سطح دیگر که مربوط به سطح مقطع هوای ورودی 0.5 m^2 و 0.9 m^2 می‌باشد قرار دارد. تغییرات به‌صورت کاملاً خطی است و با افزایش سطح مقطع هوای ورودی به استخر، میزان آب تولید شده



Signal-to-noise: Larger is better

شکل ۱۲: تأثیر پارامتر فشار بر جرم آب تولید شده

Fig. 12. The effect of pressure parameter on the mass of produced water



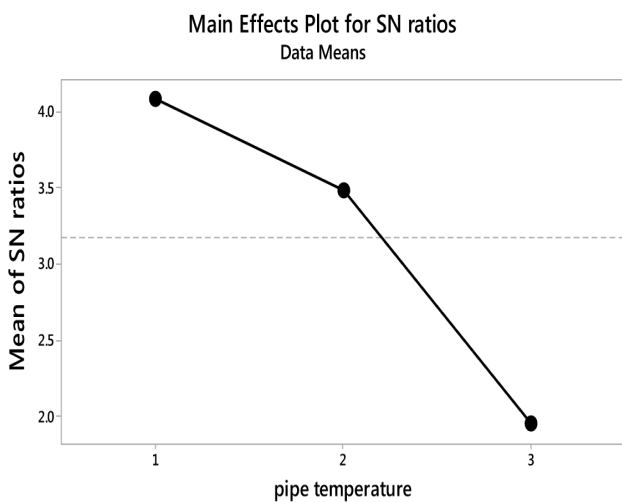
Signal-to-noise: Larger is better

شکل ۱۰: تأثیر پارامتر رطوبت نسبی بر جرم آب تولید شده

Fig. 10. The effect of relative humidity parameter on the mass of produced water

۰/۰۵ m/s و سطح شماره ۳ نشان دهنده سرعت ۰/۱ m/s می‌باشد. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، تاگوچی بهترین وضعیت هر یک از ۸ پارامتر مورد بررسی را مطابق جدول ۵ پیشنهاد می‌دهد. مقدار بهینه به‌دست آمده توسط نرم‌افزار مینی‌تب و روش تاگوچی ۵/۱۵۰۵۳ kg/m.day می‌باشد که ۵/۲۳٪ خطا در حالت بهینه را نسبت به نتایج آزمایش شبیه‌سازی شده با متلب که ۵/۴۳۴۸ kg/m.day بود، نشان می‌دهد. ارتفاع آب درون استخر خورشیدی به‌وسیله یک شناور همواره ثابت است. در هنگامی که سطح آب داخل استخر کاهش می‌یابد، شناور روی

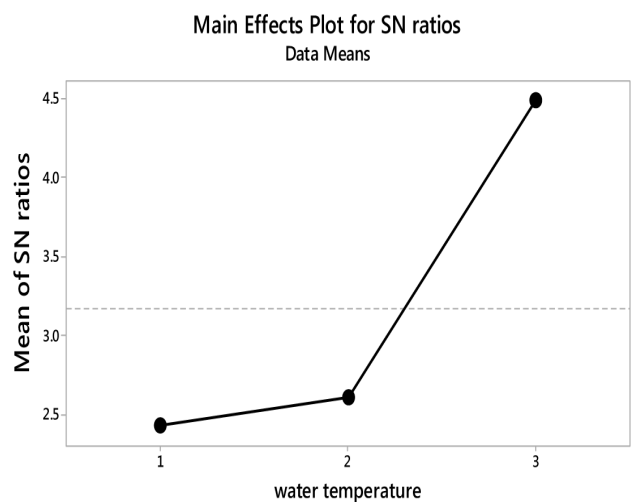
هرچه قطر لوله بیشتر باشد، میزان آب چگالیده شده بیشتر می‌شود اما از محور عمودی مشاهده شد که تأثیر آن بسیار کم است و از لحاظ اقتصادی استفاده از لوله با قطر کمتر به‌صرفه‌تر است. سطح ۱ مربوط به قطر ۰/۰۵ m و سطح ۲ و ۳ به ترتیب نشان دهنده قطر لوله ۰/۱ m و ۰/۱۵ m می‌باشند. در شکل ۱۷ و بررسی سرعت هوای ورودی به استخر مشاهده می‌گردد سرعت هوای ورودی در سطح ۱ که مربوط به ۰/۰۱ m/s است بالاتر از دو سطح دیگر می‌باشد در نتیجه پایین بودن سرعت هوای ورودی استخر باعث افزایش میزان آب تولید شده می‌شود. سطح شماره ۲ مربوط به سرعت



Signal-to-noise: Larger is better

شکل ۱۳: تأثیر پارامتر دمای لوله بر جرم آب تولید شده

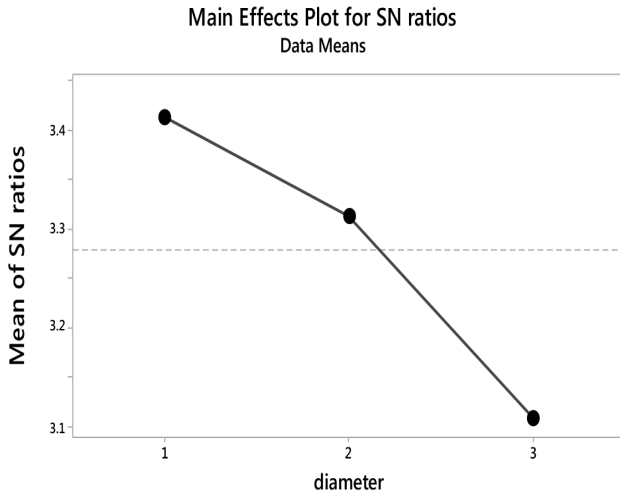
Fig. 13. The effect of pipe temperature parameter on the mass of produced water



Signal-to-noise: Larger is better

شکل ۱۱: تأثیر پارامتر دمای آب بر جرم آب تولید شده

Fig. 11. The effect of water temperature parameter on the mass of produced water

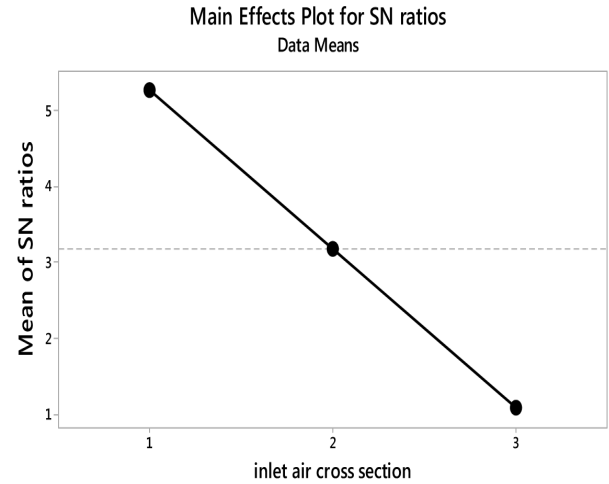


Signal-to-noise: Larger is better

شکل ۱۶: تأثیر پارامتر قطر لوله بر جرم آب تولید شده

Fig. 16. The effect of pipe diameter parameter on the mass of produced water

در نتیجه مقدار دبی آب ورودی به استخر تابع شرایط محیطی تأثیر گذار بر مقدار آب تبخیر شده نظیر دمای هوا، سرعت هوای ورودی، تابش خورشید و رطوبت نسبی هوا می‌باشد. به‌عنوان مثال برای حالتی که دمای آب درون استخر با استفاده از صفحه آینه‌ای 50°C است و با فرض ثابت ماندن مقدار تبخیر در طول روز، مقدار دبی حجمی آب برابر $0.4824 \text{ m}^3/\text{day}$ و دبی جرمی آن $482/0.088 \text{ kg/day}$ می‌باشد.



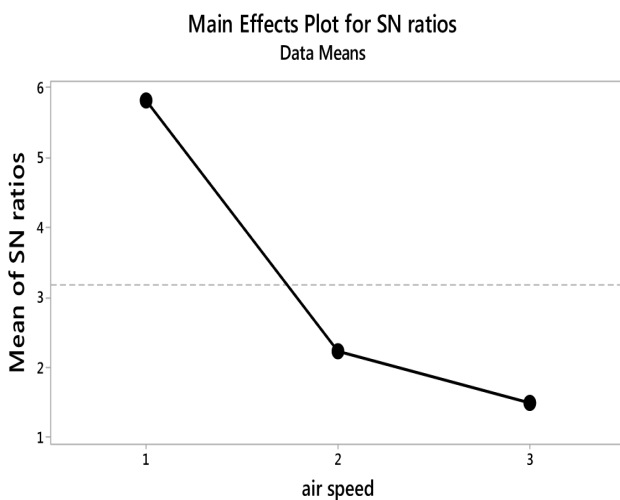
Signal-to-noise: Larger is better

شکل ۱۴: تأثیر پارامتر سطح مقطع ورودی هوا بر جرم آب تولید شده

Fig. 14. The effect of air inlet section parameter on the mass of produced water

سطح آب پایین آمده و با بالا رفتن اهرم، آب از مخزن وارد استخر شده تا ارتفاع آن به سطح مورد نظر برسد و با بالا رفتن شناور، دریچه ورود آب به استخر بسته می‌شود. با توجه به ثابت ماندن ارتفاع آب درون استخر به وسیله شناور با استفاده از روابط (۱۸) و (۱۹) مقدار جرم آب تبخیر شده از سطح استخر در واحد زمان به‌دست می‌آید. با استفاده از رابطه (۳۶) میزان حجم آب تبخیر شده در واحد زمان که برابر با مقدار دبی آب خروجی از مخزن آب و ورودی به استخر خورشیدی می‌باشد به‌دست می‌آید.

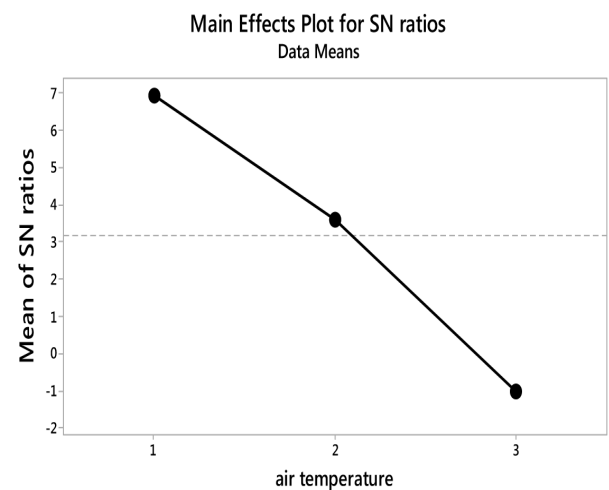
$$m = V \cdot \rho \quad (36)$$



Signal-to-noise: Larger is better

شکل ۱۷: تأثیر پارامتر سرعت هوای ورودی بر جرم آب تولید شده

Fig. 17. The effect of air velocity parameter on the mass of produced water



Signal-to-noise: Larger is better

شکل ۱۵: تأثیر پارامتر دمای هوا بر جرم آب تولید شده

Fig. 15. The effect of air temperature parameter on the mass of produced water

جدول ۵: بهترین وضعیت معرفی شده توسط نرم افزار مینی تب

Table 5. Best status introduced by MINITAB

شماره پارامتر	نام پارامتر	سطح بهینه	مقدار سطح
۱	رطوبت نسبی (%)	۱	۲۰
۲	دمای آب (°C)	۳	۶۰
۳	فشار (kPa)	۱	۹۵
۴	دمای لوله (°C)	۱	۱۵
۵	سطح مقطع ورودی هوا (m ²)	۱	۰/۱
۶	دمای هوا (°C)	۱	۴۰
۷	قطر لوله (m)	۱	۰/۰۵
۸	سرعت هوا (m/s)	۱	۰/۰۱

دمای آب ورودی به استخر بالاتر باشد میزان آب تولید شده افزایش می‌یابد. با توجه به تجدیدپذیر و در دسترس بودن انرژی‌های باد و خورشید، این روش آبیاری و تولید آب شیرین از نظر اقتصادی بسیار به صرفه و کارآمد می‌باشد و هزینه راه‌اندازی آن بسیار کمتر از هزینه حفر چاه و لوله‌کشی برای انتقال آب شیرین به مناطق خشک و کویری دور افتاده می‌باشد. این سامانه در تمام اقلیم‌های آب و هوایی قابلیت استفاده را دارد و بهبود عملکرد در مقایسه با سایر روش‌های آبیاری را نشان می‌دهد. مقدار بهینه پیش‌بینی شده توسط روش تاگوچی ۵/۱۵ kg/m.day می‌باشد که نسبت به مقدار به‌دست آمده از شبیه‌سازی ۵/۲۳٪ خطا را نشان می‌دهد.

فهرست علائم

A	سطح مقطع استخر (m ²)
A_r	نسبت مساحت پوشش تبخیر کن به کف استخر
C	ظرفیت گرمایی (J/K)
C_a	گرمای ویژه هوا (J/kg.K)
C_{pa}	گرمای ویژه در فشار ثابت هوا (kJ/kg.K)
D	قطر لوله چگالنده (m)
D_{AB}	ضریب پخش باینری (m ² /s)
E	معادله زمان (min)
G	شار حرارتی خورشیدی (W/m ²)
g_s	نرخ آب تبخیر شده (kg/s)
h	آنتالپی (kJ/kg)
h_c	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (W/m ² .K)
h_g	آنتالپی بخار اشباع (kJ/kg)
h_m	ضریب انتقال جرم (m/s)
k_{bs}	ضریب انتقال حرارت هدایتی (W.m ² /K)
L	گرمای نهان تبخیر (J/kg)

۴- نتیجه گیری

در بخش اول این پژوهش، تأثیر استفاده از آینه و پارچه سیاه پرزدار مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از آینه و پارچه سیاه پرزدار سبب بالا رفتن دمای آب درون استخر، افزایش تبخیر سطحی و همچنین حداکثر استفاده از تابش خورشید در طول روز می‌گردد. در این حالت دمای هوای ورودی ثابت و مقدار آن ۲۵°C در نظر گرفته شد. مشاهده گردید که با بالا رفتن دمای آب درون استخر، میزان تبخیر آب درون حوضچه و میزان آب چگالیده شده در لوله افزایش یافت. دمای لوله نیز ۱۵°C در نظر گرفته شد. بیشترین مقدار آب تولید شده در دماهای مورد بررسی برای دمای آب ۵۰°C به‌دست آمد که مقدار آن ۱/۸۴۴۸۱۰۳ kg/h می‌باشد. در بخش دوم به بررسی بهینه پارامترهای موثر بر تولید آب شیرین در لوله به طول واحد پرداخته شد. ابعاد استخر در این حالت ۱۰ m×۱۰ m در نظر گرفته شد. هرچه دمای هوای ورودی بالاتر باشد، میزان آب شیرین تولید شده بیشتر می‌شود، از طرفی رطوبت نسبی کمتر یعنی ۲۰٪ بیشترین تأثیر را بر تولید آب شیرین داشت پس این روش آبیاری برای مناطق گرم و خشک و دارای آفتاب دائمی مانند بسیاری از مناطق مرکزی و جنوبی ایران مناسب می‌باشد. پارامترهای سطح مقطع هوای ورودی و سرعت هوای ورودی به استخر در دبی بخار آب وارد شده به لوله تأثیر دارند. مشاهده گردید هرچه سطح مقطع هوای ورودی و سرعت هوای ورودی به سامانه کمتر باشد، میزان آب استحصال شده برای لوله با طول واحد بیشتر می‌گردد. هرچه دمای لوله دفن شده در خاک کمتر و

M	جرم مولی (g/mol)	i	ورودی
m	نرخ جریان (kg/s)	o	خروجی
m_c	آب چگالیده (kg/s)		زیرنویس‌ها
p_{ws}	فشار جزئی هوا در دمای آب استخر (Pa)	a	هوا
p_{gs}	فشار اشباع بخار (Pa)	g	شیشه
Q	انتقال حرارت (W)	i	ورودی
Sh_D	عدد شرود لوله	o	خروجی
T	دما (°C)	p	لوله
v	سرعت (m/s)	s	آسمان
V	حجم (m ³)	w	آب
X_n	رطوبت مخصوص هوای اشباع در دمای آب استخر	v	بخار آب
X_s	رطوبت مخصوص هوا در دمای محیط		

منابع و مراجع

- علام یونانی
- [1] J.M. Robles, P. Botía, J.G. Pérez-Pérez, Subsurface drip irrigation affects trunk diameter fluctuations in lemon trees, in comparison with surface drip irrigation, *Agricultural Water Management*, 165 (2016) 11-2
- [2] E. Mathioulakis, V. Belessiotis, E. Delyannis, Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art, *Desalination*, 203(1) (2007) 346-365
- [3] J.E. Ayars, A. Fulton, B. Taylor, Subsurface drip irrigation in California—Here to stay?, *Agricultural Water Management*, 157 (2015) 39-47
- [4] J. Lindblom, B. Nordell, Water production by underground condensation of humid air, *Desalination*, 189(1) (2006) 248-260
- [5] J. Mich, Soil and water terminology, ASABE Standard, 46th ed, 1999
- [6] Y. Yu, G. Shihong, D. Xu, W. Jiandong, X. Ma, Effects of Treflan injection on winter wheat growth and root clogging of subsurface drippers, *Agricultural Water Management*, 97(5) (2010) 723-730
- [7] L. jonas, Hydrodynamic limit of lattice Boltzmann equations, phd thesis, University of Genève, Italy, Genève, 2007
- α ضریب جذب
- δ زاویه انحراف خورشید
- τ ضریب عبور
- Θ ضریب تبخیر (kg/m².h)
- ρ چگالی (kg/m³)
- $\rho_{v,s}$ چگالی بخار اشباع (kg/m³)
- σ ثابت استفان بولتزمن (W/m².K⁴)
- φ رطوبت نسبی (%)
- ω نسبت رطوبت
- بالانویس‌ها

- irrigation and drinking needs in remote arid communities using closed-system greenhouse: A review, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(2) (2015) 294-301
- [19] V. Okati, A. Behzadmehr, S. Farsad, Analysis of a solar desalinator (humidification–dehumidification cycle) including a compound system consisting of a solar humidifier and subsurface condenser using DoE, *Desalination*, 397 (2016) 9-21
- [20] Y. Mo, G. Li, D. Wang, A sowing method for subsurface drip irrigation that increases the emergence rate, yield, and water use efficiency in spring corn, *Agricultural Water Management*, 179 (2017) 288-295
- [21] B. Molineaux, B. Lachal, O. Guisan, Thermal analysis of five outdoor swimming pools heated by unglazed solar collectors, *Solar Energy*, 53(1) (1994) 21-26
- [22] E.F. Bafghi, J.A. Esfahani, N. Rahbar, Numerical Analysis solar humidification tube to determine the parameters on mass transfer and heat displacement within them, in: 2nd Annual Clean Energy (ACEC), Iran, Kerman, 2012 (In Persian)
- [23] Y. A.Cengel, A.B. Michael, *Thermodynamic – An Engineering Approach*, Eighth ed, Mc Graw Hill Education, New York, 2014
- [24] M. Amidpour, S.E. Shakib, M. Zamen, H. Dadkhah, Exergy Analysis of a solar desalination unit HD using experimental datas, in: 17th Annual International Conference on Mechanical Engineering (ISME 2009), Iran, Tehran, 2009 (In Persian)
- [25] Evaporation from Water Surfaces, <http://www.engineeringtoolbox.com>, 2016
- [26] V.B. Sharma, S.C. Mullick, Analysis of heat-transfer coefficients and evaporation a solar still, *International journal of energy research*, 16(6) (1992) 517-531
- [27] V.B. Sharma, S.C. Mullick, Estimation of Heat Transfer Coefficients, the Upward Heat Flow, and Evaporation in a Solar Still, *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 113 (1991) 36-41
- [28] J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Fourth ed, Wiley, New Jersey, 2013
- [29] T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. Dewitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, Seventh ed., Wiley, New York, , 2006
- [30] R.E. Bolz, G.L. Tuve, *Handbook of Tables for Applied Engineering science*, Second ed, CRC Press, 1976
- [8] A. Gohlman, Heating of frozen ground, Master Thesis, Elulea University of Technolohy, Sweden, Luleå, 1986
- [9] R. Hutmacher, C.R. Phene, R.M. Mead, P. Shouse, D. Clark, S.S. Vail, R. Swain, M.S. Peters, C.A. Hawk, D. Kershaw, T. Donovan, J. Jobes, J. Fargerlund, Subsurface drip of alfalfa in Imperial Valley, in: *Proceeding of the 22nd California Arizona alfalfa Symposium*, UAS, California 1992, pp. 20-32
- [10] G. Oron, C. Campos, L. Gillerman, M. Salgot, Wastewater treatment, renovation and reuse for agricultural irrigation in small communities, *Agricultural Water Management*, 38(3) (1999) 223-234
- [11] J.E. Ayars, R.A. Schoneman, F. Dale, B. Meso, P. Shouse, Managing subsurface drip irrigation in the presence of shallow ground water, *Agricultural Water Management*, 47(3) (2001) 243-264
- [12] J. Lindblom, B. Nordell, Underground condensation of humid air for drinking water production and subsurface irrigation, *Desalination*, 203(1) (2007) 417-434
- [13] C. Yamali, İ. Solmus, A solar desalination system using humidification–dehumidification process: experimental study and comparison with the theoretical results, *Desalination*, 220(1) (2008) 538-551
- [14] J.O. Payero, D.D. Tarkalson, S. Irmak, D. Davison, J.L. Petersen, Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate, *Agricultural Water Management*, 95(8) (2008) 895-908
- [15] M. Jolaini, H.R. Mehrabadi, Investigation the Effect of Surface and Subsurface Drip Irrigation Methods and Irrigation Interval on Yield quality and quantity of Cotton, *Journal of Water and Soil*, 26(3) (2012) 736-742 (In Persian)
- [16] J.W. Heard, M.J. Porker, D.P. Armstrong, L. Finger, C.K.M. Ho, W.J. Wales, B. Malcolm, The economics of subsurface drip irrigation on perennial pastures and fodder production in Australia, *Agricultural Water Management*, 111 (2012) 68-78
- [17] M. Dorta-Santos, M. Tejedor, C. Jiménez, J.M. Hernández-Moreno, M.P. Palacios-Díaz, F.J. Díaz, Evaluating the sustainability of subsurface drip irrigation using recycled wastewater for a bioenergy crop on abandoned arid agricultural land, *Ecological Engineering*, 79 (2015) 60-68
- [18] A.E. Kabeel, E.M.S. El-Said, Water production for

Temperature by Means of Meteorological Data in Some Selected Climates of Iran, *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 14(52) (2010) 125-138 (In Persian)

[31] H. Moghadam, F.F. Tabrizi, A.Z. Sharak, Optimization of solar flat collector inclination, *Desalination*, 265(1) (2011) 107-111

[32] A.A. Sabziparvar, H. Tabari, A. Aeini, Daily Soil

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. R. Ahmadimoghaddam, S. Farahat, A. Einali, J. Valizadeh, Simulation and Optimal Design of Solar Pool for Subsurface Irrigation, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(2) (2019) 507-523.

DOI: 10.22060/mej.2017.13277.5596

