

## The Effect of Zeolite Application on Evaporation Rate in Evaporation Ponds

GHAZAL YARIZADEH<sup>1</sup>, EBRAHIM AMIRI TOKALDANY<sup>\*1</sup>, ABDOLMAJID LIAGHAT<sup>1</sup>

1. Irrigation and Reclamation Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: Oct. 16, 2018- Revised: Apr. 24, 2019- Accepted: Apr. 27, 2019)

### ABSTRACT

One of the brine waste disposal options used by developed countries is “evaporation ponds”. In order to increase the efficiency of evaporation ponds in terms of increasing the amount of evaporation and consequently, decreasing the amount of required area for ponds, this subject has been paid more attention by researchers. As, the evaporation rate from ponds is the most important component, the possibility of saving solar energy and releasing the stored heat by Zeolite was studied in this research to increase the evaporation potential of the pond. For this purpose different amounts and types of Zeolite were examined and the Zeolite 13x was chosen. The experiments have been carried out on the platform of Karaj Meteorological Station using two evaporation pans; a test pan including the setup used in this research, and a synoptic available pan as the control pan. The results showed by using different mass of Zeolite (43.8 to 525.1 g/m<sup>2</sup>), the evaporation rate increases 4 to 22% as compared to the control pan. Also, the effect of Zeolite on evaporation rate from saline water was investigated. The results showed that the evaporation rate decreases as compared to the one from Zeolite pond with fresh water. Also, a linear relationship was established between different percentages of salinity and evaporation rates. The results of this study showed by considering saline drainage water, the price of Zeolite and land for construction of evaporation ponds, it is possible to increase the amount of evaporation rate from evaporation ponds and consequently reduce the dimensions of these ponds for economical purposes. Therefore, it is possible to prevent agricultural drainage disposal into rivers.

**Key words:** Evaporation from free water surface, Evaporation ponds, Solar energy, Zeolite, Drainage disposal.

## تأثیر استفاده از زئولیت بر افزایش مقدار تبخیر در حوضچه‌های تبخیری

غزال یاری زاده<sup>۱</sup>، ابراهیم امیری تکلدانی<sup>۱\*</sup>، عبدالمجید لیاقت<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه

تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۲۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۲/۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۲/۷)

### چکیده

یکی از راهکارهای مورد استفاده در دفع زه‌آب‌های شور و آلوده به انواع مواد شیمیایی در کشورهای پیشرفته، استفاده از حوضچه‌های تبخیری است. از آنجا که احداث حوضچه‌های تبخیری مستلزم اشغال فضای زیادی است، افزایش راندمان این سازه‌ها به منظور کاهش سطح اشغال شده توسط آن‌ها از موضوعات مورد علاقه محققین می‌باشد. از آنجا که مهم‌ترین مؤلفه جریان خروجی از این حوضچه‌ها، تبخیر است، در این تحقیق امکان ذخیره انرژی خورشیدی توسط زئولیت و استفاده از گرمای ذخیره شده در آن به منظور افزایش پتانسیل تبخیر از حوضچه مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور مقادیر متفاوت و انواع مختلف زئولیت آزمایش شده و بر اساس نتایج اولیه حاصله، زئولیت 13x انتخاب شد. آزمایش‌ها در محل ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرج انجام و نتایج حاصل از آزمایش‌ها با مقادیر تبخیر روزانه مشاهده شده در آن ایستگاه مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که در صورت استفاده از مقادیر متفاوت زئولیت از ۴۳/۸ تا ۵۲۵/۱ گرم در مترمربع همراه با آب معمولی، مقدار تبخیر از ۴ تا ۲۲ درصد نسبت به شرایط عدم استفاده از زئولیت افزایش می‌یابد. همچنین تأثیر شوری آب بر مقدار تبخیر در شرایط استفاده از زئولیت بررسی و مشخص شد که مقدار افزایش تبخیر در صورت استفاده از آب شور و مقدار مشخصی از زئولیت، نسبت به آب صاف کاهش می‌یابد. با استفاده از نتایج حاصله، رابطه‌ای خطی بین درصدهای متفاوت شوری و مقادیر تبخیر برآزش داده شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با در نظر گرفتن شوری زه‌آب، قیمت زئولیت و زمین برای احداث حوضچه، امکان افزایش تبخیر از این حوضچه‌ها و در نتیجه کاهش ابعاد سازه‌ای و متعاقباً توجیه اقتصادی احداث آن‌ها وجود داشته و بنابراین می‌توان از تخلیه زه‌آب‌های کشاورزی به داخل رودخانه‌ها جلوگیری نمود.

**واژه‌های کلیدی:** تبخیر از سطح آزاد، حوضچه تبخیری، انرژی خورشیدی، زئولیت، دفع زه‌آب

### مقدمه

می‌برند. مشخصات اقلیمی مشترک اکثر این مناطق دمای هوای بالا در اکثر فصول سال، رطوبت پایین، بارندگی کم و تابش انرژی خورشیدی بالا می‌باشد (Shumilin *et al.*, 2002).

حوضچه‌های تبخیری، حوضچه‌هایی مصنوعی با مساحت بسیار بزرگ هستند که زه‌آب شور پس از وارد شدن به آن، در معرض هوا، تابش انرژی خورشیدی و دمای محیط اطراف حوضچه قرار می‌گیرد. قرار گرفتن در معرض شرایط محیطی باعث می‌شود که آب موجود در حوضچه تبخیر شده و مواد آلاینده و یا مواد دیگر که با آب مخلوط شده‌اند، در حوضچه باقی بمانند. بنابراین، تبخیر از این حوضچه‌ها به شدت وابسته به شرایط محیط است (Singh and Christen, 2000). ورودی‌های حوضچه شامل بارندگی مستقیم بر سطح حوضچه و تخلیه زه‌آب زیرزمینی (به طریق ثقلی و یا با استفاده از پمپاژ) به داخل آن می‌باشد. عوامل خروجی حوضچه نیز شامل تبخیر از سطح و نشت از زیر حوضچه

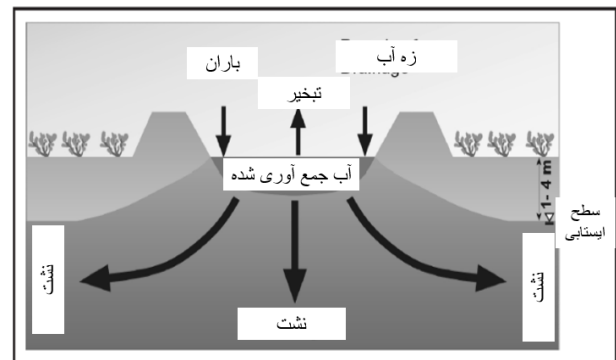
زه‌آب‌های کشاورزی در جنوب استان خوزستان عمدتاً شور می‌باشند و تخلیه این زه‌آب‌ها به رودخانه کارون به دلیل برهم زدن اکوسیستم رودخانه با محدودیت‌های زیست محیطی روبه‌رو است. لذا باید گزینه‌های جایگزین تخلیه زه‌آب به داخل رودخانه کارون و یا استفاده مجدد از آن‌ها مورد ارزیابی دقیق قرار گیرد. یکی از راهکارهای دفع زه‌آب، استفاده از حوضچه‌های تبخیری است. حوضچه‌های تبخیری، سازه‌های بسیار ساده مهندسی هستند که مهم‌ترین مؤلفه جریان خروجی از آن‌ها تبخیر است و در جایی که روش‌های دیگر دفع زه‌آب شور ناکارآمد است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که امروزه کشورهای استرالیا، ایالات متحده آمریکا، بعضی از کشورهای اروپایی در حوضه مدیترانه، آفریقای شمالی و بسیاری کشورهای دیگر از این تکنولوژی به منظور دفع زه‌آب شور بهره

تولید باد برقی در ولتاژ ۷ V ۵۲۵۰ به منظور ایجاد تلاطم در آب و در نتیجه افزایش تبخیر به میزان چهار برابر بوده است (Barthakur and Arnold, 1995). (Ahmed *et al.*, 2002) با بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه حوضچه‌های تبخیری نتیجه گرفتند که پژوهش‌های انجام شده عموماً بر روی یافتن و بررسی راهکارهایی جهت افزایش مقدار تبخیر و در نتیجه کاهش سطح حوضچه، هزینه پوشش و هزینه زمین متمرکز شده است. آن‌ها از یک روش مبتنی بر استفاده از رنگ به منظور جذب بیشتر انرژی خورشیدی، افزایش دما، کاهش کشش سطحی، افزایش فشار بخار اشباع جذب و در نتیجه افزایش میزان تبخیر از حوضچه استفاده نمودند (Ahmed *et al.*, 2002). از روش‌های دیگر افزایش پتانسیل تبخیر می‌توان اسپری قطرات آب به هوا، افزایش تلاطم در حوضچه‌ها، عبور آب از روی سطوح صاف عمودی و ایجاد جریان هوا بر روی سطح حوضچه‌ها را نام برد. همچنین O'Reilly (2009) یک روش حوضچه تبخیری برای دفع پساب‌شور ارائه کرده که شامل استفاده از فن‌آوری کلکتور صفحه‌ای خورشیدی بوده و با عبور زه‌آب از روی سطح کلکتور و گرم شدن آن افزایش تبخیر انجام می‌پذیرفت. (O'Reilly, 2009) نتیجه گرفت که متوسط نسبت افزایش تبخیر با استفاده از این تکنیک به تبخیر از حوضچه معمولی، معادل با ۱/۵۲ برابر بوده است. به عبارت دیگر در این روش به طور متوسط ۵۲٪ بهبود عملکرد مشاهده شده است.

(Hoque *et al.*, 2010) از بین روش‌های موجود افزایش پتانسیل تبخیر در حوضچه‌های تبخیری، چهار روش WAIV (Guitierrez *et al.*, 2003)، باله‌های آلومینیومی شناور (Negri *et al.*, 1993 and Roman, 2003) استفاده از گیاهان شورپسند، (Gault, 1986 and Lorenzini, 2003) و اسپری قطرات آب به هوا، (2006) را برای مطالعه دقیق مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که در بین روش‌های مورد بررسی، روش WAIV بیشترین پتانسیل افزایش تبخیر را دارد و افزایش ۱۳ برابری نرخ تبخیر در این روش گزارش شده است. افزایش تبخیر در باله‌های شناور، ۲۴٪، گیاهان شورپسند ۳۰٪ و برای روش اسپری قطرات ۳۵٪ گزارش شده است. (Hoque *et al.*, 2010) در مقایسات خود بیان کردند برای نتیجه‌گیری دقیق‌تر به داده‌های آزمایش‌های فیزیکی بیشتر و مدل‌سازی ریاضی روش‌ها و تلفیق آن‌ها با یکدیگر برای محاسبه راندمان هر تکنیک نیاز می‌باشد.

(Gawlik *et al.*, 2015) در مطالعات خود روشی را ارائه کردند که شامل یک سیستم برای افزایش تبخیر از جسم مایع است که در آن هوای گرم شده و یا گرم نشده از طریق یک شبکه لوله مستغرق در داخل حوضچه تبخیر توزیع می‌شود و لذا ورود

است (شکل ۱). حوضچه‌های تبخیری برحسب مقدار سطح آزاد آب (هکتار) تعریف می‌شوند، زیرا عملکرد این حوضچه‌ها بر اساس تبخیر از سطح آزاد آب است. حوضچه‌های تبخیری می‌توانند کوچک (۲ تا ۲۰ هکتار) برای جمع‌آوری زه‌آب هر مزرعه و یا بزرگ (۳۰ تا ۲۰۰ هکتار و بیشتر) برای جمع‌آوری زه‌آب چندین مزرعه ساخته شوند (Singh and Christen, 2000).



شکل ۱- نمای شماتیک یک حوضچه تبخیری

به منظور دستیابی به مقدار تبخیر مورد نیاز از سطح حوضچه که پاسخگوی دفع حجم بالای زه‌آب باشد، مساحت سطح حوضچه باید بسیار بزرگ در نظر گرفته شود که در نتیجه مقدار زیادی از فضای در دسترس را اشغال خواهد کرد. ابعاد بزرگ حوضچه باعث می‌شود که هزینه‌های احداث و در نتیجه هزینه طرح بالا رود و حتی ممکن است ساخت حوضچه با محدودیت فضا مواجه شود. به علاوه، از آنجا که شدت تبخیر به دمای محیط مرتبط است، در شرایط هوای سرد ممکن است شدت تبخیر قابل توجه وجود نداشته باشد. بنابراین آنچه امروزه در حوضچه‌های تبخیری مورد علاقه محققین می‌باشد ابداع روش‌های کارآمد برای افزایش تبخیر آب از حوضچه‌ها و در نتیجه کاهش سطح اشغال شده توسط آن‌ها است.

به منظور افزایش میزان تبخیر، روش‌های متفاوتی توسط محققان پیشنهاد شده و نتایج حاصل از کاربرد آن روش‌ها گزارش شده است. (Bloch *et al.*, 1951) در تحقیق خود اضافه کردن ۳/۵ عدد دانه رنگی در هر فوت مکعب آب‌نمک را به منظور افزایش تبخیر توصیه کردند. (Kingdon, 1963) در مطالعات خود با فرض اینکه پیوند هیدروژنی آب ممکن است با اتصال مولکول خارجی به سطح آن تضعیف شده و این عمل، باعث افزایش میزان تبخیر شود، از برخی از گازها شامل هلیوم، نیتروژن، بوتان و اکسیژن برای بررسی امکان افزایش تبخیر استفاده نمود. طبق نتایج ارائه شده توسط (Kingdon, 1963)، با استفاده از گاز بوتان بهترین نتیجه حاصل شده است. روش دیگر، مبتنی بر استفاده از

هوا به داخل حوضچه باعث ایجاد حباب و افزایش تبخیر می‌گردد. همچنین در رویکردی دیگر، قبل از ورود هوا به داخل حوضچه، هوا با آب ترکیب می‌شود و سپس وارد حوضچه می‌گردد. مطابق روش ارائه شده توسط گاولیک و همکاران هوا را می‌توان توسط انرژی خورشیدی، الکتروسیسته، سوخت فسیلی و ... گرم کرده و شبکه لوله را نیز می‌توان در هر عمقی زیر سطح بالایی حوضچه تعبیه کرد. نتایج آزمایشگاهی این روش توسط محققین مربوطه ارائه نشده است و لذا نمی‌توان راجع به کارایی آن اظهار نظر کرد. روش ابتکاری برای افزایش پتانسیل تبخیر در این تحقیق، ذخیره انرژی گرمایی خورشیدی و استفاده از آن در زمان مناسب است. مشکل بزرگ بسیاری از تجهیزات خورشیدی، ذخیره مؤثر گرمای جمع‌آوری شده توسط این سامانه‌ها برای استفاده در شب هنگام و یا روزهای غیر آفتابی است. تا کنون چندین ایده ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی از جمله مخازن عایق ذخیره آب، توده‌های سنگی عایق شده و یا مخازن عایق پر شده با بعضی از انواع ضد یخ ارائه و اجرا شده است. اجرای هر یک از موارد ذکر شده به عواملی همچون هزینه، حجم مورد نیاز مخازن، بازده استحصال انرژی ذخیره شده و زوال انرژی ذخیره شده در طی زمان در قالب تلفات گرمایی بستگی دارد. لذا باید روشی برای ذخیره انرژی خورشیدی مورد استفاده قرار گیرد که هزینه‌های مربوط و ویژگی‌های منفی را به حداقل برساند. بررسی تلاش‌های انجام شده توسط محققین در حوزه‌های مختلف برای استفاده مؤثر از انرژی خورشیدی نشان داد که امروزه یکی از روش‌های کارآمد ذخیره انرژی خورشیدی با بازده بالا و بدون تلفات، استفاده از خصوصیات شگفت‌انگیز ماده ژئولیت در جذب و نگهداشت انرژی خورشیدی است (Yu et al., 2013). هدف از تحقیق حاضر، ارائه یک روش جدید برای ذخیره‌سازی بهینه انرژی خورشیدی با استفاده از ماده ژئولیت در حوضچه‌های تبخیری و افزایش بهره‌وری این حوضچه‌ها می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

در این بخش ابتدا عوامل مؤثر بر تبخیر که در تحلیل مسئله به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شوند معرفی شده و سپس به ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی ماده ژئولیت به عنوان جاذب انرژی اشاره و در بخش بعدی به اصول ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی توسط این ماده پرداخته شده است. سپس نحوه استفاده از ژئولیت در مقیاس آزمایشگاهی برای افزایش پتانسیل تبخیر از حوضچه‌های تبخیری ارائه و ژئولیت مورد استفاده در انجام آزمایش‌های این تحقیق معرفی شده است. در پایان نیز نحوه انجام آزمایش‌ها ارائه شده است.

## معرفی عوامل مؤثر بر تبخیر

در حالت کلی می‌توان عوامل مؤثر در فرایند تبخیر از سطح آب را به پنج دسته تقسیم نمود:

**-دمای هوا:** هوای مجاور سطح تبخیر کننده در اثر تابش خورشید گرم‌تر می‌شود و همین گرما باعث تبدیل آب از حالت مایع به بخار و انتقال آن به اتمسفر می‌گردد. با افزایش دمای هوا، میزان تبخیر هم افزایش پیدا می‌کند. این پدیده به این دلیل است که هر چه دمای هوا بالاتر می‌رود، فشار بخار اشباع آب نیز افزایش پیدا می‌کند که این پدیده باعث افزایش میزان تبخیر می‌گردد.

**-سرعت باد:** باد با جابجا کردن هوای مرطوب، می‌تواند نقش بسیار مهمی در افزایش تبخیر از سطح داشته باشد. در حقیقت عمل باد عبارت از جابجا نمودن هوای مرطوب مجاور سطح تبخیر شونده و جایگزین ساختن هوای خشک‌تر و سردتر به جای آن می‌باشد. در نتیجه افزایش سرعت باد، موجب افزایش مقدار تبخیر می‌شود.

**-فشار هوا:** کاهش فشار هوا، میزان تبخیر را افزایش می‌دهد. در مناطق کوهستانی با افزایش ارتفاع، میزان فشار کاهش یافته و انتظار می‌رود که مقدار تبخیر نیز افزایش یابد، لیکن از آنجا که در این مناطق، دمای هوا کاهش می‌یابد در نتیجه فشار بخار اشباع نیز کاهش یافته و به موجب آن مقدار تبخیر نیز کاهش می‌یابد.

**-مساحت سطح تبخیر کننده:** میزان تبخیر در همه قسمت‌های یک سطح یکسان نمی‌باشد. در مورد سطوح آزاد آب‌ها، میزان تبخیر در کناره‌های یک منبع آبی بیشتر از قسمت‌های مرکزی است.

**-میزان املاح موجود در آب:** هر چه میزان املاح موجود در آب بیشتر باشد، میزان تبخیر از آن کاهش می‌یابد.

مقدار تبخیر تابعی از اختلاف فشار بخار آب بین هوا و سطح آب بوده و توسط قانون دالتون به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$E = C(e_w - e_a) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه (۱)  $E$ ، بیانگر میزان تبخیر از سطح آزاد آب (in/mon)،  $e_w$ ، فشار بخار اشباع در میانگین دمای ماهانه (mmHg)،  $e_a$ ، میانگین فشار بخار واقعی هوا (mmHg) و  $C$ ، ضریبی است که بستگی به تعدادی عوامل غیرقابل محاسبه در تبخیر دارد.

## استفاده از ژئولیت به عنوان جاذب گرمای خورشیدی

در چندین سال اخیر توجه محققین در حوزه دفع زهاب‌های شور، بر روی حوضچه‌های تبخیری به عنوان یک راهکار و انجام تمهیدات لازم برای افزایش پتانسیل تبخیر آب از این حوضچه‌ها

به یکدیگر متصل می‌شوند (شکل ۲). چارچوب آلومینوسیلیکات زئولیت به طور قابل ملاحظه باز و شامل کانال‌ها و حفره‌های پیوسته است که درصدی از آن با کاتیون و مولکول‌های آب پر شده است. این حفره‌ها حدود ۲۰ تا ۵۰ درصد از کل حجم بلور اکثر زئولیت‌ها را تشکیل می‌دهند. هنگامی که زئولیت گرم می‌شود، مولکول‌های آب از داخل ساختمان آن خارج شده و در عین حال انرژی گرمایی در آن ذخیره می‌شود. وقتی که مولکول‌های آب دوباره جذب آن می‌شوند، انرژی گرمایی ذخیره شده در داخل زئولیت آزاد می‌شود. این دو فرآیند را می‌توان توسط معادله زیر نشان داد:

(رابطه ۲)

گرماگیر  $A_mX_pO_{2p} \cdot n(H_2O) \leftrightarrow A_mX_pO_{2p} + n(H_2O)$   
 هنگامی که زئولیت در معرض حرارت قرار می‌گیرد و مولکول‌های آب از ساختمان آن خارج می‌شود و گرما جایگزین مولکول‌های آب می‌شود، درجه حرارت آن تغییر نمی‌کند. این فرآیند متعلق به نوعی از ذخیره‌سازی گرما به نام گرمای نهان است. تا زمانی که زئولیت از آب دور نگه‌داشته شود، انرژی گرمایی ذخیره شده در آن را می‌توان تا هر زمان حفظ کرد و هنگامی که زئولیت در معرض تماس با مولکول‌های آب قرار گیرد انرژی ذخیره شده در ساختمان خود را آزاد می‌نماید. زمانی که انرژی حرارتی در زئولیت استخراج می‌شود، می‌توان سرعت آزاد شدن انرژی را با کنترل سرعت جذب آب، تنظیم نمود (Baoqi et al., 1994)

### نحوه استفاده از زئولیت در مقیاس آزمایشگاهی برای افزایش پتانسیل تبخیر حوضچه‌های تبخیری

برای انجام آزمایش‌ها به منظور بررسی امکان افزایش پتانسیل تبخیر در حوضچه‌های تبخیری با استفاده از زئولیت، دو تشت تبخیر برای اندازه‌گیری تبخیر در هوای آزاد در نظر گرفته شده که یک تشت (تشت مستقر در ایستگاه سینوپتیک کرج) به عنوان تشت شاهد (تشت شماره ۱) و تشت دیگر (تشت شماره ۲) همراه با یک کلکتور صفحه‌ای تخت (صفحه شیشه‌ای)، انتخاب شدند. یک جعبه نیز برای تعبیه زئولیت همراه با تجهیزات مربوط در نظر گرفته شد (شکل ۳).

کلکتور صفحه‌ای خورشیدی متشکل از یک جعبه مستطیل شکل از جنس چوب و یا آلومینیوم عایق شده‌ی مسطح بوده که سطح بالایی آن از جنس شیشه دوجداره، پلکسی گلس و یا هر ماده شفاف دیگر می‌باشد. داخل جعبه جهت نگهداشت بیشتر انرژی خورشیدی به رنگ مشکی و یا هر رنگ تیره در آمده و کف این جعبه با زئولیت با دانه بندی مشخص پر می‌گردد. با

متمرکز شده است. هر چقدر پتانسیل تبخیر از حوضچه بالاتر رود، سطح مورد نیاز برای این حوضچه‌ها کاهش یافته و این مسئله به خصوص در مناطقی که زمین در دسترس محدود بوده و یا هزینه خرید اراضی بالا باشد، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بدین جهت تاکنون راهکارهای متنوعی برای افزایش میزان تبخیر از حوضچه‌های تبخیری ارائه شده است. در تحقیق حاضر، استفاده از ماده زئولیت برای افزایش پتانسیل تبخیر در این حوضچه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است.

زئولیت (Zeolite) یک ماده معدنی است که عمدتاً از آلومینوسیلیکات تشکیل شده و کاربرد تجاری عمده آن در صنایع به عنوان جاذب سطحی است. واژه زئولیت در اصل در سال ۱۷۵۶ توسط کانی‌شناس سوئدی اکسل فردریک کرونستد ابداع شده است. نام زئولیت از ترکیب دو واژه یونانی (zéo)، به معنی "جوش" و (lithos)، به معنای "سنگ" تشکیل شده است. زئولیت‌ها خواص شگفت‌انگیزی دارند. تنوع کاربردی زئولیت‌ها در صنایع، دانشمندان را به کشف و دسته‌بندی انواع زئولیت‌های طبیعی ترغیب نموده و ساخت انواع مصنوعی آن را نیز موجب شده است به طوری که در حال حاضر بیش از ۴۰ نوع کانی زئولیت طبیعی کشف و بیش از یکصد و پنجاه نوع زئولیت مصنوعی ساخته شده است که هر یک کاربردهای اختصاصی خود را دارد. خواص منحصر به فرد ذکر شده این کانی، همراه با مقاومت بالای مکانیکی و شیمیایی، امکان کاربرد این ماده در بازه وسیعی از صنایع کشاورزی، پرورش دام و طیور و آبیان، پتروشیمی، پالایشگاه‌ها، محیط‌زیست، تصفیه آب، تصفیه فاضلاب، تصفیه هوا، بوگیر، کاغذسازی، از بین بردن قارچ‌ها و انگل‌ها، جداسازی و تخلیص گازها (تولید گاز اکسیژن)، داروسازی، صنایع اتمی و ... را فراهم نموده است.

یکی از ویژگی‌های مهم این ماده معدنی، توانایی بالای آن در جذب انرژی خورشیدی است، به طوری که تا مدت نامحدودی قادر است انرژی خورشیدی را درون ساختمان خود ذخیره کرده و در هنگام نیاز آن را آزاد و تبدیل به انرژی گرمایی کند.

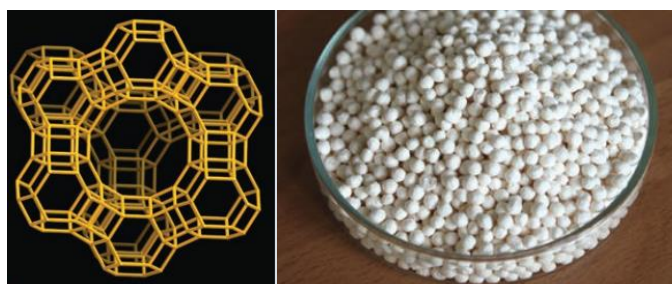
### اصول ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی با استفاده از زئولیت

زئولیت یک ماده آلومینوسیلیکات قلیایی یا قلیایی فلز خاکی شامل بلور آب است که به دو فرم معدنی و مصنوعی (با ترکیبات فراوان) در بازار موجود است. فرمول شیمیایی عمومی زئولیت به فرم  $A_mX_pO_{2p} \cdot n(H_2O)$  است که در آن A نشان‌دهنده Ca، Na، K، Ba، Sr و همچنین X نشان‌دهنده Al و Si است. زئولیت از شبکه‌های سه‌بعدی از چهاروجهی‌های  $SiO_4$  و  $AlO_4$  تشکیل شده که کلیه این چهار وجهی‌ها از طریق اکسیژن مشترک

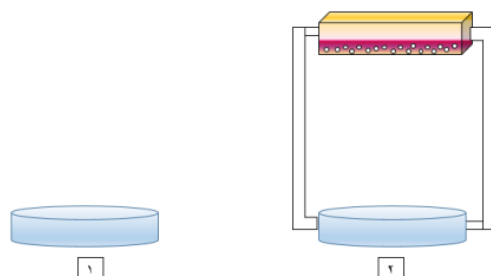
هوا، درصد رطوبت، میزان بارش، ساعات آفتابی و سرعت باد از ایستگاه هواشناسی دریافت می‌شد. با ثبت تغییرات ارتفاع آب در تشت‌های انتخابی در ساعات مختلف، مقایسه تفاوت مقدار تبخیر از این دو تشت، و با تحلیل تأثیر عوامل مؤثر بر روی میزان تبخیر، مقدار تأثیر زئولیت بر افزایش تبخیر محاسبه می‌گردید. نحوه کارکرد زئولیت و یا به عبارت دیگر چگونگی انجام واکنش‌ها در زئولیت برای افزایش تبخیر از حوضچه‌های تبخیری، مطابق (شکل ۴) به شرح زیر می‌باشد.

استفاده از انرژی آزاد شده از زئولیت و گرم شدن بخار آب و دمیدن بخار آب به داخل حوضچه توسط لوله‌های مستغرق، پتانسیل تبخیر حوضچه افزایش می‌یابد. لازم به گفتن است که گوارا (Guerra, 1978) این روش را به عنوان روشی ابتکاری برای گرمایش ساختمان‌ها با استفاده از انرژی خورشیدی و زئولیت معرفی کرده است.

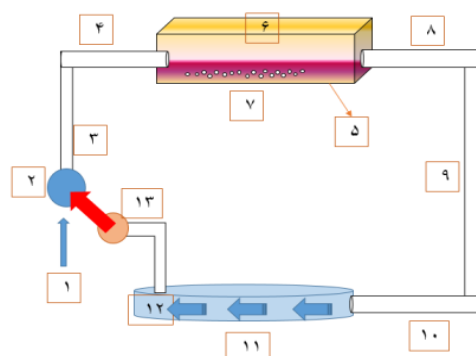
به منظور تعیین مقدار افزایش پتانسیل تبخیر با استفاده از زئولیت و مجموعه آزمایشگاهی طراحی شده، ابتدا اطلاعات مربوط به متغیرهای هواشناسی در روزهای انجام آزمایش شامل دمای



شکل ۲- زئولیت دانه‌بندی شده و نمای شماتیک از ساختمان یک نوع زئولیت



شکل ۳- نمای شماتیک بررسی آزمایشگاهی میزان افزایش تبخیر از حوضچه‌های تبخیری با استفاده از زئولیت



شکل ۴- سیستم آزمایشگاهی افزایش تبخیر از حوضچه‌های تبخیری با استفاده از زئولیت

حالی که بسته دیگر زئولیت (بسته شماره ۲) مشابه بسته اول در معرض انرژی خورشیدی قرار داده می‌شد، بسته شماره یک در داخل جعبه کلکتور (۵) تعبیه شده و آزمایش آغاز می‌شد. با استفاده از یک اتمایزر (اسپری کننده) (۱۳) قطرات آب به صورت

در شروع آزمایش یک بسته زئولیت با جرم مشخص (بسته شماره یک)، در معرض انرژی خورشیدی قرار داده شده به طوری- که تحت شرایط فراهم شده، آب موجود در ساختمان زئولیت خارج و به جای آن گرما ذخیره می‌شد. از ابتدای روز بعد، در

حجمی آن بزرگتر یا مساوی ۶۵ درصد می‌باشد. هم چنین در بازه ۱۴ تیر ماه تا ۸ مهرماه ۱۳۹۷ به منظور بررسی تأثیر شوری بر افزایش تبخیر، با استفاده از آب حاوی املاح شورکننده آزمایش‌های بیشتری انجام گرفت. بازه‌ی انجام آزمایش‌ها و شرح آزمایش‌های انجام‌شده در (جدول ۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- جدول زمان‌بندی انجام آزمایش‌های پروژه

شرح انجام آزمایش	بازه زمانی
اردیبهشت تا تیر ۱۳۹۶	آماده‌سازی فضای آزمایش
تیر تا شهریور ۱۳۹۶	بررسی و انجام آزمایش برای پیدا کردن ژئولیت مناسب
شهریور تا آذر ۱۳۹۶	انجام آزمایش‌ها با مقادیر متفاوتی از جرم ژئولیت با آب معمولی شهری
اردیبهشت تا تیر ۱۳۹۷	ادامه انجام آزمایش‌ها با مقادیر متفاوتی از جرم ژئولیت با آب معمولی شهری
تیر تا مهر ۱۳۹۷	انجام آزمایش‌های بررسی تأثیر شوری بر افزایش تبخیر با آب حاوی املاح شور

از آنجا که آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری تبخیر در فضای آزاد صورت می‌پذیرفت، لذا انجام آزمایش‌ها فقط تا قبل از شروع فصل یخبندان امکان‌پذیر بود زیرا با شروع فصل یخبندان و یخ زدن آب در تشت‌های تبخیری عملاً تبخیر صفر در نظر گرفته می‌شد. در ایستگاه سینوپتیک کرج مقدار تبخیر روزانه، هر روزه در ساعت ۱۰:۳۰ صبح با استفاده از قلاب میلی‌متری و توسط کارشناس مستقر در ایستگاه قرائت می‌شود. با هماهنگی‌های صورت‌گرفته با سازمان هواشناسی استان البرز، برای اندازه‌گیری میزان افزایش تبخیر با استفاده از ژئولیت، یک تشت تبخیر آزمایشی با تجهیزات مربوطه که در ادامه شرح داده می‌شود، در پلتفرم ایستگاه هواشناسی کرج تعبیه شد و مقدار تبخیر از این تشت، با مقدار تبخیر از تشت مورد استفاده در ایستگاه سینوپتیک کرج مورد مقایسه قرار گرفت. اندازه‌گیری تبخیر نیز همانند ایستگاه سینوپتیک هر روز در ساعت ۱۰:۳۰ صبح و برحسب میلی‌متر در روز صورت می‌پذیرفت.

علاوه بر اندازه‌گیری مقدار تبخیر روزانه، مقادیر اندازه‌گیری شده چهار متغیر هواشناسی مؤثر بر مقدار تبخیر شامل دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)، رطوبت نسبی (%)، سرعت باد (متر بر ثانیه) و ساعات خورشیدی (ساعت) از ایستگاه هواشناسی کرج دریافت و اثرات آن‌ها بر مقدار تبخیر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای بررسی افزایش مقدار تبخیر حاصل از کاربرد ژئولیت و یا دیگر عوامل، پارامتر  $ER$  (Evaporation Ratio) به شرح زیر معرفی گردید که بیانگر نسبت مقدار تبخیر از تشت آزمایشی

پودر شده به ژئولیت داخل جعبه اسپری شده و ژئولیت در تماس با رطوبت مقداری از گرمای ذخیره شده را از دست داده و این فرآیند باعث گرم شدن هوای داخل جعبه می‌شد. نحوه انتقال گرما به داخل حوضچه‌ها مطابق با روش پیشنهادی *Gawlik et al.* (2015) به صورت حباب و با استفاده از بلوئر انتخاب شد. گرمای تولید شده، توسط بلوئر (۲) و توسط خطوط لوله (۸ و ۹ و ۱۰) به سمت حوضچه تبخیری (۱۱) هدایت شده و این هوای گرم و مرطوب با استفاده از یک سیستم توزیع مستغرق (۱۲) و به صورت حباب وارد حوضچه می‌شد. نرخ انتقال رطوبت از داخل مخزن به داخل جعبه ۰/۲۸ میلی‌لیتر بر ثانیه و در تمامی آزمایش‌ها ثابت بود.

این فرایند تا زمانی که ژئولیت بسته شماره یک تمامی انرژی خورشیدی ذخیره شده از روز قبل را از دست داده و از آب اشباع می‌شد، ادامه پیدا می‌کرد. در ابتدای روز بعد، بسته ژئولیت شماره یک از داخل جعبه کلکتور بیرون آورده شده و در معرض انرژی خورشید قرار گرفته و در همان حال، بسته شماره دو که در طی روز گذشته کاملاً خشک شده و گرما در آن ذخیره شده بود، در داخل جعبه کلکتور قرار داده شده و مجدداً فرآیند تکرار می‌شد. لازم به گفتن است که مقدار گرمای تولید شده توسط ژئولیت به مقدار هوای مرطوب و میزان رطوبت آن و سرعت ورود هوای مرطوب به داخل جعبه کلکتور بستگی دارد.

#### ژئولیت مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق آزمایش‌های مربوط به افزایش تبخیر از حوضچه‌های تبخیری ابتدا در بازه تیرماه تا ابتدای شهریور ماه با استفاده از انواع ژئولیت‌های طبیعی موجود در ایران (از نوع کلینوپتیلولیت از معادن سمنان) و ژئولیت مصنوعی 13x پودری و با استفاده از آب شهری انجام شد که نتیجه متفاوتی بین دو تشت تبخیر مشاهده نشد. آزمایش‌های بیشتر با استفاده از ژئولیت مصنوعی 13x میله‌ای، در بازه زمانی از ۱ شهریور ماه ۱۳۹۶ تا ۱ آذر ماه ۱۳۹۶ و سپس از ۱۱ اردیبهشت ماه تا ۱۳ تیرماه ۱۳۹۷ با آب شهری در پلتفرم ایستگاه هواشناسی کرج، واقع در مزرعه پژوهشی دانشگاه تهران در ابتدای جاده محمد شهر و در ذیل شرایط جوی متفاوت انجام گرفت. از آنجا که ژئولیت مصنوعی 13x در بسته‌های ۱۵۰ کیلوگرمی وارد می‌شود، لذا محققین با همکاری شرکت تنسر پارس (وارد کننده ژئولیت 13x به ایران) توانستند برای تحقیقات خود به مقدار ۶۰۰ گرم ژئولیت جهت انجام آزمایش‌ها تهیه نمایند. ژئولیت مورد استفاده به رنگ خاکستری روشن، دانه‌بندی میله‌ای و به قطر ۱/۶ میلی‌متر و درصد آب موجود در ساختمان آن کمتر از یک درصد و دانسیته

شامل ماده زئولیت (*Evaporation (test pan)*) به تشت سینوپتیک (*Evaporation synoptic pan*) بود.

$$ER = \frac{Evaporation (test pan)}{Evaporation (synoptic pan)} \quad (\text{رابطه ۳})$$

از آنجا که در هر دو تشت مستقر در ایستگاه سینوپتیک و تشت آزمایشی از یک منبع آب استفاده می‌گردید، با استفاده از یک تی‌دی‌اس متر (سختی سنج آب)، سختی آب مورد استفاده در تشت‌ها اندازه‌گیری شده و مقدار آن معادل با ۳۳۹ ppm ( $EC=70$ ) بدست آمد. به منظور بررسی تأثیر شوری بر افزایش مقدار تبخیر، با توجه به توصیه (O'reilly (2009) غلظت‌های متفاوت ۳/۵، ۷ و ۱۲ درصد آب‌شورتر در تشت آزمایشی نسبت به آب موجود در تشت مستقر در ایستگاه سینوپتیک مورد بررسی قرار گرفت. لازم به گفتن است که دلیل انتخاب این غلظت‌ها توسط (O'reilly (2009) این بود که غلظت ۳/۵٪ معادل با شوری آب دریا، ۷٪ معادل با دو برابر شوری آب دریا و غلظت ۱۲٪ به معنای آب بسیار بسیار شور می‌باشد. از آنجا که از یک منبع آب در هر دو تشت استفاده می‌شد، به این منظور، در تشت مورد آزمایش مقدار نمک لازم برای رسیدن به غلظت مورد نظر ریخته شده و با به هم زدن آن، محلول آب‌شور تهیه شد. مثلاً برای رسیدن به غلظت ۳/۵٪ معادل با ۳۵۰۰۰ ppm، با توجه به حجم آب داخل تشت معادل با ۰/۲۳ مترمکعب، مقدار ۸۰۵ گرم نمک به آب اضافه و در آن حل گردید تا محلولی ۳/۵٪ شورتر در تشت آزمایشی نسبت به تشت مستقر در ایستگاه سینوپتیک به دست بیاید. از آنجا که هر روز مقدار آب تبخیر شده از تشت از منبع آب موجود در پلتفرم به تشت آزمایشی اضافه می‌گردید لذا با توجه به ثابت بودن مقدار نمک در تشت، مقدار شوری در طی آزمایش ثابت بود. برای رسیدن به نسبت شوری موردنظر، از NaCl استفاده گردید. طبیعتاً در شرایط واقعی، زهاب آلوده شامل فلزهای سنگین و ترکیبات دیگر است، اما به دلیل آن که امکان استفاده از زهاب واقعی با ترکیبات شیمیایی موردنظر میسر نبود، لذا به منظور رسیدن به سختی مورد نظر از نمک طعام استفاده گردید. لازم به ذکر است که آزمایش‌های مربوط به بررسی تأثیر شوری همگی با استفاده از ۳۰۰ گرم (۲۶۲/۵) گرم در مترمربع زئولیت صورت پذیرفت.

## نتایج و بحث

در آزمایش‌های صورت گرفته، مقدار جرم زئولیت مورد استفاده از ۵۰ گرم تا ۶۰۰ گرم متغیر بوده است، از آنجا که مساحت سطح تبخیر از تشت معادل با ۱/۱۴ مترمربع می‌باشد، بنابراین مقادیر زئولیت مورد استفاده بر مقدار مساحت تشت تقسیم شده تا اثر مقدار جرم زئولیت بر واحد سطح تبخیر به دست بیاید. همچنین

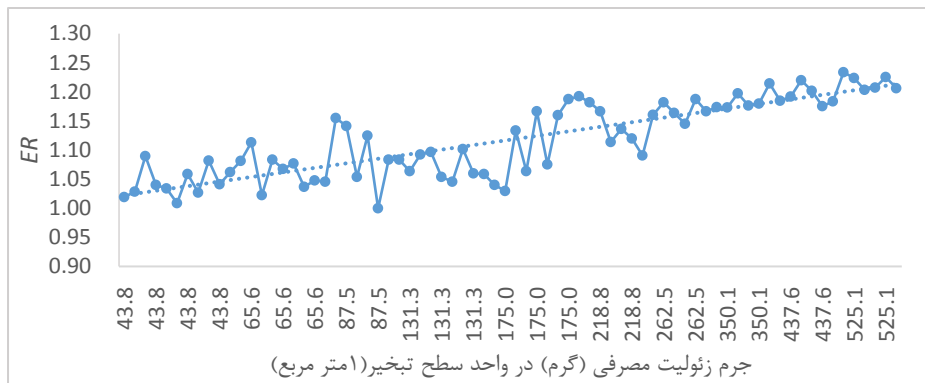
مطابق نتایج بدست آمده از آنجا که  $ER$  کمتر از یک به مفهوم کمتر بودن مقدار تبخیر از تشت مورد آزمایش نسبت به آزمایش تشت سینوپتیک بوده و این امر به مفهوم اثر کاهنده زئولیت بر مقدار تبخیر بوده که از نظر فیزیکی کاهش مقدار تبخیر قابل قبول نمی‌باشد، لذا مقادیر کمتر از عدد یک به‌دست‌آمده برای مقدار  $ER$  تحت عنوان خطای انسانی در اندازه‌گیری در نظر گرفته شده و از برداشت‌ها حذف شدند. همچنین با توجه به اینکه اکثر برداشت‌ها دال بر افزایش تبخیر ناشی از کاربرد زئولیت در محدوده بین ۱۰ تا ۲۵ درصد بوده، افزایش دو برابری و بیشتر در مقدار تبخیر که دور از انتظار می‌باشد، نیز به عنوان داده‌های پرت حذف شد. بنابراین با صرفنظر کردن از مقادیر حداکثر و حداقل بدست آمده برای  $ER$  می‌توان گفت که مقادیر  $ER$  از ۱ تا ۱/۲۲ تغییر کرده است. بنابراین می‌توان گفت که در صورت استفاده از مقادیر متفاوتی از جرم زئولیت از ۵۰ گرم تا ۶۰۰ گرم (۴۳/۸) گرم تا ۵۲۵/۱ گرم زئولیت در یک مترمربع سطح تبخیر، میانگین افزایش در مقدار تبخیر از ۴ تا ۲۲ درصد نسبت به شرایط عدم استفاده از آن افزایش داشته است.

در (شکل ۵) تغییرات  $ER$  نسبت به جرم زئولیت به‌کاررفته در واحد سطح نشان داده شده است. همان‌گونه که در (شکل ۵) نشان داده شده است مقدار تبخیر با افزایش مقدار زئولیت مصرفی در واحد سطح (۱ متر مربع) افزایش می‌یابد. مطابق (شکل ۵) اگرچه در محدوده مقدار استفاده شده از زئولیت از ۴۳/۸ تا ۱۳۱/۳ گرم در مترمربع، تغییرات  $ER$  خیلی مشهود نیست اما در جرم‌های استفاده‌شده در واحد سطح در مقادیر بالای ۱۳۱/۳ گرم در مترمربع، تأثیر وزن زئولیت به‌کاررفته بر مقدار افزایش تبخیر به صورت قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر شده است به طوری که در جرم‌های واحد سطح ۱۷۵ و ۲۱۸/۸ گرم در مترمربع، متوسط افزایش تبخیر معادل با ۱۶ درصد بوده است. در خصوص علت عدم افزایش مقدار تبخیر در محدوده ۴۳/۸ تا ۱۳۱/۳ گرم در مترمربع می‌توان گفت که تبخیر عادی از تشت سینوپتیک ناشی از وجود گرمای حرارتی خورشید است که در واحد سطح اثر نموده و باعث تبخیر از سطح آزاد آب می‌شود. در حالی که گرمای رهاشده از زئولیت که در بهترین حالت برابر با گرمای ذخیره شده در زئولیت در طی روز گذشته می‌باشد، بسیار محدود بوده و فقط در فضای مجموعه آزمایشی ایجاد شده این گرما بر تبخیر از سطح آزاد مؤثر است. لذا با توجه به حجم مشخص آب موجود در تشت آزمایش، می‌توان گفت که گرمای ذخیره شده در محدوده ۴۳/۸ تا ۱۳۱/۳ گرم در مترمربع نتوانسته است اثری بر افزایش درجه حرارت آب موجود در تشت داشته و در نتیجه افزایش تبخیر مشاهده نشده است. بدیهی است برای همان مجموعه



منظور افزایش بیشتر در مقدار تبخیر نسبت به شرایط عادی، استفاده بیشتر از ژئولیت مفید خواهد بود لیکن با توجه به هزینه تهیه ژئولیت از یک طرف و هزینه خرید اراضی به منظور احداث حوضچه تبخیر، عامل تعیین کننده مقدار ژئولیت، عامل اقتصادی خواهد بود.

آزمایشگاهی، در شرایطی که جرم واحد سطح ژئولیت استفاده شده، از مقدار ۲۱۸/۸ گرم در مترمربع نیز بیشتر شود، می توان انتظار داشت که گرمای حاصله بیشتر و در نتیجه افزایش بیشتری در مقدار تبخیر مشاهده شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که به



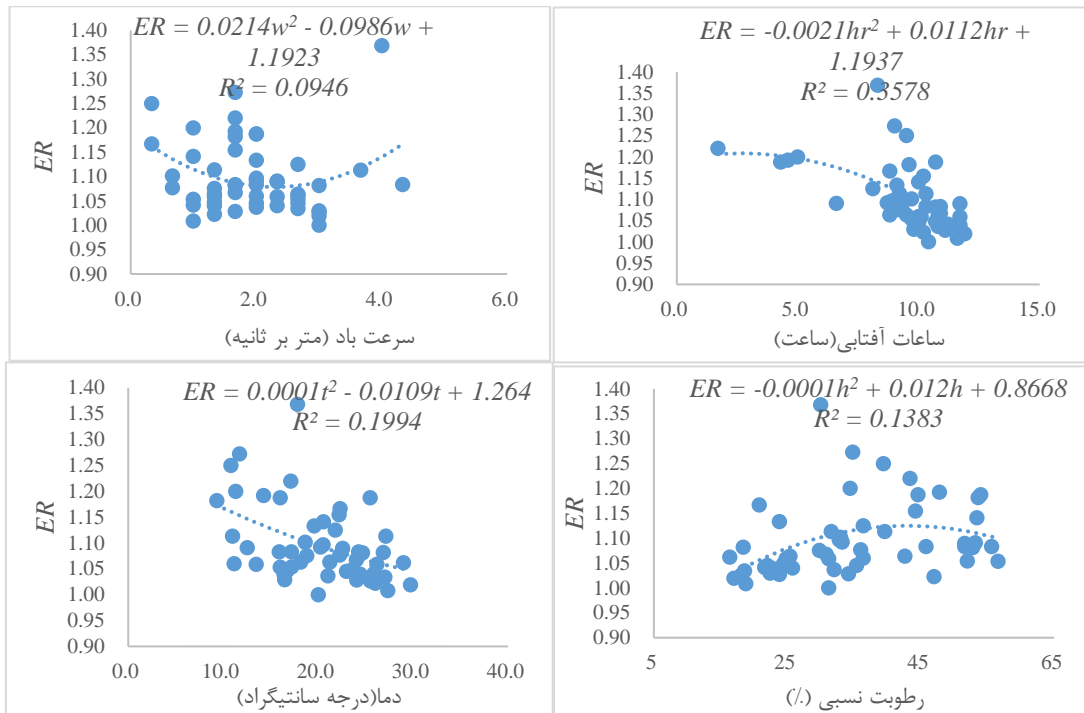
شکل ۵- تغییرات ER در برابر جرم ژئولیت مصرفی در یک مترمربع سطح تبخیر

همبستگی بین مقادیر ER و باد در سطح ۵ درصد معنی دار نمی باشد.

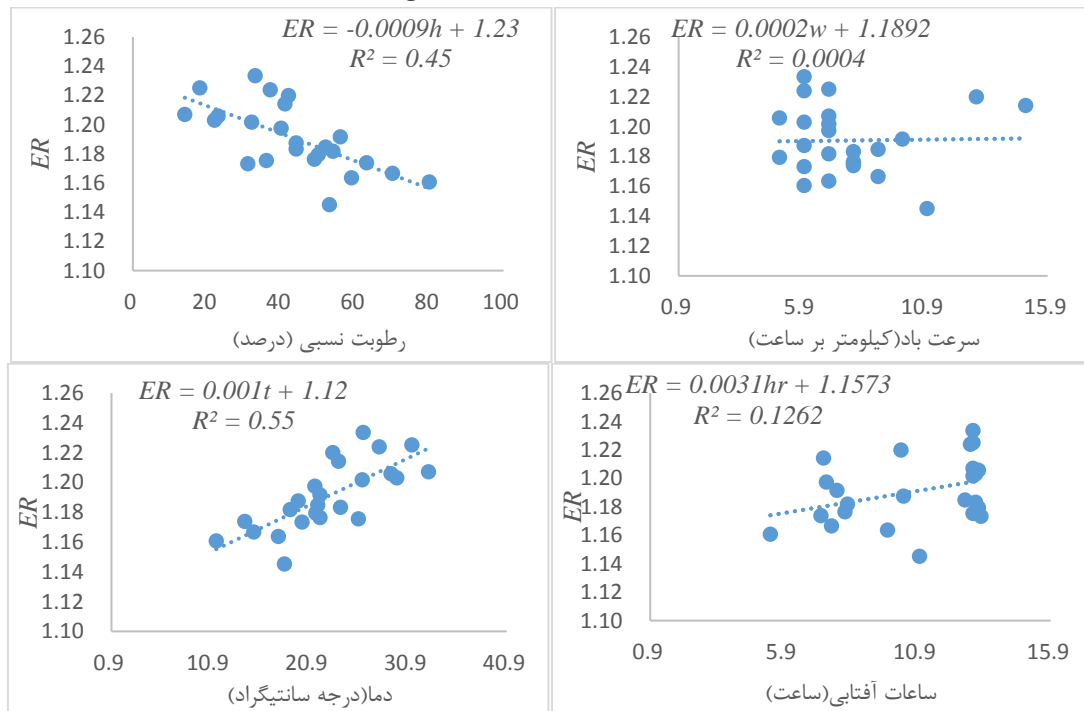
در (شکل ۷) تغییر مقادیر ER در برابر تغییرات متغیرهای مختلف هواشناسی در بازه زمانی ۱۱ اردیبهشت تا ۱۳ تیر سال ۱۳۹۷ نمایش داده شده است. با برازش توابع خطی بین ER و متغیرهای هواشناسی و تعیین ضرایب همبستگی در (شکل ۷) ملاحظه می شود که در این بازه زمانی بیشترین تأثیر را متغیر دما ( $R = 0.74$ ) و کمترین تأثیر را سرعت باد ( $R = 0.06$ ) بر افزایش میزان ER داشته اند. در حالی که در داده های مربوط به سال ۱۳۹۶ مقدار تأثیر دما ( $R = 0.43$ ) بوده است و دلیل آن را می توان به تغییرات دما بین این ماه ها نسبت داد به طوری که در بازه سال ۱۳۹۶ دمای میانگین در بازه ی آزمایش ۲۰ درجه سانتی گراد و در بازه ی مربوط به سال ۱۳۹۷ دمای میانگین ۲۲/۸ بوده است که بیانگر تأثیر بیشتر دما در سال ۱۳۹۷ می باشد. همچنین مقدار میانگین رطوبت نسبی در سال ۱۳۹۶ معادل با  $\%35$  ( $R = 0.37$ ) و در سال ۱۳۹۷ معادل با  $\%24$  ( $R = 0.67$ ) بوده که مقدار تأثیر کمبود رطوبت را بر مقدار افزایش تبخیر نشان می دهد. در هر دو بازه، باد تقریباً بر فرآیند تبخیر بی اثر بوده و اثری بر مقادیر ER نداشته است. در بازه سال ۱۳۹۶ تأثیر ساعات آفتابی زیاد بوده و ( $R = 0.6$ ) و در سال ۱۳۹۷ معادل با ( $R = 0.35$ ) می باشد که دلیل آن ورود به نیمه دوم سال در سال ۱۳۹۶ و کمتر بودن ساعات آفتابی و قرارگیری در نیمه اول سال در بازه دوم آزمایش ها و طولانی تر بودن ساعات آفتابی در این بازه است و موجب شده است که نسبت به متغیرهای دیگر تأثیر بیشتری در افزایش تبخیر داشته باشد.

در (شکل ۶) تغییر مقادیر ER در برابر تغییرات متغیرهای مختلف هواشناسی در بازه زمانی ۱ شهریورماه تا ۲ آذر سال ۱۳۹۶ نمایش داده شده است. این متغیرها شامل دمای هوای میانگین روزانه (درجه سانتی گراد)، رطوبت نسبی (/)، ساعات آفتابی (ساعت) و سرعت متوسط باد (متر بر ثانیه) می باشد. با برازش توابع پلی نومیال بین ER و متغیرهای هواشناسی و تعیین ضرایب همبستگی در (شکل ۷) ملاحظه می شود که بیشترین تأثیر را متغیر ساعات آفتابی ( $R = 0.6$ ) و کمترین تأثیر را سرعت باد ( $R = 0.3$ ) بر افزایش میزان ER داشته اند. به طور کلی با توجه به شیب منفی نمودارها (به جز رطوبت نسبی با شیب مثبت) به نظر می رسد که تأثیر افزایش تبخیر در روزهایی که شرایط برای تبخیر طبیعی نامساعد بوده است (یعنی زمانی که دمای هوا کمتر شده، یا ساعات آفتابی کمتر بوده، و یا رطوبت نسبی بالا بوده) مشهودتر است و در واقع در زمانی که به دلیل شرایط محیطی تبخیر طبیعی کاهش یافته است، استفاده از ژئولیت به نحو مؤثرتری بر مقدار تبخیر اثرگذار بوده است.

همچنین معنی دار بودن میزان همبستگی مقادیر ER در برابر متغیرهای دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد، با برازش توابع چند جمله ای با استفاده از نرم افزار SPSS مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که همبستگی مقادیر ER با مقادیر متغیرهای دما و ساعات آفتابی در سطح کمتر از ۱ درصد معنی دار بوده در حالی که مقدار همبستگی آن با متغیر رطوبت نسبی در سطح ۲ درصد معنی دار است. مقدار همبستگی ER با باد در سطح ۹ درصد معنی دار است و در صورتی که سطح معنی داری ۵ درصد در نظر گرفته شود می توان نتیجه گرفت که



شکل ۶- تغییرات ER در برابر تغییرات متغیرهای هواشناسی (شهریور تا آذر ۱۳۹۶)



شکل ۷- تغییرات ER در برابر تغییرات متغیرهای هواشناسی (اردیبهشت تا تیر ۱۳۹۷)

کیفیت یکسان استفاده شده بود، به کار بردن ۲۶۲/۵ گرم در مترمربع زئولیت منجر به افزایش ۱۷ درصدی مقدار تبخیر گردید. شوری‌های انتخاب شده معادل با شوری آب دریا (۳/۵٪)، دو برابر شوری آب دریا (۰/۷٪) و بسیار شور (۱۲/۵٪) می‌باشد. در جدول (۳) تعدادی از مشخصه‌های آماری مقادیر ER آورده شده است. در تیمارهای متفاوت آزمایش، مقادیر کاهش ER به ترتیب معادل

همان‌گونه که قبلاً گفته شد به منظور بررسی تأثیر شوری بر افزایش تبخیر در صورت استفاده از ماده زئولیت، در بازه‌ی تیر تا مهر ۱۳۹۷ (به مدت ۶۵ روز)، آزمایش‌های دیگری انجام شد. جدول (۲) نتایج مربوط به اثر سه غلظت ۳/۵٪، ۷٪ و ۱۲/۵٪ بر افزایش تبخیر را درازای استفاده از ۲۶۲/۵ گرم در مترمربع زئولیت نشان می‌دهد. در آزمایش‌هایی که در دو تشت از آب مزرعه با

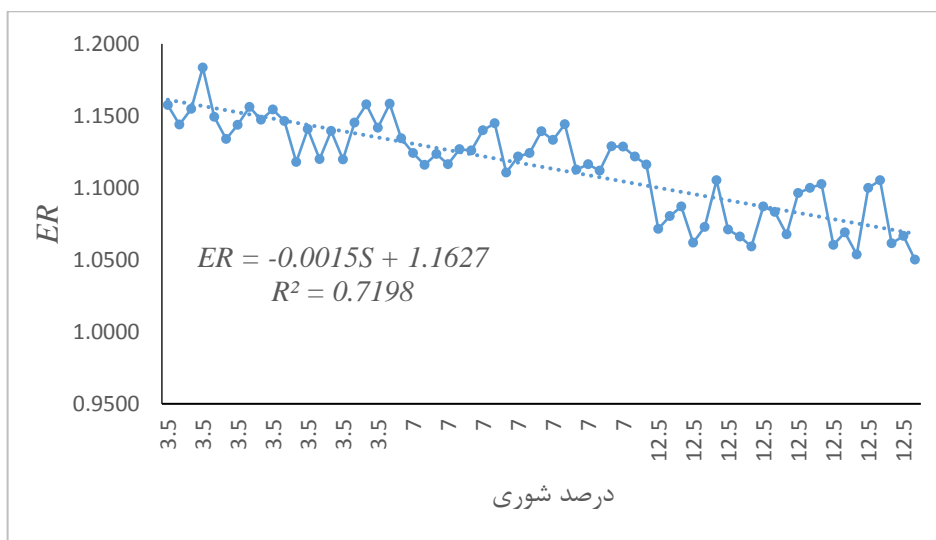
این تحقیق با نتایج حاصل از روش‌های پیشین، در (جدول ۳) اطلاعات مربوط به هر کدام از روش‌ها، مبانی فیزیکی آن‌ها، مقدار بهبود عملکرد و همچنین برخی ملاحظات ارائه شده است.

جدول ۲- تأثیر کیفیت آب بر مقدار تبخیر (توصیفی)

تیمارهای آزمایش				متغیر
۱۲//۵	%۷	۳//۵	آب مزرعه	شوری (غلظت برحسب درصد)
۱/۰۸	۱/۱۳	۱/۱۵	۱/۱۷	میانگین ER
۰/۰۱۷	۰/۰۱	۰/۰۱۵	۰/۰۱۴	انحراف معیار
۰/۰۱۶	۰/۰۰۹	۰/۰۱۳	۰/۰۱۲	ضریب تغییرات

با ۲٪، ۴٪ و ۹٪ می‌باشد. همان‌گونه که در این جدول مشهود است مقدار افزایش تبخیر تحت تأثیر شوری قرار دارد و با افزایش درصد شوری کاهش می‌یابد. همچنین در شکل (۸)، تأثیر مقدار شوری بر مقدار تبخیر نمایش داده شده است. در واقع آزمایش‌ها با مقادیر ۳۵۰۰۰ و ۷۰۰۰۰ و ۱۲۵۰۰۰ ppm شوری صورت گرفته و تأثیر آن بر کاهش مقادیر تبخیر مورد بررسی قرار گرفته است. با برآزش تابع خطی مناسب بر آن (ضریب همبستگی معادل با ۰/۸۵) رابطه‌ای خطی بین افزایش درصد شوری و مقدار کاهش ER ارائه شده است.

به منظور مقایسه میان نتایج حاصل از روش ارائه‌شده در



شکل ۸- تغییرات ER در برابر تغییرات درصد شوری (تیر تا مهر ۱۳۹۷)

شوند، عدم قطعیت‌های حاصله مانع از نتیجه‌گیری در خصوص ارائه مناسب‌ترین روش برای افزایش تبخیر از میان روش‌های ارائه شده در جدول (۳) است. بنابراین بدون توجه به نکته بالا و با توجه به (جدول ۳)، مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار افزایش تبخیر مربوط به روش WAIV و معادل با ۱۳ برابر تبخیر در شرایط عادی، و کمترین مقدار افزایش تبخیر معادل با ۲۲ درصد و مربوط به روش ارائه‌شده در این تحقیق می‌باشد. در نتیجه در صورتی که بتوان با تغییر عوامل مؤثر بر افزایش تبخیر از جمله افزایش جرم ماده ژئولیت، تعداد هواده‌ها و یا به طور کلی ایجاد تغییر عمده و اساسی در مکانیزم نحوه جایابی و استفاده مؤثر از ماده ژئولیت، مقدار تبخیر را افزایش و به مقادیر روش‌های دیگر نزدیک‌تر نمود، در این حالت بررسی عوامل هزینه‌ای و نیز اثرات زیست محیطی این روش و مقایسه آن با دیگر روش‌ها، دارای مقبولیت بیشتری خواهد بود.

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود به جز روش اسپری قطرات آب و گیاهان شورپسند (ردیف‌های ۳ و ۴)، بقیه روش‌ها در مقیاس‌های کوچک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از طرف دیگر همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد انتخاب روش مناسب به طور عام و انتخاب مقدار جرم ماده ژئولیت به طور خاص که مبنای روش ارائه‌شده در این تحقیق است، بستگی به بررسی‌های دقیق اقتصادی و منافع حاصله از یک طرف، و اثرات زیست محیطی پیاده‌سازی این روش‌ها در ابعاد واقعی از طرف دیگر دارد. بنابراین در خصوص اخذ نتیجه به منظور انتخاب یک روش مناسب از میان کلیه روش‌های ارائه‌شده از جمله روش پیشنهادی در این تحقیق، لازم به تأکید است که به دلیل عدم ارائه نکات اقتصادی برای روش‌های معرفی شده توسط محققین مختلف که در جدول (۳) ارائه شده‌اند و نیز اختلاف قیمت زمین در نقاط مختلف (در سطح ملی و بین‌المللی) که مطابق روش ارائه شده در این تحقیق می‌باید برای احداث حوضچه‌های تبخیری اختصاص یافته و خریداری

جدول ۳- مقایسه روش‌های افزایش مقدار تبخیر از حوضچه‌های تبخیری

شماره	روش / محقق	اساس فیزیکی	میزان بهبود عملکرد	توضیحات
۱	WAIIV Gilron et al., (2003)	آب از کف یک مخزن تعبیه شده در ارتفاع بالا بر روی یک پارچه به صورت قطرات عبور داده شده و به تدریج از سطح پارچه تبخیر می‌شود	افزایش تبخیر به میزان ۱۳ برابر	حداکثر TDS مورد آزمایش معادل با ۱۸۰۰۰ ppm بوده است.
۲	باله‌های شناور (آلومینیومی) Guitierrez, and Roman, (1993)	"موج شکن لایه مرزی" سطح در معرض تبخیر را افزایش می‌دهد	۲۴٪ افزایش تبخیر (در محیط‌های بادخیز می‌تواند تأثیر بیشتری داشته باشد)	باله‌ها باید عمود بر جهت باد باشد اطلاعاتی در مقیاس بزرگ موجود نیست. تأثیرات امواج و مقادیر مختلف شوری مطالعه نشده است.
۳	گیاهان شور پسند Negri et al., (2003)	گیاهان زهاب را جذب کرده و فیلتر می‌نمایند	۳۰٪ افزایش تبخیر در TDS حدود ۹۰۰۰۰ mg/l و در مقادیر کمتر TDS افزایش بیشتر تبخیر	مطالعه در حوضچه‌ای با ظرفیت ورودی ۳/۲ مترمکعب در روز انجام شده و گیاهان برای چرای دام مناسب تشخیص داده شدند.
۴	اسپری قطرات آب در روز Gault (1986), and Lorenzini, (2006),	اسپری قطرات آب به هوا که در این روش در نتیجه سطح تماس بیشتر آب‌وهوا تبخیر افزایش پیدا می‌کند.	میزان کل افزایش تبخیر معادل با ۳۰ تا ۳۵٪- نتایج نشان داد که ۲ تا ۱۵٪ مقدار آبی که از یک نازل اسپری می‌شود تبخیر می‌شود.	آزمایش‌ها با استفاده از آب شهری بر اساس عملکرد ۲۴ نازل در حوضچه‌ای با سطح ۱۷۹۰ مترمربع انجام شد.
۵	کلکتور صفحه‌ای خورشیدی O'reilly, (2009)	عبور زه‌آب از روی سطح کلکتور و گرم شدن آن	متوسط افزایش تبخیر معادل با ۵۲٪	در مقیاس واقعی داده وجود ندارد- تأثیر شوری و شرایط آب و هوایی بررسی شده است
۶	استفاده از حباب هوا Gawlik et al., (2015)	هوای گرم شده و یا گرم نشده از طریق یک شبکه لوله مستغرق در داخل حوضچه تبخیر توزیع می‌شود	-	فقط ایده مطرح شده و نتایج در دست نیست
۷	استفاده از انرژی خورشیدی در تحقیق اخیر	انرژی خورشیدی توسط ژئولیت ذخیره شده و سپس انرژی ذخیره شده وارد مخزن می‌گردد.	افزایش تبخیر معادل با ۲۲ درصد درازای استفاده از ۵۲۵/۱ گرم ژئولیت در یک مترمربع سطح تبخیر	با آب صاف و در مقیاس واقعی انجام نشده است.
۸	استفاده از انرژی خورشیدی در تحقیق اخیر	انرژی خورشیدی توسط ژئولیت ذخیره شده و سپس انرژی ذخیره شده وارد مخزن می‌گردد.	افزایش تبخیر از ۸ الی ۱۵ درصد بسته به غلظت شوری از سه و نیم الی دوازده و نیم درصد در صورت استفاده از ۱۷۵ گرم ژئولیت در یک مترمربع سطح تبخیر	با آب شور ولی در مقیاس واقعی انجام نشده است.

### نتیجه‌گیری

استفاده شده از ماده ژئولیت در این تحقیق، ۲۲ درصد مشاهده شد. همچنین به طور کلی تأثیر متغیرهای هواشناسی بر تغییرات پتانسیل تبخیر چشمگیر نبوده است اما بیشترین مقدار تأثیر در این تحقیق در شرایطی است که روند طبیعی تبخیر به دلیل کاهش دما، و یا کاهش ساعات آفتابی کمتر بوده و در نتیجه مقدار *ER* بیشتری مشاهده شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که صرف نظر از مقدار افزایش تبخیر در مقایسه با روش‌های دیگر، استفاده از ماده ژئولیت در شرایط نامناسب جوی برای تبخیر می‌تواند به افزایش تبخیر کمک نماید. همچنین مطالعه در خصوص تأثیر مقادیر متفاوت شوری بر مقدار تبخیر در صورت استفاده از ماده ژئولیت نشان داد که با افزایش مقدار شوری آب، مقدار تبخیر نسبت به ژئولیت در آب معمولی کمتر می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، رابطه‌ای خطی نیز بین درصد شوری و مقادیر *ER* برآزش داده شد.

در این تحقیق، از ماده ژئولیت برای افزایش مقدار تبخیر به منظور کاهش مساحت اختصاص یافته برای احداث حوضچه‌های تبخیری استفاده به عمل آمد. آزمایش‌های مربوط به افزایش پتانسیل تبخیر با استفاده از ژئولیت مصنوعی 13x در دو بازه زمانی شهریورماه تا آذرماه سال ۱۳۹۶ و اردیبهشت‌ماه تا تیرماه سال ۱۳۹۷ صورت پذیرفت. همچنین تأثیر مقدار ژئولیت مورد استفاده و تأثیر متغیرهای هواشناسی بر افزایش راندمان تبخیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که در صورت استفاده از ماده ژئولیت به مقدار ۴۳/۸ تا ۱۳۱/۳ گرم در مترمربع، افزایشی در مقدار تبخیر مشاهده نشده در صورتی که با افزایش مقدار ژئولیت مصرفی به بیش از ۱۷۵ گرم در مترمربع، مقدار تبخیر برحسب مقدار ژئولیت استفاده شده، افزایش می‌یابد. به طور کلی میانگین افزایش تبخیر با استفاده از حداکثر جرم

### سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از سازمان هواشناسی البرز به جهت همکاری در انجام این پژوهش و در اختیار گذاشتن اطلاعات مورد نیاز و همچنین فراهم نمودن فضای انجام آزمایش‌ها در ایستگاه سینوپتیک کرج تشکر نمایند.

در پایان لازم به گفتن است که به دلیل تفاوت کیفیت آب خروجی از شبکه‌های آبیاری و زهکشی با کیفیت آب استفاده شده در این تحقیق، نتایج ارائه شده در این تحقیق نمی‌تواند به طور مستقیم مورد استفاده قرار گیرد و لازم است مطالعات مشابه این تحقیق به عمل آمده و توصیه‌های لازم از نقطه نظر مقدار زئولیت برای افزایش تبخیر و تحلیل اقتصادی ارائه نمود.

### REFERENCES

- Ahmed, M., Shayya, W. H.; Hoey, D., and Al-Handaly, J. (2002). Brine disposal from inland desalination plants. *Water International*, 27, 194-201.
- Baoqi, H., Hongyuan, Y., Dequanand, Y., and Guoxi, L. (1994). Utilization of natural zeolites for solar energy storage. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 9404.
- Barthakur, N.N. and Arnold, N.P. (1995). Evaporation rate enhancement of water with air ions from a corona discharge. *International Journal of Biometeorology*, 39, 29-33.
- Bloch, M.R., Farkas, L., and Spiegler, K.S. (1951). Solar evaporation of salt brines. *Industrial and Engineering Chemistry*, 43, 1544-1553.
- Gault, T. (1986). Evaporation enhancement through the use of sprays. *Plant/Operations Progress*, 5, 23-26.
- Gawlik, K., Reitze, E., Arias, D. A. and Hargett, W. (2015). Techniques for increasing the evaporation rate in evaporation ponds. *United States Patent, Appl. No.:* 20150353378.
- Gilron, J., Folkman, Y., Savliev, R., Waisman, M. and Kedem, O. (2003). WAIV-wind aided intensified evaporation for reduction of desalination brine volume. *Desalination*, 158, 205-214.
- Guerra, J. M. (1978). Adsorption solar heating and storage system, *United States Patent, Appl. No.:* 900,703.
- Guitierrez, O. and Roman, R. (1993). Effect of wetted floating fins on water atmosphere heat exchange. *Journal of Energy Engineering*, 119, 32-42.
- Hoque, S., Alexandr, T., Gurian, P. L. (2010). Innovative technologies increase evaporation pond efficiency, *IDA Journal of Desalination and Water Reuse*, 2 (1), 72-78.
- Kingdon, K. H. (1963). Enhancement of the evaporation of water by foreign molecules adsorbed on the surface. *Physical Chemistry*. 67, 2732-2737.
- Lorenzini, G. (2006). Water Droplet Dynamics and Evaporation in an irrigation spray. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 49, 545-549.
- Negri, M. C., Hinchman, R. R., and Settle, T. (2003). Salt tolerant plants to concentrate saline waste streams. *Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants* (Chapter 24). New York: Wiley.
- O'reilly, D. (2009). *Evaporation Enhancement from evaporation ponds using collector plate units*. MSc dissertation, RMIT University, Melbourne, Australia.
- Singh J. and Christen, E. W. (2000). On-farm and community-scale salt disposal basins on the Riverine Plain: Minimising the cost of basins: Siting, design and construction factors. *CRC Report 00/5, CSIRO Land and Water Technical Report 12/99, CRC for Catchment Hydrology*, Melbourne.
- Shumilin, E., Grajeda-Munoz, M., Silverberg, N., and Sapozhnikov, D. (2002). Observations of Trace Element Hypersaline Geochemistry in Surficial Deposits of Evaporation Ponds of Exportadora de Sal, Guerrero Negro, Baja California Sur, Mexico. *Journal of Marine Chemistry*, 79, 133-153.
- Yu, N., Wang, R. Z. and Wang, L. W. (2013). Sorption thermal storage for solar energy. *Progress in Energy and Combustion Science. Elsevier*. 39, 489-514.