



طراحی حوضچه تبخیری در مجاورت استخر خورشیدی تحت شرایط آب و

هوایی ایران

عباسعلی رضاپور^۱، محمدرضا جعفرزاده^۲

^۱ هیأت علمی گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی بیرجند، Abbas.rezapoor@yahoo.com

^۲ استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، jafarzad@ferdowsi.um.ac.ir

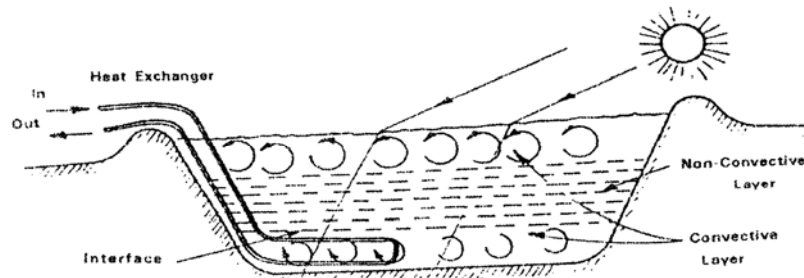
چکیده

در مناطقی که با کمبود آب شور روبرو هستیم و میزان تبخیر خالص زیاد است، ایده الحاق حوضچه تبخیری به استخر خورشیدی می‌تواند مفید باشد. به منظور بررسی تأثیر شرایط محیطی و آب و هوایی، حوضچه‌های تبخیری در شرایط مختلف آب و هوایی ایران در مجاورت استخر خورشیدی فرضی طراحی گردیدند. برای بدست آوردن سطح حوضچه از یک مدل ریاضی که بر مبنای تعادل جرمی و حجمی نوشته شد استفاده گردید. بدین ترتیب، در مناطقی که دارای نرخ بالای تبخیر هستند، سطح کوچکی برای حوضچه تبخیری بدست می‌آید و چنانچه طراحی تحت شرایط آب و هوایی تابستان صورت گیرد کمترین سطح ممکن را در طول سال خواهیم داشت. هنگامی که از آب شور جهت شستشوی سطحی استخر خورشیدی استفاده گردد، سطح حوضچه تبخیری به مراتب بزرگتر از زمانی خواهد بود که از آب شیرین برای شستشوی سطحی استفاده کنیم. همچنین حجم آب لازم برای شستشوی سطحی استخر در تابستان بیشتر از فصل‌های دیگر می‌باشد.

واژه های کلیدی: استخر خورشیدی، حوضچه تبخیری، تبخیر خالص، محاسبه جرم نمک، آب شور

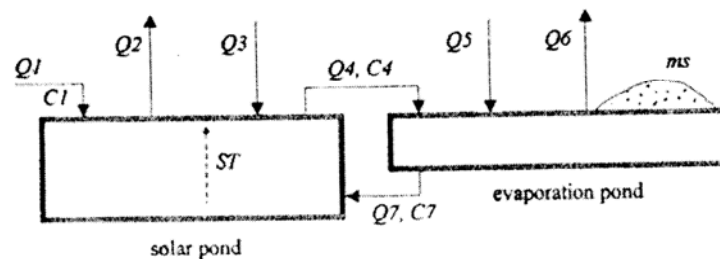
۱- مقدمه

استخرهای خورشیدی گرادیان نمک (Salinity Gradient Solar Pond) به عنوان منابع دریافت‌کننده و ذخیره‌کننده انرژی به شمار می‌روند. این استخرها حاوی سیال آب نمک درسه لایه با چگالی‌های مختلف می‌باشند. شکل (۱) شماتیکی از یک استخر خورشیدی را نشان می‌دهد. لایه بالایی شامل سیالی سبک با چگالی ثابت است و ضخامتی در حدود ۰/۳ متر دارد. در لایه میانی چگالی سیال متغیر است به طوری که با افزایش عمق افزایش می‌یابد و ضخامت آن بین ۱ تا ۱/۵ متر است. لایه پایینی شامل سیالی سنگین با چگالی ثابت است و ضخامت آن حدود ۱ متر می‌باشد.



شکل (۱): طرح شماتیک یک استخر خورشیدی [۱]

در نتیجه افزایش چگالی سیال در لایه میانی، حرکت همرفتی ناشی از افزایش دما به دلیل تابش نورانی در این لایه متوقف می‌شود. در نتیجه دمای لایه پایینی در کف استخر به دلیل تجمع انرژی حرارتی به مقدار قابل ملاحظه‌ای اضافه می‌شود. پس از افزایش دمای سیال در لایه پایینی می‌توان (در یک سیکل بسته) آن را به خارج از استخر پمپاژ کرده و به طریق مناسبی مقداری از حرارت آن را گرفت و سیال را به لایه مربوطه بازگشت داد. به دلیل انتشار طبیعی نمک (دیفیوژن) از لایه پایینی از چگالی این لایه کاسته شده و بر میزان شوری و چگالی لایه بالایی افزوده می‌گردد. (میزان سالانه این انتشار نمک توسط تابور ۲۰ تا ۳۰ کیلوگرم تخمین زده شده است). این امر باعث به هم خوردن ساختار چگالی در استخر و تبدیل آن به یک حوضچه معمولی می‌شود. برای جلوگیری از این عمل بایستی لایه سطحی را با آب تمیز شستشو داد و برای جبران کمبود نمک لایه زیرین، آب نمک غلیظ به آن تزریق کرد. در مناطقی که شاهد تبخیر بالا و کمبود نمک هستیم می‌توان از یک حوضچه تبخیری که با استخر خورشیدی ترکیب می‌شود استفاده نمود. شکل (۲) شماتیکی از ترکیب حوضچه تبخیری و استخر خورشیدی را نشان می‌دهد.



شکل (۲): ترکیب یک استخر خورشیدی با حوضچه تبخیری [۲]

لایه سطحی استخر توسط آب تمیز یا با شوری ۳/۵ درصد به وسیله جریان حجمی Q_1 شستشو داده می‌شود و از طریق جریان Q_4 وارد حوضچه تبخیری می‌گردد. آب نمک رقیق در این حوضچه در اثر تابش خورشیدی و سایر عوامل جوی تبخیر شده و پس از تغلیظ توسط جریان Q_7 قابل تزریق به لایه زیرین استخر می‌گردد.

۲- محاسبه نسبت سطح حوضچه تبخیری به استخر خورشیدی

برای محاسبه سطح حوضچه تبخیری معادلات تعادل حجمی آب و تعادل وزنی نمک با فرضیات زیر نوشته شد [۲]

(الف) میزان جریان حجمی و دیگر پارامترها به عنوان مقادیر متوسط دوره زمانی مربوطه در نظر گرفته شدند.

(ب) برای سیستم مورد نظر فرض شد که شرایط جریان به صورت ماندگار باشد.

برای حفظ تعادل نمک در استخر خورشیدی می‌بایست کلیه نمکی که از لایه پایینی به سطح آن منتشر می‌شود با مقدار نمکی که از حوضچه تبخیری به آن تزریق می‌گردد برابر باشد بنابراین داریم:

$$C_7 \times Q_7 = A_{SP} \times ST \quad (۱)$$

برای حفظ تعادل حجمی در استخر خورشیدی در دوره زمانی خاص برقراری رابطه زیر الزامی است (شکل ۲)

$$Q_4 = Q_1 + (Q_3 - Q_2) + Q_7 \quad (۲)$$

از طرفی داریم:

$$Q_2 = A_{SP} \times E_{SP} \quad (۳)$$

$$Q_3 = A_{SP} \times R \quad (۴)$$

که در آنجا R عبارتست از میزان بارندگی بر واحد سطح استخر و E_{SP} میزان تبخیر از واحد سطح استخر در دوره مورد نظر می‌باشد. بنابراین:

$$Q_3 - Q_2 = A_{SP}(R - E_{SP}) \quad (۵)$$

با جایگذاری روابط (۱) و (۵) در رابطه تعادل حجمی (۲) داریم:

$$Q_4 = Q_1 + A_{SP}(R - E_{SP}) + \frac{A_{SP} \times (ST)}{C_7} \quad (۶)$$

معادله تعادل جرمی نمک در استخر خورشیدی را به شکل زیر می‌توان نوشت:

$$Q_1 \cdot C_1 + Q_7 \cdot C_7 = Q_4 \cdot C_4 \quad (۷)$$

با قرار دادن روابط (۱) و (۶) در رابطه (۷) و مرتب کردن معادله بر حسب Q_1 می‌توان نوشت:

$$Q_1 = A_{SP} \left[(ST) \left(\frac{1}{C_4} - \frac{1}{C_7} \right) + (E_{SP} - R) \right] \left(\frac{C_4}{C_4 - C_1} \right) \quad (۸)$$

به عبارتی از رابطه فوق میزان حجم آب جبران‌کننده برای شستشوی سطحی استخر در یک دوره خاص بدست می‌آید. اکنون روابط و معادلات حاکم بر حوضچه تبخیری را بررسی می‌کنیم: رابطه تعادل حجمی در حوضچه تبخیری مطابق زیر نوشته می‌شود (شکل ۲):

$$Q_4 = (Q_6 - Q_5) + Q_7 \quad (۹)$$

از رابطه بالا داریم:

$$Q_4 = A_{EP}(E_{EP} - R) + Q_7 \quad (۱۰)$$

$$A_{EP} = \frac{(Q_4 - Q_7)}{(E_{EP} - R)} \quad (11)$$

برای به دست آوردن سطح مورد نیاز حوضچه تبخیری می‌بایست رابطه (۱۱) را به صورت تابعی از داده‌های معلوم یعنی سطح استخر خورشیدی (A_{SP}) و غلظت‌های مشخص ورودی و خروجی به استخر بنویسیم:

اگر از روابط (۶) و (۱) مقادیر Q_4 و Q_7 را در رابطه (۱۰) قرار دهیم:

$$A_{EP} = \frac{Q_1 + A_{SP}(R - E_{SP})}{(E_{EP} - R)} \quad (12)$$

در نهایت با قرار دادن رابطه (۸) در رابطه (۱۲) داریم:

$$A_{EP} = \frac{A_{SP} \left\{ (ST) \left(\frac{1}{C_4} - \frac{1}{C_7} \right) \left(\frac{C_4}{C_4 - C_1} \right) + (E_{SP} - R) \left(\frac{C_1}{C_4 - C_1} \right) \right\}}{(E_{EP} - R)} \quad (13)$$

۲-۱ محاسبه تبخیر از سطح آب شور

برای محاسبه تبخیر از سطح آب شور از فرمول دالتون استفاده شد.

$$E_{Sat} = f(V_w) \{ \beta(S) \cdot P_{Sat}(T_{Sat}) - \psi [P_{Sat}(T_a)] \} \quad (14)$$

در فرمول (۱۴) T_{Sat} دمای آب سطحی برای استخر خورشیدی و آب حوضچه تبخیری است. $\beta(S)$ اصطلاحاً ضریب فعالیت آب برای تبخیر است که با افزایش درصد شوری S ، کاهش می‌یابد. برای β مقادیر مختلفی را با توجه به محلول‌های متفاوت در شوری‌های مختلف می‌توان محاسبه و تخمین زد. می‌توان $\beta(S)$ را از فرمول (۱۵) بدین شکل بدست آورد که ابتدا با توجه به نوع نمک از جدول (۱) ضرایب a و b را استخراج کرد سپس با توجه به شوری آب نمک (S) مقدار β را به دست آورد.

$$\beta(S) = 1 + a(S) + b \cdot (S^2) \quad (15)$$

جدول (۱): مقادیر ضرایب a و b [۲]

نوع نمک	a	b
MgCl _۲	-۰/۰۰۲۰۶	-۰/۰۰۰۴۴
NaCl	-۰/۰۰۰۴۰۷	-۰/۰۰۰۱۹
KCl	-۰/۰۰۳۶۲	-۰/۰۰۰۰۹۴
NaBr	-۰/۰۰۳۶۶	-۰/۰۰۰۱۳
CaCl _۲	-۰/۰۰۳۴۷	-۰/۰۰۰۲۸
Na _۲ CO _۳	-۰/۰۰۳۳۲	-۰/۰۰۰۰۹۲
Na _۲ SO _۴	-۰/۰۰۳۰۹	-۰/۰۰۰۰۳۹
MgSO _۴	-۰/۰۰۰۹۴	-۰/۰۰۰۰۷
K _۲ SO _۴	-۰/۰۰۲۲۹	-۰/۰۰۰۰۲۶۵

۳- خصوصیات آب و هوایی شهرهای مورد بررسی در ایران

به منظور تأثیر شرایط جوی بر طراحی حوضچه تبخیری الحاق شده به استخر خورشیدی شهرهای مشهد، یزد، رشت، اهواز، بندرعباس و زاهدان با شرایط آب و هوایی مختلف در نظر گرفته شد. در ادامه به خصوصیات آب و هوایی این شهرها به طور خلاصه پرداخته می‌شود.

الف) مشهد: مشهد دارای آب و هوای متغیر است که دارای تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد و مرطوب می‌باشد. بیشترین درجه حرارت در تابستان حدود ۳۵ درجه بالای صفر و کمترین دما در زمستان و ۱۵ درجه زیر صفر می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه در مشهد ۲۵۳ میلی‌متر می‌باشد.

ب) یزد: یزد دارای آب و هوایی گرم و خشک بیابانی است که در آن نوسانات درجه حرارت در زمستان و تابستان و حتی در شب و روز بسیار زیاد است. بیشترین درجه حرارت در تابستان ۴۵ درجه و کمترین دما در زمستان ۳ درجه زیر صفر می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه در یزد ۶۰ میلی‌متر می‌باشد.

ج) رشت: رشت دارای آب و هوای معتدل و مرطوب است. بیشترین درجه حرارت در تابستان ۳۷ درجه و کمترین دما در زمستان ۵ درجه زیر صفر می‌باشد. میانگین سالانه بارندگی در رشت ۱۳۶۰ میلی‌متر می‌باشد که در نتیجه آن میزان تبخیر خالص (تبخیر - بارندگی) در ۹ ماه از سال مقداری منفی است.

د) اهواز: میزان تبخیر در شهرستان اهواز در ماه‌های مختلف به مراتب بیشتر از مشهد می‌باشد. تبخیر سالانه برای اهواز برابر ۲/۸۱ متر و برای مشهد ۱/۳۶ متر است. اگر میزان بارندگی و تبخیر را در اهواز بایزد مقایسه کنیم مشاهده می‌گردد که مقادیر تبخیر در اهواز مقداری بیشتر از یزد است. مقدار بارندگی در ماه‌های آوریل، می، ژوئن، ژولای و آگوست تقریباً یکسان و در باقی ماه‌ها بارندگی اهواز نسبتاً بیشتر است.

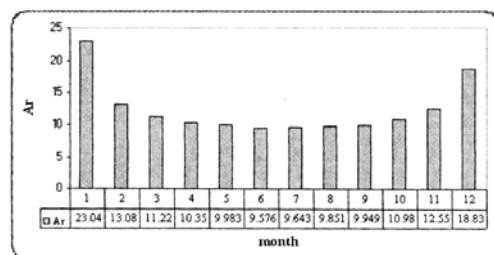
ه) زاهدان: زاهدان دارای آب و هوای گرم و خشک بیابانی است. میانگین بارش سالانه در این شهرستان ۷۵ میلی‌متر می‌باشد. میانگین دمای زاهدان در تابستان ۴۲ سانتی‌گراد و در زمستان تا ۱۰- درجه متغیر است. زاهدان از نظر شرایط آب و هوایی و میزان بارندگی تقریباً مشابه یزد می‌باشد.

۴- نحوه اجرا و مشخصات برنامه کامپیوتری

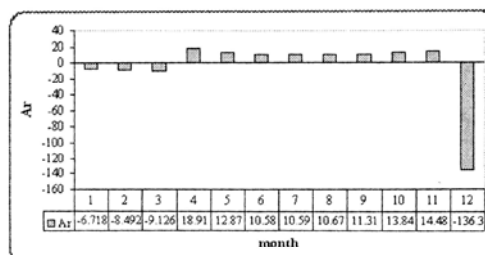
جهت محاسبه سطح مورد نیاز حوضچه تبخیری (A_{EP}) برنامه‌ای در محیط برنامه‌نویسی MATLAB برای معادله استخراج شده (معادله ۱۳) نوشته شد. اطلاعات و داده‌های آماری نظیر درجه حرارت محیط، بارندگی، رطوبت نسبی، سرعت باد و تبخیر از سطح حوضچه و استخر برای هر یک از شهرها و همچنین مشخصات استخر خورشیدی فرضی به برنامه ارائه گردید. در نهایت میزان نسبت سطح حوضچه تبخیری به استخر خورشیدی و جریان‌های حجمی Q_1 ، Q_4 و Q_7 در دو حالت استفاده از آب دریا و آب شیرین برای شستشوی سطحی برای هر یک از شهرهای مورد نظر محاسبه گردید.

۵- بحث و بررسی نتایج

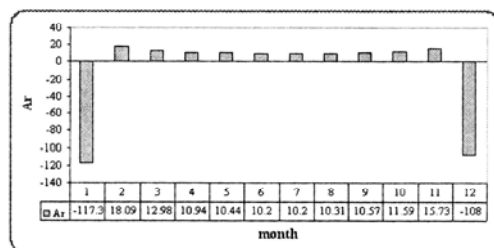
شکل (۳) نتایج به دست آمده برای نسبت سطح را زمانی که از آب شور دریا (با شوری ۰/۳) برای شستشوی سطحی استفاده گردد، در ماه‌های مختلف برای شهرهای مشهد، یزد، رشت، اهواز، بندرعباس و زاهدان نشان می‌دهد.



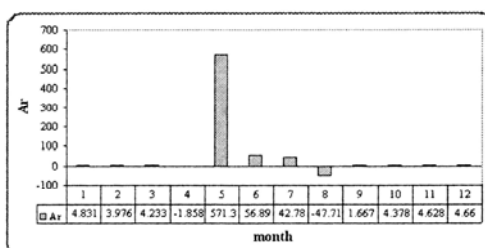
ب- یزد



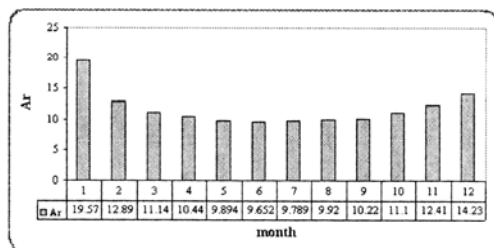
الف- مشهد



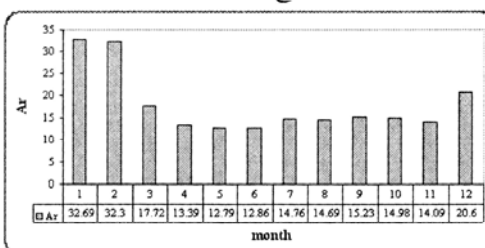
د- اهواز



ج- رشت



و- زاهدان



ه- بندرعباس

شکل ۳: مقادیر نسبت سطح در حالت استفاده از آب شور برای شستشوی سطحی در ماه‌های مختلف میلادی

الف- مشهد: در شهر مشهد طراحی برای فصل زمستان چندان مناسب نیست. زیرا در این فصل از سال میزان بارندگی بیشتر از تبخیر بوده و به دلیل قرارگیری تبخیر خالص ($E_{EP} - R$) در مخرج کسر و دارا بودن مقداری کمتر از ۰/۰۲

متر، جواب‌های غیر منطقی و منفی برای نسبت سطح به دست می‌آید. در یک نگاه اجمالی مشاهده می‌کنیم که زمانی که از آب شور دریا برای شستشوی سطحی استفاده می‌گردد، نسبت به زمانی که از آب شیرین استفاده می‌شود، نیازمند سطح حوضچه تبخیری بزرگتری هستیم. همچنین در فصل تابستان به دلیل بالا بودن میزان تبخیر خالص سطح حوضچه کوچکتر از فصل‌های بهار و پاییز حاصل می‌شود.

ب- یزد: فقط در ماه ژانویه تبخیر خالص $0/02$ متر است. پس در این ماه از سال جوابی که برای نسبت سطح به دست می‌آید، غیر منطقی می‌باشد. نسبت سطح‌های به دست آمده در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز در یزد نسبت به شهر مشهد کمتر است. این بدان علت است که در یزد میزان تبخیر خالص بیشتر از مشهد است.

ج- رشت: در رشت چون در اغلب ماه‌های سال بارندگی بیشتری را نسبت به تبخیر شاهدهیم، طراحی استخر خورشیدی همراه با حوضچه تبخیری امری غیر منطقی و غیر معقول به نظر می‌رسد.

د- اهواز: در ماه‌های ژانویه و دسامبر که میزان تبخیر خالص منفی است و مقداری کمتر از $0/02$ متر است، جواب نسبت سطح غیر منطقی به دست می‌آید. پس این دو ماه برای طراحی مناسب نمی‌باشند. در اهواز میزان تبخیر خالص نسبتاً بیشتر از یزد می‌باشد. پس انتظار می‌رود که در این شهر مقادیر نسبت سطح کوچکتری را دارا باشیم، ولی چون مقادیر تبخیر خالص از استخر خورشیدی نیز بالا می‌رود و این رابطه مستقیم با نسبت سطح دارد (فرمول ۱۳)، باعث بزرگ شدن نسبت سطح می‌گردد.

ه- بندرعباس: در بندرعباس با توجه به شرایط خاص منطقه‌ای که دارد دما نسبتاً بالا، ولی میزان تبخیر آن من می‌باشد که به علت بالا بودن رطوبت نسبی می‌باشد. در این شهر مقادیر نسبت سطح در ماه پنجم کمترین مقدار را دارد، در صورتی که در سایر شهرها کمترین مقدار نسبت سطح مربوط به ماه هفتم می‌باشد. به عبارتی در این شهر ماه‌های گرم سال کمی جلوتر از شهرهای دیگر است. در دو ماه ژانویه و فوریه میزان تبخیر خالص کمتر از $0/02$ متر است و جواب نسبت سطح غیر منطقی می‌باشد. می‌توان گفت در این شهر نسبت به شهر اهواز و یزد و حتی مشهد نسبت سطح بالاتری را نیازمندیم. اگر تابستان را به عنوان فصل مورد نظر برای طراحی در نظر بگیریم کوچکترین سطح ممکن را برای حوضچه خواهیم داشت.

نتایج به دست آمده برای شهرهای مختلف برای طراحی تابستانه برای دو حالت استفاده از آب شور و آب شیرین جهت شستشوی سطحی استخر خورشیدی به قرار زیر است:

جدول ۲: نسبت سطح طرح تابستانه برای شهرهای ایران

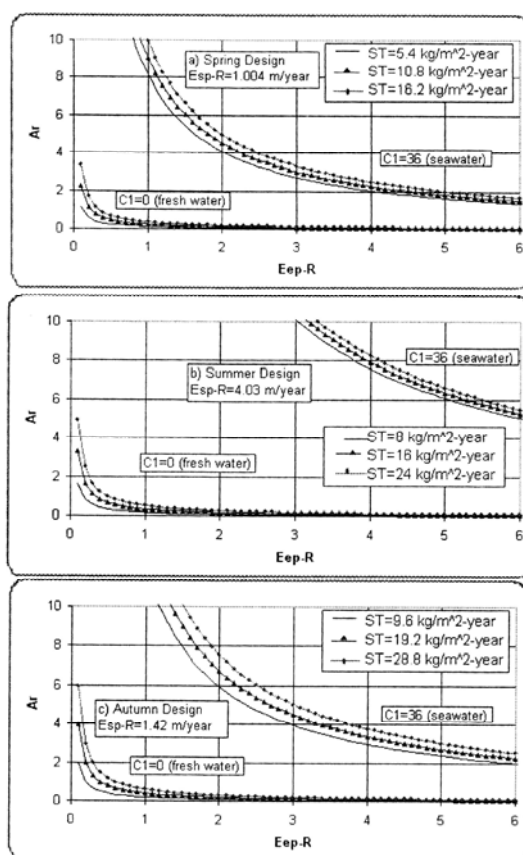
	مقادیر نسبت سطح	
	استفاده از آب شیرین	استفاده از آب شور
مشهد	۰/۱	۱۰/۵
یزد	۰/۰۶	۹/۵
اهواز	۰/۰۶	۱۰
بندرعباس	۰/۱۲	۱۲/۷۹
زاهدان	۰/۰۶	۹/۸

شکل (۴) حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف نظیر تبخیر خالص، میزان انتشار طبیعی نمک و فصل مورد نظر جهت طراحی را برای شهر مشهد نشان می‌دهد. از شکل (۴) به طور کلی می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که:

۱. با افزایش مقدار انتشار طبیعی نمک میزان نسبت به سطح نیز افزایش می‌یابد.

۲. با افزایش میزان تبخیر خالص از حوضچه از نسبت سطح کاسته می‌شود.

۳. زمانی که از آب شور با غلظت ۳۶ کیلوگرم بر متر مکعب برای شستشوی سطحی استفاده کنیم نسبت سطحی به مراتب بزرگتر را نسبت به حالت استفاده از آب شیرین نیازمندیم.



شکل (۴): نتایج به دست آمده از تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای تبخیر خالص، آب مورد نظر برای شستشوی سطحی و میزان انتشار طبیعی نمک در شهر مشهد

۶- نتیجه گیری و پیشنهادات:

با توجه به نتایجی که برای اندازه سطح حوضچه تبخیری به دست آمد مشخص شد که شهر رشت برای ایجاد چنین سیستمی (الحاق حوضچه تبخیری در کنار استخر خورشیدی) مناسب نمی باشد. که علت آن ناچیز بودن تبخیر خالص در ماه های مختلف سال و همچنین بارندگی زیاد می باشد. مشهود با توجه به اینکه دارای شرایط آب و هوایی متفاوت در فصول تابستان، بهار، زمستان و پاییز است، نسبت سطح حوضچه تبخیری به استخر خورشیدی برای طراحی تابستانه، بهاره و پاییزه با هم اختلاف قابل ملاحظه دارند که در نتیجه موارد فوق و با توجه به مسائل اقتصادی و بهای زمین در این شهر پیشنهاد می گردد مطالعات دقیق تری صورت پذیرد. در شهرهای یزد، زاهدان و اهواز شرایط آب و هوایی مشابه است بنابراین نسبت سطح حوضچه تبخیری به استخر خورشیدی در این شهرها نزدیک به هم می باشد. نکته قابل توجه برای این شهرها آن است که شرایط آب و هوایی در اغلب ماه های سال نزدیک به شرایط آب و هوایی تابستان می باشد. در نتیجه سطح به دست آمده برای حوضچه تبخیری می تواند جوابگوی بیشتر نیازهای استخر در طول سال باشد. در بندرعباس نیز با توجه به بالا بودن رطوبت نسبی و کاهش تبخیر خالص طراحی حوضچه کارایی مناسبی ندارد.

۷- مراجع

۱. Jafarzadeh, M.R., ۲۰۰۰, **on the performance of a salt gradient solar pond, Applied Thermal Engineering**, Vol ۲۰, ۲۴۳-۲۵۲

۲. Alagao, F. B., Akbarzadeh, A. and Jahnson, P. W., ۱۹۹۴, **The Design Construction and Initial Operation Of a Closed-Cycle, Salt-Gradient solar Pond**, Solar Energy. Vol ۵۳, No. ۴. PP. ۳۴۳-۳۵۱ [۲]

۳. حسنجویی، رضا، مطالعه عملکرد حرارتی استخرهای خورشیدی بزرگ در شرایط آب و هوایی شهر مشهد، پایان نامه کارشناسی ارشد، سال ۱۳۷۸، دانشگاه فردوسی مشهد

۴. Agha, K. R., Abughres, S. M., and Ramadan, A. M., ۲۰۰۲, **Design Methodology For a Salt Gradient Solar Pond Coupled With an Evaporation Pond**. Solar Energy, Vol. ۷۲, N۰.۵. PP. ۴۴۷-۴۵۴