

## مقاله پژوهشی

# ارائه یک مدل پیش‌بینی مبتنی بر استنتاج فازی به منظور تخمین و بهینه‌سازی راندمان آبیاری زیرسطحی خورشیدی

چمران دانش‌دوست<sup>۱</sup>، رحیم ابراهیمی<sup>۲\*</sup>، محمود رضا تدین<sup>۳</sup> و احمد رضا قاسمی دستگردی<sup>۴</sup>

## چکیده

کمبود آب آشامیدنی و آب شیرین برای مصارف کشاورزی از بزرگ‌ترین مشکل‌ها در اکثر کشورهای خشک و نیمه‌خشک است. بنابراین شیرین‌کردن آب‌های شور، برای تولید آب شرب و کشاورزی ضروری است. با توجه به توان تابشی مناطق جنوب ایران، مطالعه یک سیستم آبیاری زیرسطحی خورشیدی به صورت تجربی و تئوری در شهر دهدشت با طول جغرافیایی ۵۰/۵۷ درجه و عرض جغرافیایی ۳۰/۷۸ انجام گرفته است. در این سیستم از یک استخر خورشیدی و یک مبدل حرارتی جریان معکوس زیرسطحی استفاده شده است. مخلوط هوای گرم و مرطوب داخل استخر خورشیدی، توسط فن، به لوله زیرزمینی هدایت شده و با استفاده از فرآیند میعان، آب مورد نیاز آبیاری زیرسطحی تولید شده است. با تزریق چای کمپوست به آب خالص تولید شده، یک محلول با ترکیب مناسب برای آبیاری و تأمین مواد مغذی خاک و گیاه به دست آمده است. با اندازه‌گیری و پایش اطلاعات محیطی و تعیین معادلات گرمایی سیستم و استفاده از نرم‌افزار متلب، یک سیستم فازی طراحی شده و تغییرات دما، نسبت رطوبت و جرم آب تولید شده، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شبیه‌سازی انجام شده در متلب، بیشینه دمای هوای نهایی استخر ۹۰°C و کمینه آن ۶۰°C، به ترتیب در مرداد و فروردین حاصل گردید. در مقایسه با مقادیر تجربی، مقدار خطای بدسا آمده به ترتیب ۵/۸٪ و ۹٪ است. مقدار بیشینه و کمینه آب تولیدشده به ترتیب ۶/۱۳ لیتر در روز در مردادماه و ۳/۰۹ لیتر در روز در فروردین حاصل شده است. در قیاس با مقدار تجربی، مقدار خطا به ترتیب ۷٪ و ۱۵٪ محاسبه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد با افزایش پارامترهای تابش خورشیدی، دمای محیط، دمای آب، قطر لوله کندانسور و قطر لوله هوای گرم مرطوب و همچنین با کاهش پارامترهای دمای آب کندانسور، رطوبت نسبی هوای محیط و ارتفاع آب استخر، میزان آب تولیدشده افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج، این روش برای استفاده در مناطقی با اقلیم گرم و خشک مناسب است.

**واژه‌های کلیدی:** آبیاری چگالشی، انرژی خورشیدی، چای کمپوست، مدل پیش‌بینی فازی، مبدل حرارتی جریان معکوس.

**ارجاع:** دانش‌دوست چ.، ابراهیمی ر.، تدین م.، و قاسمی دستگردی ا.، ر. ۱۴۰۰. ارائه یک مدل پیش‌بینی مبتنی بر استنتاج فازی به منظور تخمین و بهینه‌سازی راندمان آبیاری زیرسطحی خورشیدی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی، ۱۹: ۱۱-۲۱.

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- استاد گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

\* نویسنده مسئول: [Rahim.Ebrahimi@gmail.com](mailto:Rahim.Ebrahimi@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۳

## مقدمه

است. در این پژوهش مقدار انتقال همرفتی جرم و گرما به‌صورت تئوری محاسبه و میزان تطابق با داده‌های تجربی تعیین گردیده‌است (Rajesh & Tiwari, 2006).

در یک مطالعه دوره‌ای، با نگهداری انرژی توسط مواد نگهدارنده انرژی (PCM) در طول روز و آزادکردن این انرژی در شب و همچنین ترکیب با استخرهای چند مرحله‌ای، افزایش قابل توجهی در راندمان سیستم مشاهده شده است (Panchal & Mohan, 2017). در یک مطالعه تجربی، یک تقطیرکننده خورشیدی تک شیب دارای فین، با قطر کوچک و همچنین یک کندانسور خارجی مورد استفاده قرار گرفته‌است. این مطالعه به منظور بررسی رفتار گرمایی سیستم و همچنین میزان آب تولیدشده به‌صورت روزانه، انجام شده و در آن عملکرد مناسب‌تری نسبت به سیستم‌های رایج مشاهده شده است (Rabhi et al., 2017). (Muftah et al., 2018). یک سیستم تقطیر خورشیدی پله‌ای با بازتاب‌دهنده‌های خارجی و داخلی و استخر فین‌دار، همراه با یک کندانسور جداگانه توسعه داده‌اند که در آن بخار در یک حلقه مجزا تقطیر شده است. در نهایت، عملکرد سیستم، ۲۹٪ افزایش کارایی در پی داشت. در یک تحقیق، با استفاده از مدول سرمایش ترموالکتریک و کسر حجمی ۰/۰۸ درصد نانو سیال اکسید مس، کارایی استخر خورشیدی تک شیب افزایش یافته‌است. افزایش عملکرد سیستم، برای مقدار تولید آب روزانه، راندمان انرژی و انرژی به‌ترتیب ۸۱٪، ۸۰/۶٪ و ۱۱۲/۵٪ حاصل شده است (Rajaseenivasan & Srithar, Nazari et al., 2018). (2016) به مطالعه تئوری و تجربی یک تقطیرکننده تک شیب با استفاده از فین‌های با مقاطع توخالی دایره‌ای و استوانه‌ای پرداختند.

با توجه به نتایج حاصل، آب تولید شده در حالت فین‌دار و بدون فین، به‌ترتیب  $4/55 \text{ kg/m}^2$  و  $3/16 \text{ kg/m}^2$  در روز گزارش شده است. برای بررسی و مقایسه کارایی استخرهای لوله‌ای و مستطیلی یک مطالعه تجربی انجام گرفته که در آن ۲۰٪ افزایش راندمان تولید آب استخرهای لوله‌ای حاصل شده است (Rahbar et al., 2018). در پژوهشی دیگر که در کشور ایران انجام شده است از یک شبکه متخلخل درون استخر تقطیرکننده تک شیب استفاده شده که در آن، ۱۷/۳۵٪ افزایش کارایی سیستم تقطیری مشاهده شده است. میزان آب تولید شده

تأمین میزان آب آشامیدنی پایدار و آب شیرین جهت مصارف کشاورزی از بزرگ‌ترین مشکل ات حال حاضر در اکثر کشورهای خشک و نیمه‌خشک است. اکثر منابع آبی روی کره زمین، آب‌های شور، دریاها و اقیانوس‌ها هستند. بیش از ۹۷٪ آب‌های کره زمین، شور و در حدود ۲/۶٪ آن، آب شیرین است (Tiwari et al., 2003). بنابراین استفاده از فناوری‌های گوناگون، به منظور اصلاح آب‌های شور و نامناسب جهت تولید آب تازه و مناسب از ضروریات زندگی امروزه بشر است. ایران از جمله کشورهای نیمه‌خشک است که با توجه به تابش بسیار مناسب خورشید در طول سال و در اکثر مناطق، استفاده از انرژی خورشیدی برای مصارف صنعتی و کشاورزی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد (Alamdari et al., 2013). یکی از راهکارهای شورش‌زایی خورشیدی استفاده از فرآیندهای تبخیر و میعان با استفاده از استخرهای خورشیدی است. مطالعه و بررسی استخرهای خورشیدی از مباحث مورد علاقه محققین بوده و مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است. در یک پژوهش تئوری-تجربی، بررسی انتقال گرما و جرم در استخرهای خورشیدی به‌صورت همزمان و با هدف بهبود تطابق بین نتایج حاصل از مطالعه تئوری و مطالعه تجربی سیستم انجام شده است. نتایج حاصل از مدل تئوری با نتایج آزمایشگاهی مطابقت مناسبی داشته و بهبود قابل قبولی مشاهده گردیده است (Tsilingiris, 2012). (Hardik et al., 2019). در یک مطالعه، از فین‌های استوانه‌ای توخالی با قطر ۲۵mm، ارتفاع ۲۰mm و ضخامت ۲mm و فین‌های مقطع مربعی توخالی، با طول ضلع ۲۵mm، ارتفاع ۲۰mm و ضخامت ۲mm درون استخر استفاده کرده‌اند. در این مطالعه فین‌های استوانه‌ای عملکرد مناسب‌تری داشته‌اند. در پژوهشی دیگر تأثیر نانو سیال، شکل و تعداد نانو ذرات موجود در آن، در تغییرات انتقال گرما و جرم ناشی از تبخیر سطح آب درون استخر خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته‌است. در این مطالعه مشاهده شده است که با اضافه کردن نانوذرات، انتقال گرما افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد (Omar & Ameer, 2018). برای بدست‌آوردن مدل گرمایی تقطیرکننده‌های خورشیدی غیرفعال و فعال، یک پژوهش در دهلی‌نو انجام شده و میزان تأثیرات تابش خورشیدی و عمق آب استخر، مورد بررسی قرار گرفته

تولیدشده درون تبخیرکننده، توسط یک مکنده مدل توربو- مدل VPH-8s2s با حجم هوادهی ۲۰ مترمکعب بر ساعت وارد این لوله می‌شود. با انتخاب این ظرفیت مکنده، با توجه به اینکه حجم مجموعه سیستم تقطیرکننده حدود ۰/۵ متر مکعب است، در هر دقیقه ۰/۳۳۳ متر مکعب هوا از سیستم وارد لوله زیرزمینی خواهدشد. مکنده موردنظر در بازه‌های زمانی مشخص روشن و پس از مکش مخلوط هوای گرم و مرطوب، خاموش می‌شود. لوله کندانسور با قطر ۵۰ mm داخل این لوله، به‌صورت هم‌مرکز قرار گرفته که دارای جریان آب خنک است. سیال کندانسور، مخلوط چای کمپوست با دمای ۲۰°C بوده که از یک مخزن ۲۰ لیتری تغذیه می‌شود و در یک سیکل، پس از عبور از داخل لوله درون کانال، توسط پمپ به مخزن باز می‌گردد. در این مبدل، مخلوط بخار و هوا در عبور از روی لوله کندانسور شروع به میعان کرده و قطرات آب تشکیل شده، از طریق روزنه‌های روی لوله بزرگتر وارد خاک شده و آبیاری زیرسطحی انجام می‌گیرد. از آنجایی که خروجی سیستم، آب تقریباً خالص و فاقد املاح معدنی است، با استفاده از یک سیستم تزریق چای کمپوست به آب تولیدشده، با نسبت‌های مناسب و کنترل شوری و هدایت الکتریکی آن، علاوه بر اینکه آب مورد نیاز آبیاری تأمین شده، مواد مغذی نیز به خاک تزریق می‌شود. با توجه به آزمایشات انجام‌شده در این پژوهش، میزان EC آب تولید شده ۰/۰۵ دسی زیمنس بر متر و میزان EC آب دریا ۱۸ دسی زیمنس بر متر تعیین شده است. برای ایجاد ترکیب مناسب آبیاری، از نسبت ۲lit آب خالص با ۲۵۰ cc چای کمپوست شور استفاده شده است. میزان EC مخلوط حاصله برابر ۲/۵۷ دسی زیمنس بر متر به دست آمد که در محدوده قابل قبولی برای آبیاری است. برای مطالعه وضعیت خاک، از یک کانال با سطح مقطع مربع شکل، به ضلع ۷۵cm، طول ۳m و یک دیواره از جنس شیشه استفاده شده است. با استفاده از اطلاعات آب و هوای ایستگاه سینوپتیک شهرستان کهگیلویه و پردازش اطلاعات سیستم در بازه زمانی شبانه روز، میزان آب و رطوبت تولیدشده تعیین شده است. در شکل ۱ سطح مقطع کانال خاک و تجهیزات درون آن دیده می‌شود.

به‌صورت روزانه برای سیستم اصلاح‌شده و سیستم پیش از اصلاح به‌ترتیب  $2829 \text{ CC/m}^2$  و  $3263 \text{ CC/m}^2$  به دست آمده است (Rashidi et al., 2018).

با توجه به مطالعه پژوهش‌های پیشین هدف از انجام این پژوهش، تأمین آب موردنیاز برای آبیاری از آب شور با استفاده از انرژی خورشیدی، تأمین مواد مغذی مورد نیاز خاک و گیاه، کاهش دمای خاک در اطراف لوله داغ زیرزمینی و در نهایت افزایش راندمان آبیاری است. به همین منظور، یک سیستم آبیاری زیرسطحی با مبدل حرارتی زیرزمینی معکوس، به‌صورت تئوری و تجربی طراحی و بررسی شده است. با استفاده از کندانسور آب سرد و سیکل بازیافت گرما، به میزان بیشتری فرآیندهای تبخیر و میعان انجام می‌شود و در نتیجه میزان آب تولیدی افزایش می‌یابد. همچنین با انتقال گرما از خاک به آب سرد کندانسور، دمای خاک نیز از دمای بحرانی تجاوز نخواهدکرد.

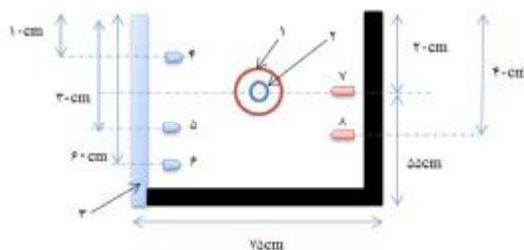
## مواد و روش‌ها

### طراحی و پیاده‌سازی عملی سیستم

به منظور تولید و انتقال آب مناسب برای آبیاری و شرب در این طرح از یک مخزن حاوی مخلوط آب و چای کمپوست به حجم ۲۰lit برای تأمین خوراک سیستم استفاده شده است. یک استخر جاذب انرژی با طول، عرض و ارتفاع به‌ترتیب ۵m، ۵m و ۱۰cm با استفاده از ورق آهن گالوانیزه تیره رنگ، ساخته شده است (Ravishankar et al., 2016). مخلوط آب شور و چای کمپوست از طریق یک لوله از مخزن وارد استخر جاذب انرژی خورشیدی می‌شود. برای کاهش اتلاف گرما، از عایق و پشم شیشه بین جداره‌های استخر و محیط استفاده شده است. آب استخر تحت تأثیر انتقال گرما، تبخیر شده و با هوای استخر مخلوط می‌شود. با افزایش دمای آب استخر و مخلوط هوا-بخار و نسبت رطوبت آن، به کمک یک عملگر کنترلی این مخلوط هوا و بخار توسط یک مکنده هوا وارد یک مبدل حرارتی جریان معکوس زیرسطحی می‌شود. با توجه به حجم هوای گرم و مرطوب داخل سیستم، لوله اصلی در مبدل از جنس پلی‌اتیلن و به طول ۳m و قطر ۱۰۰mm انتخاب شده و در عمق ۲۰cm زیر خاک قرار گرفته‌است. روزنه‌هایی با قطر ۵mm و در فواصل ۲cm روی لوله ایجاد شده است. مخلوط بخار و هوای گرم

## تهیه چای کمپوست

در این بخش از طرح، سه نمونه چای کمپوست با غلظت‌های متفاوت تهیه شده است. مخلوط‌های موردنظر با غلظت‌های ۰/۱ kg/lit، ۰/۲ kg/lit و ۰/۳ kg/lit تهیه و ترکیبات آن مورد تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی قرار گرفته‌است. برای این منظور در سه حالت، ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم کمپوست خشک در کیسه نخ‌ی منفذداری ریخته شده و در ظرف حاوی ۱۰ lit آب قرار داده شده و به مدت ۴۸ ساعت نگهداری شده است. سپس با استفاده از پمپ آکوارיום هوادهی شده و کیسه‌ها از محلول تولیدشده خارج شد و چای کمپوست موردنظر برای غلظت‌های مورد بحث به دست آمد (Khaligh & Shokouhian, 2019).

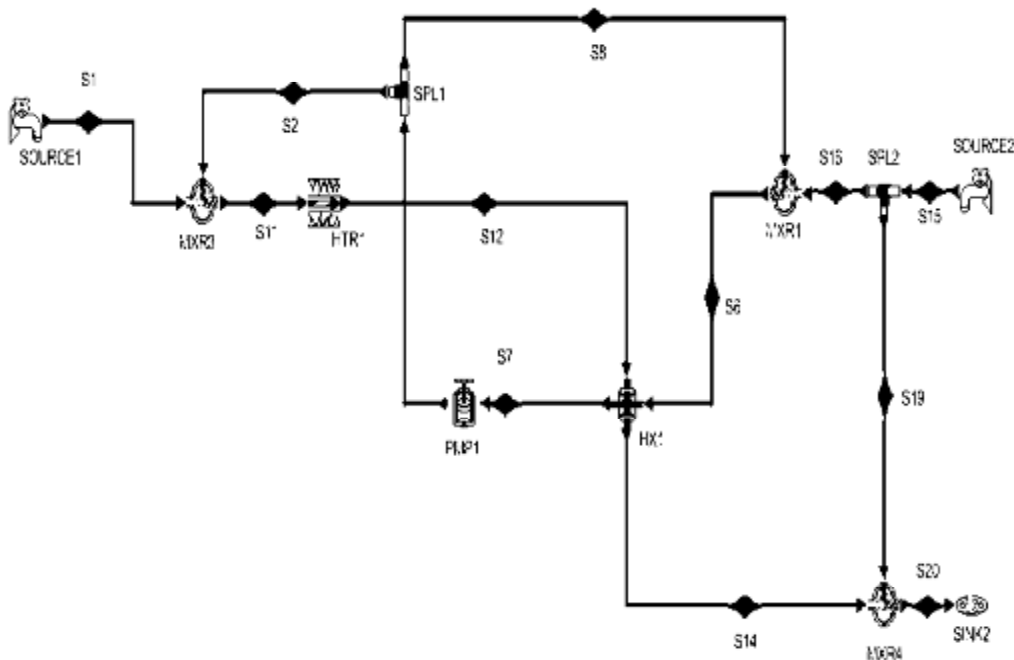


شکل ۱- سطح مقطع کانال خاک و جانمایی تجهیزات

۱) لوله حاوی مخلوط گرم بخار - هوا، ۲: لوله کندانسور آب خنک، ۳: دیوار شیشه‌ای کانال ۶ و ۵ و ۴: رطوبت‌سنج، ۷ و ۸: دماسنج

شبییه‌سازی سیستم (به دست آوردن معادلات حاکم بر انتقال جرم، گرما، انرژی و کنترل سیستم)

در شکل ۲ نمودار سیکل ترمودینامیکی و جریان مربوط به سیستم با استفاده از نرم‌افزار سایکل‌پد ترسیم شده است. در این شکل، جریان خروجی از مخزن تغذیه (S1) با جریان خروجی از کندانسور (S2)، مخلوط و جریان حاصل‌شده تحت عنوان (S11) وارد استخر خورشیدی (HTR1) می‌شود. جریان خروجی استخر خورشیدی (S12) وارد مجموعه مبدل حرارتی جریان معکوس با نماد (HX1) شده است. جریان (S14) بیانگر جرم آب چگالیده است که از مبدل حرارتی خارج و با نسبت مناسب جهت آبیاری با جریان (S19) که جریان پاششی کمپوست چای است، مخلوط و با نام جریان (S20) وارد خاک می‌شود. در ادامه با استفاده از روابط انتقال حرارت و جرم، رفتار گرمایی سیستم و تغییرات لحظه‌ای آن تعیین و پایش شده است. سپس با در نظر گرفتن هر کدام از اجزای سیستم به عنوان حجم کنترل و نوشتن معادلات انرژی، گرما و جرم برای آن‌ها، معادلات گرمایی کلی حاکم بر سیستم مشخص می‌شود.

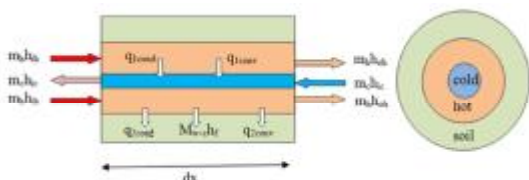


شکل ۲- نمودار جریانی و ترمودینامیکی سیستم آبیاری چگالشی ربر سطحی

آنتالپی آب، دمای مخلوط هوا، نسبت رطوبت مخلوط هوا و عرض استخر را بیان می‌کنند  $m_a$ ،  $h_{acon}$  و  $c_{pa}$  ضریب انتقال گرمای همرفتی، جرم مخلوط هوا و ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط هوا را نشان می‌دهند.

#### حجم کنترل مبدل حرارتی جریان معکوس زیرزمینی

شکل ۴ حجم کنترل مجموعه مبدل حرارتی زیرزمینی با جریان معکوس را نشان می‌دهد.



شکل ۴- مبدل حرارتی زیرزمینی (UHEX)

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک و قانون فیک، رابطه آنتالپی، نسبت رطوبت و دمای هوای گرم در طول لوله به ترتیب طبق معادلات (۷) تا (۹) به دست آمده است.

$$h_{Ta} = A + [h_{Tai} - A] \exp((1 + r_{c/h})hx) \quad (7)$$

$$w_a = B + [w_{ai} - B] \exp(-(1 + r_{c/h})hx) \quad (8)$$

$$h_{Ta} = 1.005T_a + w_a(2501 + 1.805T_a) \quad (9)$$

که در آن  $A$ ،  $B$ ،  $r_{c/h}$ ،  $h$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h = -\frac{2pR_{p,h}h_{aconv}}{m_{Ta}c_{pa}}, r_{c/h} = \frac{R_{p,c}}{R_{p,h}} \quad (10)$$

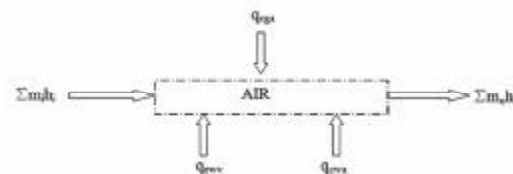
$$B = \frac{(w_{p,h} + r_{c/h}w_{p,c})}{(1 + r_{c/h})}, A = \frac{(h_{gr} + r_{c/h}h_{p,c})}{1 + r_{c/h}} \quad (11)$$

پارامترهای  $w_{p,c}$ ،  $w_{p,h}$ ، به ترتیب، نسبت رطوبت هوای اشباع در دمای لوله گرم و دمای لوله سرد و  $h_{pc}$ ،  $h_{gr}$  آنتالپی مخلوط هوا در دمای زمین و دمای لوله سرد را نشان می‌دهند.  $T_a$ ،  $h_{Ta}$  و  $w_a$  به ترتیب آنتالپی کل مخلوط هوا، دمای مخلوط هوا و نسبت رطوبت مخلوط هوا را بیان می‌کنند.  $R_c$  و  $R_h$  شعاع لوله سرد و گرم می‌باشند.  $m_{Ta}$ ،  $h_{acon}$  و  $c_{pa}$  ضریب انتقال گرمای همرفتی، جرم مخلوط هوا و ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط هوا را نشان می‌دهند.

با توجه به اینکه جهت جریان سیال خنک‌کننده در خلاف جهت هوای داغ مرطوب است، نوع مبدل حرارتی معکوس

#### تحلیل حجم کنترل هوای مرطوب استخر

شکل ۳ تعادل گرمایی حجم کنترل هوای درون استخر را نشان می‌دهد.



شکل ۳- حجم کنترل هوای استخر

با در نظر گرفتن حجم هوای بالای سطح آب به عنوان حجم کنترل و نوشتن روابط انتقال گرما و جرم، معادلات (۱) و (۲) حاصل شد.

$$m_{ai} = m_{ao} = m_a, \quad m_{vo} = m_{vi} + m_{ev} \quad (1)$$

$$q_{cwa} + q_{ewv} + q_{cga} + m_{ai}h_{ai} + m_{vi}h_{vi} = m_{ao}h_{ao} + m_{vo}h_{vo} \quad (2)$$

به  $h_{vo}$  و  $h_{ao}$ ،  $h_{vi}$ ،  $h_{ai}$ ،  $m_{ev}$ ،  $m_{vo}$ ،  $m_{vi}$ ،  $m_{ao}$ ،  $m_{ai}$  ترتیب جرم هوای خشک ورودی، جرم هوای مرطوب خروجی، جرم آب تبخیر یافته، آنتالپی هوای خشک ورودی، آنتالپی هوای مرطوب ورودی، آنتالپی هوای خشک خروجی و آنتالپی هوای مرطوب خروجی را نشان می‌دهند.  $q_{cga}$  و  $q_{ewv}$  و  $q_{cwa}$  به ترتیب، گرمای همرفتی آب به هوای استخر، گرمای نهان تبخیر و گرمای همرفتی شیشه به هوای استخر را نشان می‌دهند.

با استفاده از قانون فیک، برای انتقال جرم جریان همرفتی ناشی از تبخیر، معادله (۳) را خواهیم داشت (Holman, 2010).

$$m_e = n_a dw_a = h_m(w_w - w_a)dA \quad (3)$$

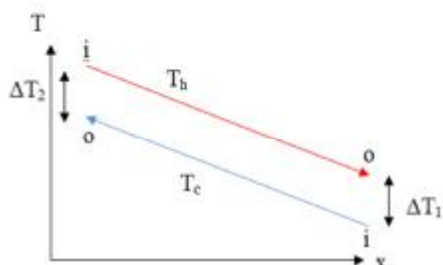
پارامترهای  $w_a$ ،  $w_w$  به ترتیب، نسبت رطوبت هوای اشباع در دمای آب و دمای هوا و  $h_m$  و  $A$  ضریب انتقال جرم و سطح استخر می‌باشند. با استفاده از معادله (۱) و (۲)، رابطه آنتالپی، نسبت رطوبت و دمای هوای درون استخر به ترتیب با معادله (۴) و (۵) و (۶) تعیین شده است:

$$h_{Ta} = h_w + (h_{Tai} - h_w) \exp\left(-\frac{h_{aconv}b}{m_{Ta}c_{pa}}x\right) \quad (4)$$

$$w_a = w_w + (w_{ai} - w_w) \exp\left(-\frac{b h_{caonv}}{m_a c_{pa}}x\right) \quad (5)$$

$$h_{Ta} = 1.005T_a + w_a(2501 + 1.805T_a) \quad (6)$$

Me: آب تبخیر شده و Mc: آب تولید شده می‌باشد. برای طراحی سیستم استنتاج فازی موردنظر، از ۸ ورودی و ۴ خروجی استفاده شده است. طراحی ورودی و خروجی سیستم در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است. توابع عضویت ورودی و خروجی سیستم با استفاده از ۵ دستگاه فازی شامل نمادهای VL, M, S, Vs, L و VL تعریف شده است، که به ترتیب بیانگر عبارات فازی خیلی کوچک، کوچک، متوسط، بزرگ و خیلی بزرگ است.



شکل ۵- مبدل حرارتی جریان معکوس

را خواهیم داشت. شکل ۵ نمودار مبدل حرارتی جریان معکوس را نشان می‌دهد. دمای خروجی کندانسور با استفاده از معادله (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$q = U_i A_i (LMTD) = U_o A_o (LMTD) \tag{12}$$

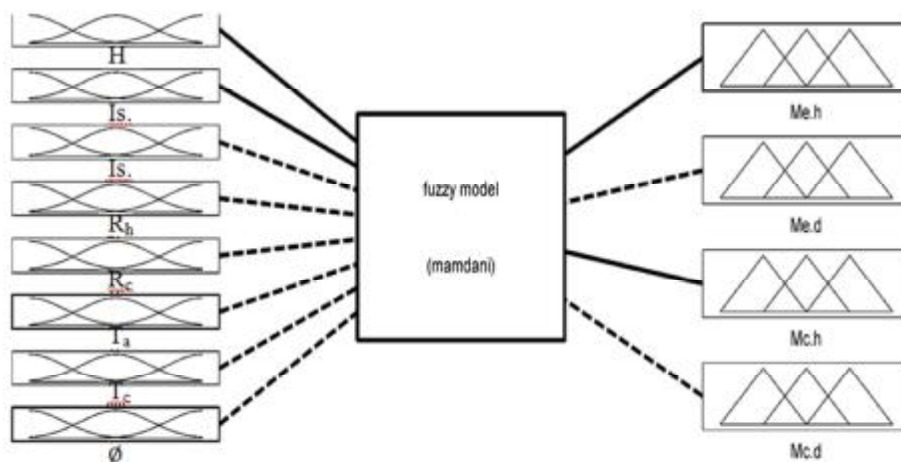
$$\frac{1}{UA} = \sum R_i$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \frac{T_{hi} - T_{co}}{T_{ho} - T_{ci}}} \tag{13}$$

که در این معادله  $T_{co}$  و  $T_{ci}$  به ترتیب دمای سیال گرم ورودی/مبدل، دمای سیال گرم خروجی مبدل، دمای سیال سرد ورودی مبدل و دمای سیال سرد خروجی مبدل را بیان می‌کنند.  $U$ ,  $A$ , و  $R$  به ترتیب سطح مقطع مبدل، ضریب انتقال حرارت و مقاومت گرمایی را بیان می‌کند.

### طراحی سیستم استنتاج فازی برای تخمین و بهینه‌سازی راندمان آبیاری

شکل ۶ مدل پیشگویی مبتنی بر استنتاج فازی را نشان می‌دهد. که در این شکل  $H$ : ارتفاع آب استخر،  $Is$ : تابش خورشید،  $h$ : روزانه،  $d$ : ساعتی،  $R_h$ : قطر لوله هوای گرم،  $R_c$ : قطر لوله آب سرد کندانسور،  $T_a$ : دمای هوای محیط،



شکل ۶ - مدل پیش‌بینی مبتنی بر استنتاج فازی

جدول ۱- توابع عضویت ورودی‌های سیستم

VS	S	M	L	VL	ورودی
[۰ ۰ ۱۳]	[۱ ۳ ۵]	[۳ ۵ ۷]	[۵ ۷ ۹]	[۷ ۹ ۱۰ ۱۰]	H (cm)
[۰ ۰ ۱۲]	[۱ ۲ ۳]	[۲ ۳ ۴]	[۳ ۴ ۵]	[۴ ۵ ۶ ۶]	Is.d (kW)
[۰ ۰ ۰/۱ ۰/۳]	[۰/۱ ۰/۳ ۰/۵]	[۰/۳ ۰/۵ ۰/۷]	[۰/۵ ۰/۷ ۰/۹]	[۰/۷ ۰/۹ ۱ ۱]	Is.h (kW)
[۰ ۰ ۵ ۱۰]	[۵ ۱۰ ۱۵]	[۱۰ ۱۵ ۲۰]	[۱۵ ۲۰ ۲۵]	[۲۰ ۲۵ ۳۰ ۳۰]	Rc (cm)
[۰ ۰ ۵ ۱۰]	[۵ ۱۰ ۱۵]	[۱۰ ۱۵ ۲۰]	[۱۵ ۲۰ ۲۵]	[۲۰ ۲۵ ۳۰ ۳۰]	Tc (°C)
[۰ ۰ ۱۰ ۲۰]	[۱۰ ۲۰ ۳۰]	[۲۰ ۳۰ ۴۰]	[۳۰ ۴۰ ۵۰]	[۴۰ ۵۰ ۶۰ ۶۰]	Ta (°C)
[۰ ۰ ۱۰ ۳۰]	[۱۰ ۳۰ ۵۰]	[۳۰ ۵۰ ۷۰]	[۵۰ ۷۰ ۹۰]	[۷۰ ۹۰ ۱۰۰ ۱۰۰]	Ø (%)

جدول ۲- توابع عضویت خروجی‌های سیستم

ورودی	VL	L	M	S	VS
Me.d (lit)	۲۰ ۲۵ ۳۰ ۳۰	۱۵ ۲۰ ۲۵	۱۰ ۱۵ ۲۰	۵ ۱۰ ۱۵	۰ ۰ ۵ ۱۰
Me.h (lit)	-	۱ ۱/۵ ۲ ۲	۰/۵ ۱ ۱/۵	۰ ۰/۵ ۱ ۱	-
Mc.d (lit)	۴ ۵ ۶ ۶	۳ ۴ ۵	۲ ۳ ۴	۱ ۲ ۳	۰ ۰ ۱ ۲
Mc.h (lit)	-	۰/۳ ۰/۵ ۰/۶ ۰/۶	۰/۱ ۰/۳ ۰/۵	۰ ۰/۱ ۰/۳	-

### پایگاه قواعد فازی

در جدول ۳ پایگاه قواعد فازی مدل نشان داده شده است. هر کدام از قواعد R1 تا R25 یک قاعده فازی یا گزاره شرطی IF\_THEN را نشان می‌دهد. با توجه به تعداد دستگاه‌های ورودی و خروجی سیستم، در حالتی که ورودی و خروجی هر کدام شامل ۵ دستگاه بوده، پایگاه فازی ۲۵ قاعده دارد.

جدول ۳- پایگاه قواعد فازی

ورودی	۲	VS	S	M	L	VL
VL	R1	R2	R3	R4	R5	R5
L	R6	R7	R8	R9	R10	R10
M	R11	R12	R13	R14	R15	R15
S	R16	R17	R18	R19	R20	R20
VS	R21	R22	R23	R24	R25	R25

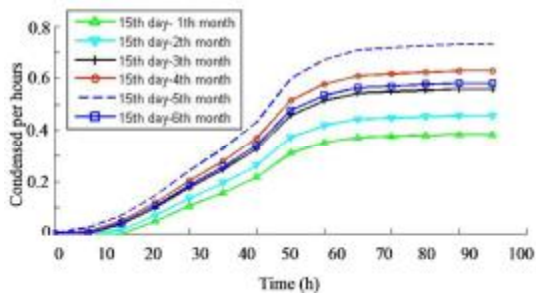
### نتایج و بحث

در این پژوهش یک سیستم آبیاری اصلاح‌شده زیرسطحی، با استفاده از انرژی خورشیدی، هم به صورت تجربی و هم به صورت شبیه‌سازی بررسی شده است. در نرم‌افزار متلب یک استخر به سطح ۲۵ مترمربع، یک لوله زیرزمینی به قطر ۱۰ cm حاوی مخلوط هوای گرم و مرطوب و یک لوله به قطر ۵ cm حاوی سیال سرد خنک‌ساز در داخل لوله بزرگتر شبیه‌سازی شده است. تحلیل گرمایی و انتقال جرم برای استخر و لوله زیرزمینی صورت گرفته و میزان نسبت رطوبت، دما و مقدار جرم آب چگالیده در طول لوله به دست آمده است. با شبیه‌سازی انجام‌شده در متلب، پارامترهای دمای استخر، دمای هوای گرم و مرطوب درون لوله زیرزمینی، نسبت رطوبت هوای درون استخر، نسبت رطوبت هوای گرم و مرطوب درون لوله زیرزمینی، میزان آب تبخیرشده درون استخر و میزان آب چگالش‌یافته درون لوله زیرزمینی به صورت روزانه و ساعتی تعیین شده است. این شبیه‌سازی برای روز میانی هر ماه در ۶ ماه اول سال، از فروردین تا شهریور، انجام شده و تحلیل گرمایی،

در دو حالت مکانی و زمانی انجام شده است. برای تحلیل مکانی، تغییرات پارامترهای دما، نسبت رطوبت، آنتالپی، جرم آب تبخیرشده درون استخر و جرم آب چگالیده در طول لوله برای بازه‌های زمانی ثابتی بررسی شده است. برای تحلیل زمانی، پارامترهای ذکرشده، برای میزان طول ثابتی از لوله، در ساعات، روزها و بازه‌های زمانی متفاوتی مورد بررسی قرار گرفته و با ارائه یک مدل پیش‌بینی مبتنی بر استنتاج فازی، میزان بیشینه خروجی سیستم با انتخاب پارامترهای بهینه، تعیین گردیده است. همچنین تأثیر هر کدام از این پارامترها بر بیشینه خروجی سیستم مشخص شده است. مکان آزمایش شهر دهدشت با طول جغرافیایی ۵۰/۵۷ درجه و عرض جغرافیایی ۳۰/۷۸ است. شرایط محیطی آزمایش با توجه به داده‌های ایستگاه سینوپتیک شهرستان کهگیلویه به دست آمده که در جدول ۴ نشان داده شده است. سایر پارامترهای مربوط به طرح با استفاده از وسایل اندازه‌گیری دما، رطوبت و جرم تعیین شده است. در شکل ۷ تغییرات دما در طول لوله حاوی مخلوط هوای گرم مرطوب زیرزمینی برای ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد و شهریور دیده می‌شود. با توجه به شکل ۷، بیشترین میزان دمای هوای استخر، مربوط به مردادماه و کمترین مقدار آن مربوط به ماه فروردین است. بیشینه دمای نهایی هوای استخر ۹۰°C در مردادماه و کمینه آن، ۶۰°C در فروردین‌ماه ارزیابی شده است. همچنین در تمام ماه‌های مورد بررسی، مقدار دما در طول لوله به صورت لگاریتمی کاهش یافته و در همه زمان‌ها از الگوی یکسان کاهشی در طول لوله پیروی کرده است. در انتهای لوله مقدار دما به سمت دمای زمین و دمای سیال کنسانسور ۲۰°C نزدیک شده است.

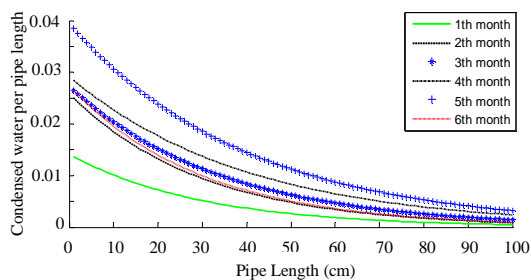
در شکل ۸، مقدار رطوبت درون لوله زیرزمینی برای روز میانی هر ماه و بازه ساعتی مشترک، برای ۶ ماه اول سال مورد بررسی قرار گرفته است. از بررسی شکل ۷ به دست می‌آید که در مرداد و شهریور، بیشترین مقدار رطوبت

جرم چگالش یافته ساعتی به  $0.8 \text{ lit}$  در ساعت و در فروردین ماه بیشینه آب تولید شده در هر ساعت به مقدار  $0.35 \text{ lit}$  رسیده است.



شکل ۹- مقدار آب تولید شده برای ساعات مختلف شبانه روز

در شکل ۱۰ مقدار آب تولید شده در طول لوله برای ۶ ماه اول سال در یک بازه زمانی ساعتی یکسان نشان داده شده است. بازه زمانی مورد نظر ساعت ۱۴ الی ۱۵ روز ۱۵ ام مربوط به ۶ ماه اول سال بود. بیشترین میزان آب تولید شده در لوله، مربوط به مرداد ماه است. برای بازه زمانی مورد نظر در مرداد ماه میزان آب چگالیده در ابتدای لوله در حالت بیشینه  $0.4 \text{ lit}$  به دست آمد و با کاهش در طول لوله به مقدار  $0.05 \text{ lit}$  در انتهای لوله رسیده است. این مقادیر برای فروردین ماه در ابتدای لوله  $0.15 \text{ lit}$  و در انتهای لوله به صفر رسیده است.



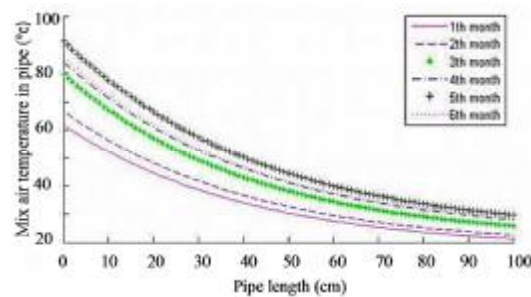
شکل ۱۰- مقدار آب تولید شده ساعتی در طول لوله

در جدول ۵، مقدار جرم آب تولید شده روزانه در روز وسط ماه، برای ۶ ماه اول سال به صورت تجربی و شبیه‌سازی نشان داده شده است. میزان خطا بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی نیز در این جدول دیده می‌شود. بیشترین و کمترین مقدار خطا به ترتیب در فروردین (۱۵٪) و در مرداد (۷٪) به دست آمده است. با توجه به جدول، بیشترین آب تولید شده در روز،  $5/7$  لیتر بوده که در قیاس

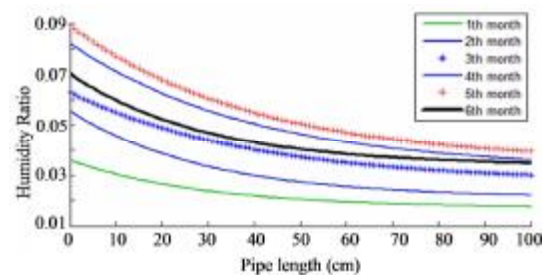
نسبی درون لوله تولید شده است. در مرداد ماه، نسبت رطوبت مخلوط هوای خارج شده از استخر و وارد شده به لوله زیرزمینی ۹٪ بوده و با کاهش در طول لوله، به مقدار ۵٪ در انتهای لوله رسیده است. در کمترین حالت، در فروردین، نسبت رطوبت خارج شده از استخر و وارد شده به لوله در ابتدای لوله ۴٪ بوده که در انتهای لوله با کاهش لگاریتمی در طول لوله به میزان ۱٪ رسیده است.

جدول ۴- شرایط آزمایش برای ۶ ماه اول سال

پارامتر	ماه	۶	۵	۴	۳	۲	۱
دمای محصلط ( $^{\circ}\text{C}$ )		۴۱	۴۷	۴۲	۳۹	۳۵	۳۰
رطوبت نسبی (%)		۱۵	۱۸	۲۰	۲۰	۱۸	۱۵
دمای هوای استخر ( $^{\circ}\text{C}$ )		۷۹	۸۵	۷۸	۷۴	۶۳	۵۵
سرعت هوا (m/s)		۲/۱	۲/۵	۲	۳	۲	۲/۴
دمای آب ( $^{\circ}\text{C}$ )		۵۴	۶۴	۵۹	۵۳	۴۹	۴۱



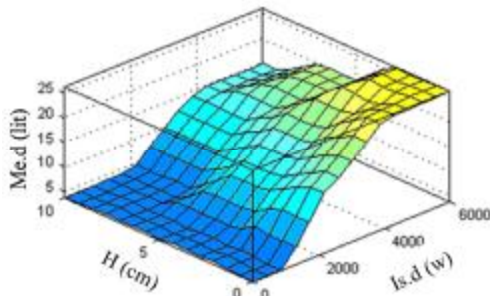
شکل ۷- تغییرات دما در طول لوله زیرزمینی



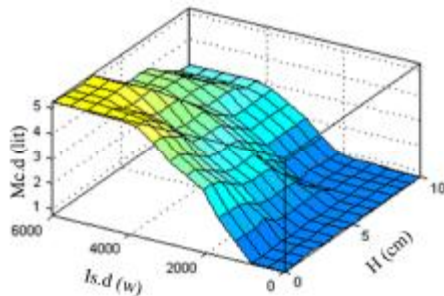
شکل ۸- تغییرات نسبت رطوبت در طول لوله زیرزمینی

در شکل ۹ مقدار جرم آب چگالیده ساعتی درون لوله برای بازه زمانی ۶ صبح الی ۲۰ شب برای ۶ ماه اول سال مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل، بیشترین میزان چگالش ساعتی مربوط به مرداد ماه است. در بازه زمانی ۱۰ صبح الی ۱۷ عصر، تولید آب درون لوله شیب صعودی دارد و از ساعت ۱۷ الی ۲۰ سیستم با نرخ ثابتی آب تولید می‌کند. با توجه به شکل، در مرداد ماه میزان





شکل ۱۲- آب تبخیرشده روزانه استخر



شکل ۱۳- آب تولیدشده روزانه سیستم

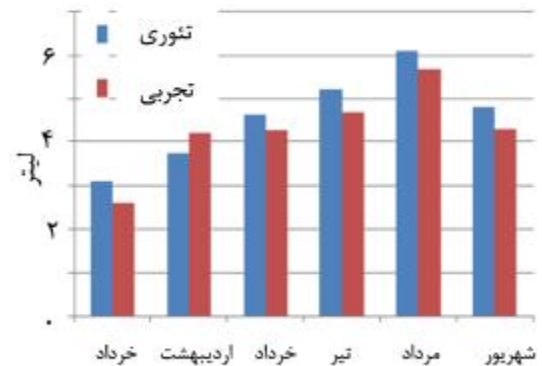
شکل‌های ۱۴ و ۱۵ خروجی مدل را بر اساس ساعات شبانه‌روز نشان می‌دهند. در ساعاتی که بیشینه تابش خورشیدی به  $1000 \text{ W/m}^2$  و ارتفاع آب به  $2 \text{ cm}$  رسیده است، بیشینه آب تبخیرشده ساعتی درون استخر،  $2 \text{ lit}$  و بیشینه آب تولیدشده در لوله زیرزمینی،  $0.5 \text{ lit}$  است. برای بررسی تأثیر پارامترهای دمای آب کندانسور و قطر کندانسور، یک مدل فازی شامل ورودی‌های مذکور ارائه شده است. نتایج حاصل در شکل ۱۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل، با افزایش قطر لوله کندانسور و کاهش دمای آن، بیشینه خروجی مدل (مقدار جرم آب چگالش یافته درون لوله زیرزمینی) حاصل شده که با ثابت ماندن سایر پارامترهای آزمایش، این مقدار بیشینه  $1 \text{ lit}$  در طول روز محاسبه شده است. میزان تأثیر دمای هوای محیط (دمای ورود به استخر خورشیدی) و رطوبت نسبی هوای محیط بر روی خروجی مدل (میزان تبخیر آب روزانه استخر خورشیدی) در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، با افزایش دمای هوای محیط و کاهش رطوبت نسبی، میزان تبخیر آب استخر و در نتیجه آن میزان چگالش آب درون لوله‌های زیرزمینی افزایش یافته است. این بیشینه تبخیر آب استخر،  $2.5 \text{ lit}$  در روز توسط مدل پیش‌بینی شده است. با افزایش میزان تبخیر استخر خورشیدی، مقدار رطوبت هوای داخل استخر نیز

با کار قبلی انجام گرفته در ایران توسط رشیدی (۳/۸۲۹ لیتر)،  $48\%$  (Rashidi et al., 2018) و در مقایسه با کار انجام گرفته در هند ( $4/55$  لیتر)،  $25\%$  افزایش یافته است (Rajaseenivasan & Srithar, 2016).

جدول ۵- آب تولیدشده روزانه تئوری و تجربی

ماه آزمایش	شبیه‌سازی (لیتر)	تجربی (لیتر)	خطا
فروردین	۳/۰۹۰۸	۲/۶	۱۵%
اردیبهشت	۳/۷۲۷۸	۴/۲	۱۱%
خرداد	۴/۶۲۶۵	۴/۲۵	۸%
تیر	۵/۲۳۴۹	۴/۷	۱۰%
مرداد	۶/۱۳۰۱	۵/۷	۷%
شهریور	۴/۸۲۲۳	۴/۳	۱۰%

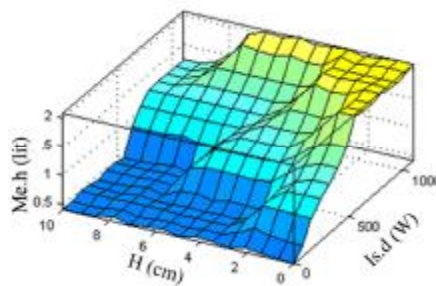
در شکل ۱۱، مقدار آب تولیدشده به صورت روزانه برای هر ماه نشان داده شده که روز وسط هر ماه برای آزمایش در نظر گرفته شده است. بیشینه آب تولیدشده در طول روز،  $5/7 \text{ lit}$  در مرداد و کمترین مقدار آن،  $2/6 \text{ lit}$  در فروردین به دست آمده است.



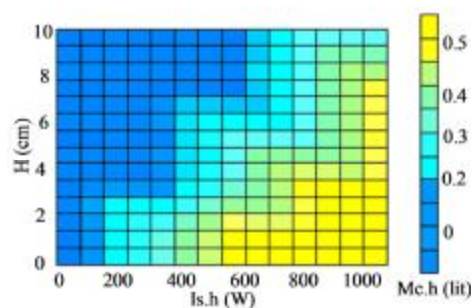
شکل ۱۱- آب تولید شده روزانه در حالت تئوری و تجربی

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ سیستم فازی شامل ورودی‌های میزان تابش روزانه خورشید و ارتفاع سطح آب، و خروجی مدل شامل مقدار آب تبخیر شده روزانه استخر و میزان آب چگالیده روزانه در لوله‌های زیرزمینی را نشان می‌دهند. با توجه به خروجی مدل، در شرایط ثابت بودن سایر پارامترهای آزمایش، با افزایش مقدار تابش روزانه خورشید و کاهش میزان ارتفاع آب استخر، بیشینه خروجی مدل حاصل شده که این مقدار برای جرم آب روزانه تولیدشده  $5 \text{ lit}$  و برای آب تبخیرشده درون استخر خورشیدی  $2.5 \text{ lit}$  است.

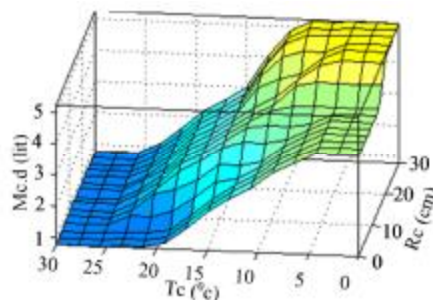
افزایش یافته و در نتیجه مقدار آب چگالش یافته درون لوله ریززمینی بیشتر می‌شود.



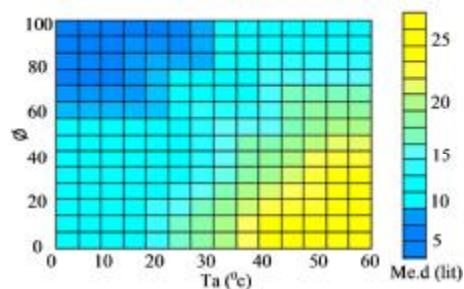
شکل ۱۴- آب تبخیر شده ساعتی استخر



شکل ۱۵- آب تولید شده ساعتی سیستم



شکل ۱۶- جرم آب تولید شده روزانه بر حسب دما و قطر کندانسور



شکل ۱۷- جرم آب تبخیر شده روزانه بر حسب دما و رطوبت نسبی

### نتیجه‌گیری

با مشاهده نتایج حاصل شده از این پژوهش و تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی و شبیه‌سازی انجام گرفته، می‌توان دریافت که استفاده از سیستم آبیاری چگالشی خورشیدی زیرسطحی به میزان زیادی تحت تأثیر تابش خورشیدی در مناطق مورد آزمایش است. در مردادماه این مقدار به بیشینه مقدار خود رسیده که در نهایت تولید آب به ۷/۵ lit در روز و میانگین ۰/۵ lit در ساعت رسیده است. در دمای هوای محیط با مقدار رطوبت نسبی پایین، میزان تولید آب آبیاری افزایش یافته‌است، بنابراین، این روش برای مناطق با اقلیم گرم و خشک مناسب است. با توجه به شبیه‌سازی انجام شده در متلب، بیشینه دمای هوای استخر در مرداد به ۹۰°C و در فروردین به ۶۰°C رسید. در قیاس با مقادیر تجربی، مقدار خطا به ترتیب ۵/۸٪ و ۹٪ به دست آمده است. در مرداد، بیشینه و کمینه نسبت رطوبت مخلوط هوای گرم و مرطوب، در ابتدا و انتهای لوله به ترتیب ۹٪ و ۵٪ محاسبه شده است. مقدار بیشینه و کمینه آب چگالیده درون لوله به ترتیب ۶/۱۳ lit و ۳/۰۹ در روز، برای مرداد و فروردین حاصل شده است. در قیاس با مقدار تجربی، مقدار خطا به ترتیب ۷٪ و ۱۵٪ به دست آمده است. با توجه به نتایج حاصل، استفاده از مبدل حرارتی، باعث تسریع فرآیند تولید آب آبیاری شده و با جذب بخش زیادی از گرمای فرآیند، باعث کاهش دمای خاک و حذف گرادیان دمایی بزرگ خاک می‌شود. همچنین سیکل بازیافت گرما باعث افزایش مقدار دمای آب استخر در شرایط پایه شده است. در نتیجه سیکل‌های گرمایش و تبخیر سیستم زودتر و بیشتر تکرار شده و مقدار آب بیشتری در لوله‌ها تولید می‌شود. با بکارگیری سیستم استنتاج فازی مشخص شد که با افزایش پارامترهایی مانند تابش خورشیدی، دمای محیط، دمای آب، قطر لوله کندانسور و قطر لوله حاوی مخلوط هوای گرم مرطوب و همچنین با کاهش پارامترهای دمای آب کندانسور، رطوبت نسبی هوای محیط و ارتفاع آب استخر، میزان آب چگالش یافته در لوله ریززمینی افزایش می‌یابد. بر اساس یافته‌های این پژوهش، صنایعی که از فرآیندهای تبخیر و میعان استفاده می‌کنند، می‌توانند از سیستم خورشیدی طراحی شده در این پژوهش استفاده کنند. برای مثال، برای صنایعی مثل گلاب‌گیری، عرق‌گیری

12. Rashidi, S., Rahbar, N., Valipour, M. S., & Esfahani, J. A. (2018). Enhancement of solar still by reticular porous media: experimental investigation with exergy and economic analysis. *Applied Thermal Engineering*, 130: 1341-1348
13. Ravishankar, S., Nagarajan, P. K., Edwin, M., Madhu, B., El-Agouz, S. A., Ahsan, A., & Mageshbabu, D. (2016). Experimental Investigations on Conventional Solar Still with Sand Heat Energy Storage. *International journal of heat and technology*, 34: 597-603.
14. Tiwari, G. N., Singh, H. N., & Tripathi, R. (2003). Present status of solar distillation. *Solar Energy*, 75: 367-373.
15. Tsilingiris, P. T. (2012). Combined heat and mass transfer analyses in solar distillation systems– The restrictive conditions and a validity range investigation. *Solar Energy*, 86: 3288-3300.
16. Tripathi, R., & Tiwari, G. N. (2006). Thermal modeling of passive and active solar stills for different depths of water by using the concept of solar fraction. *Solar Energy*, 80: 956-967.

گیاهان دارویی و مواد و اسپری‌های خوشبو کننده، نتایج پژوهش مذکور می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

#### منابع

1. Alamdarin, P., Nematollahi, O., & Alemrajabi, A. A. (2013). Solar energy potentials in Iran: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21: 778-788.
2. Bait, O., & Si-Ameur, M. (2018). Enhanced heat and mass transfer in solar stills using nanofluids: A review. *Solar Energy*, 170: 694-722
3. Hardik, K., Kalpesh, J., & Modib, V. (2019). Experimental performance evaluation of single basin dual slope solar still with circular and square cross-sectional hollow fins. *Solar Energy*, 179, 186-194.
4. Holman, J. P. (2010). *Heat transfer*. 10<sup>th</sup> edition. Wikipedia.
5. Khaligh, R., & Shokouhian, A. (2019). Effect of vermicompost extract (Compost tea) on growth and yield of strawberry. *Journal of Agroecology*, 9 (1): 39-51. (In Persian).
6. Muftah, A. F., Sopian, K., & Alghoul, M. A. (2018). Performance of basin type stepped solarstill enhanced with superior design concepts. *Desalination*, 435: 198-209.
7. Nazari, S., Safarzadeh, H., & Bahiraei, M. (2018). Performance improvement of a single slope solar still by employing thermoelectric cooling channel and copper oxide nanofluid: an experimental study. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1041-1052.
8. Panchal, H., & Mohan, I. (2017). Various methods applied to solar still for enhancement of distillate output. *Desalination*, 415: 76-89.
9. Rabhi, K., Nciri, R., Nasri, F., Ali, C., & Ben Bacha, H. (2017). Experimental performance analysis of a modified single-basin single-slope solar still with pin fins absorber and condenser. *Desalination*, 416: 86-93.
10. Rahbar, N., Asadi, A., & Fotouhi-Bafghi, E. (2018). Performance evaluation of two solar stills of different geometries: Tubular versus triangular: experimental study, Numerical simulation, and second law analysis. *Desalination*, 443: 44-55.
11. Rajaseenivasan, T., & Srithar, K. (2016). Performance investigation on solar still with circular and square fins in basin with CO<sub>2</sub> mitigation and economic analysis. *Desalination*, 380: 66-74.

