

تأمین انرژی گرمایشی سالیانه نوع جدیدی از گلخانه‌های خورشیدی با استفاده از بازتابنده‌های NIR و ذخیره‌ساز حرارتی حاوی PCM

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

بهروز میرزایی ضیاپور
امیر هشترویدی اصل*

چکیده

کار پیش رو به بررسی سیستم جدیدی از گلخانه خورشیدی پرداخته است. در این گلخانه سقف منحنی وار گلخانه مجهز به پوششی خاص است که تابش نزدیک زیر قرمز (NIR) غیر مفید برای فوتوسنتز گیاهان را باز می‌تاباند و به تابش لازم برای فوتوسنتز (PAR) که برای رشد گیاهان ضروری است اجازه عبور می‌دهد. NIR توسط پوشش، بازتابیده شده و در خط کانونی سقف متمرکز می‌شود. در خط کانونی سقف کلکتوری لوله‌ای حاوی آب و مواد تغییر فاز دهنده (PCM) تعبیه شده است که انرژی بازتابی را در خود ذخیره می‌کند. تحلیل عددی برای تابش نور خورشید در چهار روز از چهار فصل مختلف سال بر این گلخانه انجام گرفته و نتایج به صورت کانتورهای دما و خطوط جریان آمده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از عایقی قوی در دیواره‌های گلخانه، انرژی ذخیره شده در ذخیره‌ساز حرارتی، می‌تواند گرمای لازم برای گرمایش گلخانه را در تمامی فصول تأمین کند و نیاز به منبع گرمایشی جانبی را منتفی سازد.

کلمات کلیدی: گلخانه خورشیدی، PCM، گرمایش گلخانه، بازتابنده NIR، جابجایی طبیعی.

Supplying Annual Heating Energy For a Novel Solar Green house Using NIR Reflectors and PCM Storage

B. Mirzayi Ziapour
A. Hashtroudi Asl

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabili, Iran
Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabili, Iran

Abstract

In this work, a novel solar greenhouse is investigated. The curved roof of this greenhouse is equipped with a special cover reflects NIR and lets PAR to pass, according to the fact that NIR is unnecessary for the photosynthesis process and PAR is vital for plants growth. Reflected NIR is concentrated in the focal line of curved roof. In the roof focal line, a pipe containing water and Phase Change Material (PCM) is improvised that gathers reflected Energy. Numerical analysis is done for solar irradiance on this greenhouse at 4 days from four different seasons. The results reported as temperature contours and stream lines. Studies reveal that by using a proper isolator in the walls, we can provide whole of needed heating energy all over the year with saved energy in the storage system and there will be no need to more cost for the heating purposes.

Keywords: Solar Greenhouse, PCM, Greenhouse Heating, NIR Reflector, Natural Convection.

۱- مقدمه

کاهش تولید محصول شود [۱] با استفاده از پوششی مخصوص که مانع ورود NIR شود می‌توان دمای فضای داخلی را کاهش داد. به این طریق ظرفیت خنک کاری گلخانه هم کاهش می‌یابد از طرفی می‌توان NIR منعکس شده را نیز با یک متمرکزساز خورشیدی کنترل کرد. یک پوشش گلخانه ای منعکس کننده NIR (با گذردهی بالای PAR) با یک سیستم خنک کاری خورشیدی توسط سانوولد و همکاران [۲، ۳ و ۴] توسعه داده و مطالعه شد. کشف شد که نوعی فیلم چند لایه فلزی برای تمام بازه طیفی NIR (2500-900 nm) انعکاس خوبی نشان می‌دهد [۲] اگر سقف گلخانه به صورت سهموی و یا منحنی وار ساخته شود و پوشش بازتابنده NIR بر روی آن نصب گردد، نور بازتابی می‌تواند در نقطه کانونی سطح منحنی متمرکز شده و توسط انواع مختلف کلکتور دریافت شود. از کلکتور نصب شده در نقطه کانونی می‌توان برای ذخیره انرژی مورد نیاز در زمان‌های سرد روز و کل طول شب استفاده نمود. در چنین کلکتورهای گرمایی و در داخل لوله

تابش کلی نور خورشید که وارد فضای داخلی گلخانه می‌شود به ۳ دسته قابل تقسیم است: UV (ماورا بنفش)، PAR، NIR. از طیف‌های مطرح شده تنها بخش PAR از اشعه ورودی توسط گیاهان گلخانه جذب می‌شود و آن هم در حدود یک درصد از کل انرژی ورودی خورشید است. این بدین مفهوم است که فیلتر کردن تابشی که وارد فضای گلخانه می‌شود، می‌تواند مفید باشد. در برخی از مقالات چندین پوشش که منجر به اصلاحات طیفی نور خورشید می‌شوند، گزارش شده‌اند. در این کار پوشش‌های مسدود کننده NIR مد نظر خواهد بود. NIR به صورت جزئی توسط گیاهان جذب می‌شود و جذب عمده آن توسط اجزای ساختاری گلخانه اتفاق می‌افتد. لذا NIR باعث افزایش دمای گلخانه می‌شود. گرمایش گلخانه با نور خورشید در طول ماه‌های سرد مطلوب ولی در طول ماه‌های گرم سال عاملی نامطلوب است چرا که باعث می‌شود دمای هوای داخل گلخانه بیش از حد گرم و منجر به

کلکتور حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است. کانتورهای دمایی و خطوط جریان در بازه زمانی معینی از روز برای هر چهار فصل ارایه و بررسی شده‌اند. در پایان به قابلیت این متد برای تأمین انرژی گلخانه در فصول مختلف پرداخته شده است.

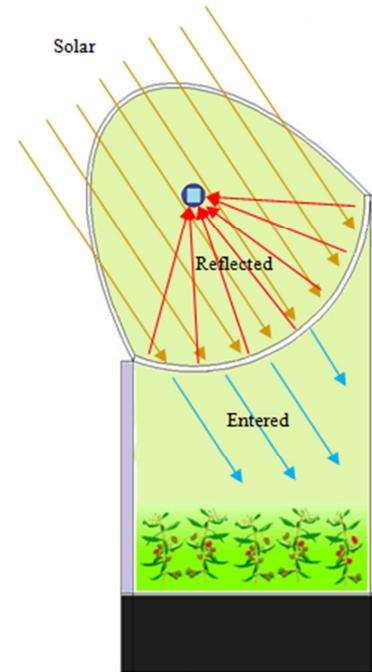
۲- هندسه و روابط موجود

مدل هندسی که برای شبیه‌سازی یک سیستم گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گرفته در شکل ۱ آمده است. در قسمت زیرین گلخانه، خاک زراعی شبیه‌سازی شده است. دیواره‌های گلخانه با ضخامت معینی از عایق سیمانی پوشانده شده‌اند. سقف گلخانه شیشه‌ای و به صورت کماتی دایروی لحاظ شده است و پوشش بازتابنده NIR بر روی آن نصب شده که باعث می‌گردد ۹۹ درصد از انرژی ورودی بازتاب شود. در محور کانونی لوله ای با قطر معین قرار داده و درون آن مواد تغییر فاز دهنده شبیه‌سازی شده است. قطر لوله و نیز مقدار PCM بهینه‌سازی ابعاد لوله در مقایسه با مقدار PCM تعیین گشته است. فضای شامل محوطه بالایی سقف مقعر و نیز لوله کلکتور با پوشش شیشه‌ای دیگری پوشانده شده است که فضای بسته‌ای اطراف کلکتور ایجاد می‌کند. چنین فضای بسته‌ای منجر به کاهش تلفات از لوله می‌گردد.

در داخل سیستم، هوای موجود تحت اثر شرایط حرارتی به طریق جابجایی طبیعی گرم خواهد شد. لوله کلکتور، شامل آب و PCM از قسمت پایین و در کمان ۱۱۰ درجه‌ای که در معرض بازتاب ۹۹ درصدی انرژی خورشیدی توسط پوشش سقف گلخانه قرار دارد، شار حرارتی دریافت می‌کند. هوای داخل محفظه بالای پوشش نیز تحت اثر دفع حرارت جابجایی طبیعی از قسمت بالایی لوله کلکتور گرم تر خواهد شد. خصوصیات ترمودینامیکی مواد و مصالح به کار رفته در جدول ۱ آمده است. برای توزیع سرعت و دمای فضای داخل گلخانه و نیز فضای داخل محفظه بسته، معادلات مرتبط با جابجایی طبیعی طبق آن چه در [۹ و ۱۰] آمده است، به کار رفته‌اند.

جدول ۱- خصوصیات مواد و مصالح مورد استفاده در کار پیش رو؛ (a) مواد معمول، (b) واکس پارافین به عنوان PCM				
(a)				
	ρ (Kg/m^3)	c_p (J/KgK)	k (W/mK)	μ (Kg/ms)
Air	Ideal Gas	1006.43	0.042	1.7894×10^{-5}
Water	998.2	4182	0.6	1.003×10^{-3}
Insulator	350	1590	0.087	-
Glass	2500	750	1	-
Soil	1800	1200	2	-

(b)						
	ρ	c_p	k	μ	h_l ($\frac{J}{Kg}$)	T_{melt} ($^{\circ}C$)
Paraffin Wax	860	2500	0.27	-	188000	53

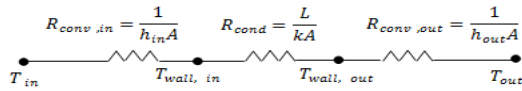


شکل ۱- طرحواره گلخانه شبیه‌سازی شده در این کار با بازتابنده NIR و لوله ذخیره سازی در خط کانونی؛ حاوی آب و PCM

کلکتور، سیالی مانند آب، به عنوان ذخیره‌ساز به کار می‌رود. از آن جایی که میزان گرمای ورودی می‌تواند منجر به دماهای بسیار بالا شود و پدیده‌هایی مانند جوشش و تبخیر را در لوله به وجود آورد، برای ممانعت از این روند، PCM ها برای ذخیره بهتر انرژی به کار

می‌روند. استفاده از این مواد باعث می‌شود کنترل دمایی در دمای ذوب این مواد در لوله مورد نظر برقرار باشد. با استفاده از PCM ها همچنین می‌توان انرژی را برای مدت‌های طولانی تر ذخیره کرد. در این زمینه مطالعات عدیده‌ای در مورد کپسول‌های حاوی PCM انجام شده‌اند. در این طیف از مطالعات که به صورت عملی نیز صورت گرفته‌اند، مواد PCM داخل کپسول‌هایی تزریق می‌شوند و استفاده از کارایی آنها با به کارگیری این کپسول‌ها صورت می‌گیرد. لین [۶ و ۵] بالغ بر ۲۰۰ نوع ماده ذخیره ساز گرما از طریق تغییر فاز را شناسایی کرد که در دمای ۱۰ الی ۹۰ درجه سلسیوس ذوب می‌شوند و برای ذخیره انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. طبق همان گزارش استفاده از $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ در محفظه‌های فیلمی شکل پلاستیکی کارایی بالایی از خود نشان دادند. ایتونی و همکاران [۷] نیز به صورت تجربی هر دو عملکرد ذوب و انجماد برای واکس پارافین را که در پوسته‌های کروی محبوس بودند، مطالعه نمودند. در این مطالعه سیال عامل هوا در نظر گرفته شده بود.

در کار پیش رو کل سیستم گلخانه همراه با پوشش دایروی و مجهز به بازتابنده NIR، کلکتور گرمایی در محور کانونی و نیز پوشش بالایی که محفظه را می‌بندد، در چهار فصل سال مورد تحلیل عددی واقع شده است. مقداری واکس پارافین به عنوان PCM درون لوله

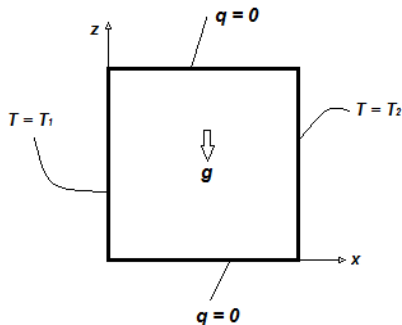


شکل ۲- مقاومت های گرمایی در دفع گرما در ساعات شب از فضای گلخانه به بیرون

۳- روش حل عددی و صحت محاسبات

در این کار برای گسسته سازی معادلات از روش حجم کنترل استفاده شده است. معادلات به صورت ناپایا در نظر گرفته و حل شده‌اند، هوای درون گلخانه و داخل محفظه به عنوان گاز کامل لحاظ شده و معادلات بر اساس چگالی به یکدیگر کوپل شده اند. در شبکه بندی در نواحی دارای گرادیان های بالای سرعت و دما مانند مرزها شبکه بندی ریز شده است تا دقت محاسبات افزایش یابد. برای بررسی استقلال از شبکه ۵ شبکه بندی با تراکم های متفاوت به شرح: ۱۰۱۳۰، ۱۲۶۷۰، ۱۵۲۰۰، ۱۸۴۰۰ و ۲۲۰۰۰ شبکه در نظر گرفته شد و برای شرایط معینی دمای میانگین داخل لوله به همراه PCM مورد بررسی قرار گرفت. معیار استقلال از شبکه دمای افزوده شده به میانگین دمای داخل لوله است. نتایج نشان می‌دهد برای تراکم های شبکه ای بیشتر از ۱۸۴۰۰ شبکه تغییرات محاسبات به کمتر از ۰/۲ درصد می‌رسد. بدین ترتیب برای تمامی محاسبات از شبکه ۱۸۴۰۰ عددی استفاده شد.

برای بررسی صحت این شبیه‌سازی و محاسبات از مقایسه کار پیش رو با کار وال دیویس و جونز [۱۱] استفاده شده است. در این کار نتایج شبیه‌سازی برای انتقال گرمای جابجایی طبیعی در یک محفظه، همان طور که در شکل ۲ آمده، گزارش شده است. در کار پیش رو با استفاده از کد مورد استفاده، مطالعه [۱۱] شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل برای محاسبات عدد نوسلت میانگین در مقادیر مختلف عدد رایلی Ra در جدول ۲ با نتایج کار مورد اشاره مقایسه شده است. آن گونه که دیده می‌شود نتایج کد مورد استفاده در تطابقت قابل قبولی با کار وال دیویس و جونز است.



شکل ۲- هندسه مورد استفاده در کار [۱۱]

جدول ۲- مقایسه نتایج کار [۱۱] با کار پیش رو در اعداد رایلی مختلف

\bar{Nu}	$Ra = 10^3$	$Ra = 10^4$	$Ra = 10^5$	$Ra = 10^6$
Reference [14]	1.118	2.243	4.519	8.800
Present Work	1.139	2.279	4.580	9.011

بالانس انرژی به کار رفته برای لوله کلکتور در تعیین مقدار بهینه قطر لوله در مقایسه با مقدار حجم PCM موجود به شکل روابط ۱ و ۲ اعمال شد.

$$Q_{in} = Q_{store} + Q_{out}, Q_{out} = 0.15 Q_{in} \quad (1)$$

$$0.85 \times (G_{in} \times A_{in,pipe} \times t) = \rho_w V_w c_{p,w} (T_{melt} - T_i) + \rho_{pa} V_{pa} c_{p,pa} (T_{melt} - T_i) + \rho_{pa} V_{pa} h_{L,pa} \quad (2)$$

مساحت سطح ورودی انرژی خورشیدی طبق رابطه (۳) خواهد بود:

$$A_{in,pipe} = \frac{11\pi}{18} r l \quad (3)$$

و اگر حجم مربوط به PCM به صورت مربعی به طول ضلع a، محیط در داخل لوله در نظر گرفته شود طبق رابطه (۴) و (۵) به ترتیب برای حجم پارافین استفاده شده و لوله حاوی آب خواهیم داشت:

$$V_{pa} = a^2 \quad (4)$$

$$V_w = \pi r^2 - a^2 \quad (5)$$

به این ترتیب که مقدار خالص انرژی ورودی به لوله از کمان ۱۱۰ درجه‌ای پایین آن، در طول ساعات روز و وجود تابش خورشید، با انرژی مورد نیاز برای افزایش دمای آب و واکس پارافین تا دمای ذوب پارافین بعلاوه انرژی لازم با ذوب کامل پارافین برابر باشد. این حد بهینه برای این در نظر گرفته شد تا دمای آب درون لوله و PCM از حد معینی افزایش نیابد و در دمای معقولی انرژی موجود ذخیره گردد. از طرفی دیگر، چنین بهینه‌سازی‌ای باعث می‌گردد از افزایش غیر عادی و غیر ضروری قطر لوله اجتناب شود. این در حالی است که افزایش قطر لوله می‌تواند منجر به پیدایش آثاری مانند اثر سایه بر روی بازتابنده گردد که کارایی سیستم را کاهش می‌دهد. طبق محاسبات عددی انجام گرفته در شبیه‌سازی، مقدار تلفات از قسمت بالایی لوله که در بیشینه مقدار خود در حدود ۱۵ درصد از کل انرژی ورودی است به عنوان انرژی خروجی از کلکتور لحاظ می‌شود.

در مسایل مرتبط با گلخانه های خورشیدی، ساعات شب به علت سردتر بودن نسبت به ساعات روز و عدم دسترسی به گرمای خورشیدی، زمان هدف برای برآورد بار گرمایشی محسوب می‌شوند. با این حال در طول سال و تنها به جز روزهای تابستانی، در طول روز نیز به علت برقراری دمای هوای بیرون در دمایی پایین تر از دمای مبنای گلخانه، نیاز به گرمایش گلخانه همچنان وجود خواهد داشت. در روزهای منتخب برای هر چهار فصل که در این کار مورد استفاده قرار گرفت، بار گرمایشی کل شامل هر دو بخش روزانه و شبانه محاسبه شده و نیاز سیستم به گرمای لازم برای برقراری دما در مقدار معین ۱۹ درجه سانتی گراد، برای گلخانه خورشیدی پرورش توت فرنگی، در طول شبانه روز به دست آمد. در دفع گرما از دیواره های گلخانه سه مقاومت گرمایی مانند آن چه در شکل ۲ آمده است، در نظر گرفته شد؛ مقاومت مرتبط با انتقال گرمای جابجایی طبیعی در داخل گلخانه بعلاوه انتقال گرمای رسانشی از دیواره های عایق کاری شده و هم چنین انتقال گرمای جابجایی اجباری در هوای بیرون که میانگین ضریب جابجایی هوای بیرون در ساعات روز و شب، متفاوت از هم لحاظ گشت. برای داده‌های تجربی در دسترس، میانگین دمای هوای بیرون مرتبط با هر فصل در نظر گرفته شد.

۴- نتایج و بحث و بررسی

در ابتدای محاسبات بنا بر معادله ای که پیش تر برای بالانس انرژی ارایه شد، محاسبات بهینه سازی برای قطر لوله در مقایسه با مقدار PCM استفاده شده در داخل لوله در چهار روز منتخب از سال صورت گرفت. در این محاسبات ضریب k به عنوان نسبت حجم PCM به حجم کل لوله تعریف شد:

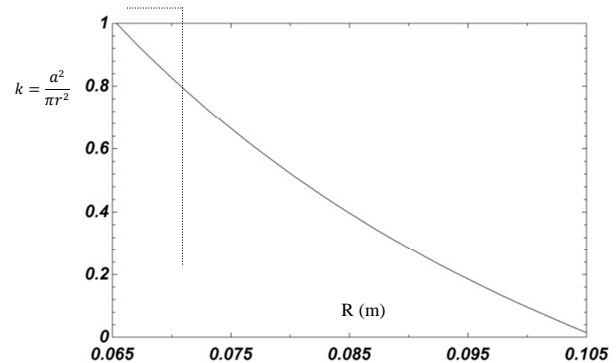
$$k = \frac{a^2}{\pi r^2} \quad (۶)$$

که ضریب k بعد از مقدار k متغیر از صفر تا یک خواهد بود.

معادله بالانس انرژی به صورت پارامتری برای مقادیر مختلف شعاع لوله r و مقادیر از صفر تا یک برای ضریب k در هر چهار روز حل شد. همان گونه که انتظار می‌رود، بالاترین مقادیر شعاع لوله مربوط به تابستان خواهد بود چرا که بیشترین مقادیر تابش متعلق به این فصل و لذا حجم بزرگتری از لوله برای ذخیره انرژی مورد نیاز است. از این رو نتایج تنها برای فصل تابستان در شکل ۴ آورده شده است.

نمودار شکل ۳ تمامی مقادیر ممکن برای شعاع لوله را در فصل تابستان نشان می‌دهد که بالانس انرژی برای گرمای ورودی به لوله و حرارت مورد نیاز برای گرمایش آب و PCM جامد و ذوب تمامی PCM را به همراه تلفات برقرار می‌سازد. همچنین نشان می‌دهد به ازای مقادیر مختلف بهینه شعاع لوله، لازم است چه نسبتی از لوله از PCM پر شده باشد. نتایج حاصل از محاسبات برای فصل تابستان به عنوان محتاطانه ترین نتیجه برای دیگر فصول نیز استفاده می‌شود. چرا که با در نظر گرفتن بزرگ ترین شعاع لازم برای کل سال، محدودیتی در استفاده از PCM داخل لوله در تابستان و نگرانی از تبخیر در داخل آن وجود نخواهد داشت و در دیگر فصول نیز سیستم پیشنهادی به آسانی قابل استفاده است.

با توجه به ابعاد گلخانه شبیه‌سازی شده، اندازه‌های بزرگ شعاع لوله علاوه بر مشکلات ساخت با مانع دیگری به نام اثر سایه لوله بر روی کلکتور مواجه است. لذا استفاده از لوله‌هایی متناسب و کوچک تر توصیه می‌شود. برای آسانی در مسایل



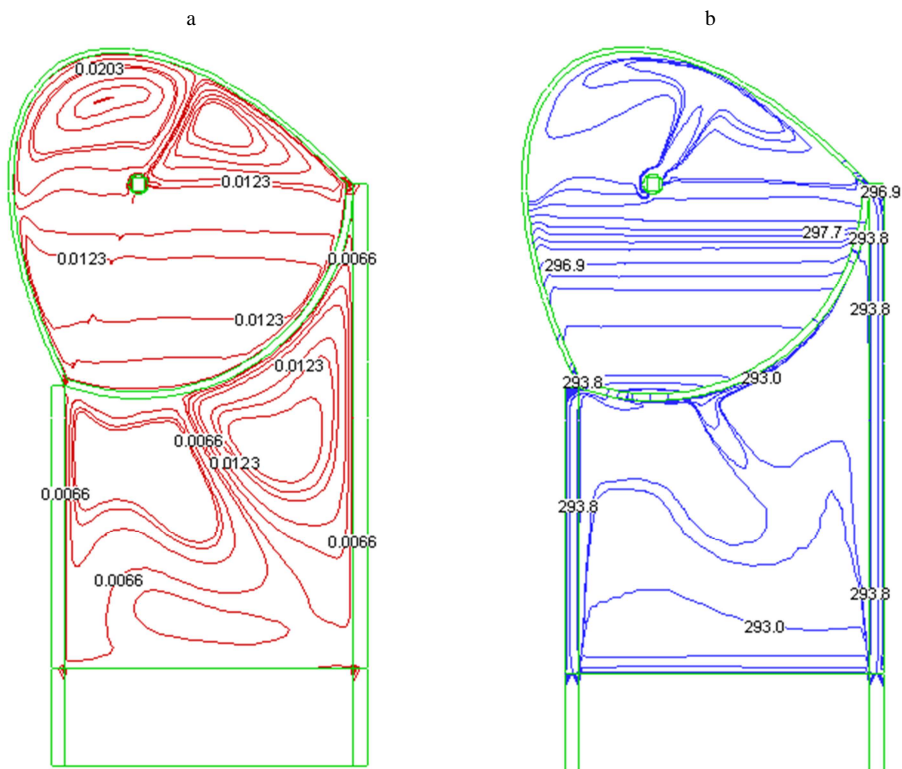
شکل ۳- نتایج بهینه سازی ابعاد لوله در روز تابستانی نسبت به ضریب k و با استفاده از معادله ۲

مربوط به طراحی شبیه‌سازی، فرض شده است کپسول‌های PCM در قطعات مربعی شکل درون لوله جاسازی شود. از این رو و با توجه به نتایج حاصل از بهینه سازی در نمودار شکل ۷ مقدار شعاعی لوله 7cm

لحاظ شد که مقدار متناسب طول ضلع مربع حاوی PCM و محاط در این لوله برابر با 9.89cm به دست می‌آید. برای ابعاد مربعی انتخاب شده و به دلایل هندسی قطعاً نسبت k پایین تر خواهد بود. برای ممانعت از قطع ارتباط بین آب‌های محصور در چهار سمت لوله، طول ضلع مربع قدری کوچک تر و به مقدار 9cm در نظر گرفته شده و طراحی گردید. بدین ترتیب و با ابعاد نهایی، نسبت حجم PCM مورد استفاده به حجم کل، $k = 0.538$ به دست آمد. بررسی‌های بعدی نشان داد که چنین کاهش در حجم PCM خللی در نگاه داشتن دمای کل لوله به همراه PCM در دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده ایجاد نخواهد کرد.

بر پایه ساختار پیش گفته در مورد ذخیره‌ساز انرژی خورشیدی، کل سیستم گلخانه به همراه ضمیمه ذخیره‌ساز در چهار روز متفاوت از چهار فصل سال توسط کد آماده حجم محدود Fluent مورد تحلیل عددی واقع شد. مقادیر ورودی در این تحلیل از داده های تجربی یکی از ایستگاه‌های سنجش تابش خورشیدی به دست آمده‌اند [۹] در شکل‌های ۴a و ۴b، توزیع دمایی داخل گلخانه و نیز خطوط جریان هوا داخل محفظه حاوی ذخیره‌ساز در ساعت ۱۲، به علت کمبود فضا تنها برای روز تابستانی آمده است. در درون گلخانه از آن جایی که کف خاک گلخانه در دمای ۲۲ درجه سلسیوس نگاه داشته می‌شود و با توجه به تفاوت دمایی با دیواره های گلخانه یک مساله جابجایی طبیعی کلاسیک درون گلخانه خواهیم داشت و گرم شدن آرام محفظه بالایی از دفع بیش از حد گرما از محفظه گلخانه نیز ممانعت می‌کند.

در سه فصل بهار، پاییز و زمستان علاوه بر گرمایش شبانه گلخانه، در ساعاتی از روز نیز دمای هوای بیرون پایین تر از دمای مبنای گلخانه (در این کار ۱۹ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است) می‌باشد و لذا با دفع گرما به بیرون گلخانه، گرمایش فضای داخلی گلخانه در این ساعات نیز ضروری است. در بین ۴ روز منتخب از چهار فصل سال که داده‌های آن مورد استفاده قرار گرفته است، در روزهای بهاری، پاییزی و زمستانی چنین بازه های زمانی شناسایی شد و با استفاده از شبیه‌سازی مقاومت‌های گرمایی که مقادیر آن‌ها در جدول ۳ آمده‌اند، دفع گرما در این ساعات محاسبه گشت و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. از طرف دیگر مقدار حرارت خورشیدی که با استفاده از سیستم پیشنهادی در این کار برای گلخانه، قابل ذخیره‌سازی است، در هر چهار روز آنالیز و محاسبه شده است. هر دوی این نتایج یعنی بار گرمایشی گلخانه، اعم از روزانه و شبانه، و گرمای ذخیره شده در آب و PCM کلکتور برای روزهای منتخب در جدول ۴ گردآوری و ارایه شده است. داده‌های جدول ۴ نشان می‌دهد که استفاده از این سیستم ذخیره‌ساز منبع بسیار خوبی از انرژی را برای تأمین بار گرمایشی گلخانه در اختیار قرار می‌دهد و می‌توان این انرژی را جایگزین منابع گرمایی بیرونی نمود. همان طور که از جدول ۴ بر می‌آید برای سه فصل بهار، تابستان و پاییز، انرژی ذخیره شده در کلکتور، به خوبی پاسخ گوی نیاز گرمایشی گلخانه خواهد بود و تنها در فصل زمستان انرژی ذخیره شده برای گرمایش گلخانه ناکافی است. در انتها با



شکل ۴- کانتورهای دما و سرعت گلخانه خورشیدی در ساعت ۱۲

(a) خطوط جریان برای روز تابستانی

(b) خطوط دما ثابت برای روز تابستانی

جدول ۳- داده‌های مقاومت گرمایی در

$$h_i = 0.5 \text{ W/m}^2\text{K}, h_{out,day} = 15 \text{ W/m}^2\text{K}, h_{out,night} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}, K = 0.087 \text{ W/mK}, L = 0.1 \text{ m}$$

$R_{in} (m^2k/w)$	$R_{in} (m^2k/w)$	$R_{in} (m^2k/w)$	$R_{in} (m^2k/w)$	$A (m^2)$
2.000	1.149	0.067	0.040	5.543

جدول ۴- داده‌های مرتبط با گرمای ذخیره‌شده در کلکتور و بار گرمایشی گلخانه در ۴ روز از ۴ فصل سال

Winter Day	Fall Day	Summer Day	Spring Day	$Q_{out,day} (MJ)$
0.51	0.15	0	0.14	$Q_{out,night} (MJ)$
1.38	1.02	0.38	0.90	$Q_{out,day} (MJ)$
1.89	1.17	0.38	1.04	$Q_{out,summarise} (MJ)$
0.77	1.63	3.33	2.45	$Q_{in} (MJ)$

۰/۷۷ می باشد و با توجه به شکل ۵ دیده می‌شود که با انتخاب عایقی خوب با رسانایی گرمایی در حدود $k = 0.02 \text{ w/mk}$ می‌توان به تلفاتی در همان حدود انرژی ذخیره شده رسید. به این ترتیب برای فصل زمستان نیز، سیستم ارایه شده در این کار بدون نیاز به تجهیزات دیگر قادر به تأمین انرژی مورد نیاز گلخانه خواهد بود. این نتیجه دست‌آورد قابل توجهی در استفاده از این سیستم به شمار می‌رود.

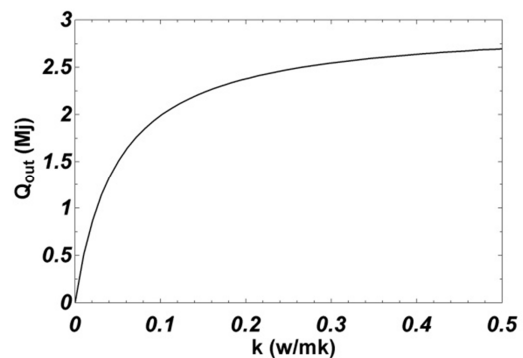
توجه به مباحث اقتصادی در طراحی و ساخت چنین گلخانه‌ای، آثار نوع عایق موجود در دیوار بر میزان اتلافات و در روز زمستانی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در نمودار شکل ۵ تغییرات تلفات گرمای کل Q_{out} نسبت به تغییرات میزان رسانایی گرمایی دیوار k آورده شده است. تمامی متغیرهای پیشین ثابت بوده و تنها تغییرات رسانایی گرمایی بررسی می‌گردد. با رجوع به جدول ۴ مشاهده می‌شود که میزان انرژی ذخیره شده در کلکتور در یک روز زمستانی در حدود MJ

results of a solar greenhouse combining electrical and thermal energy production. *Biosystems Engineering* 2010;106:48–57.

- [3] Sonneveld PJ, Swinkels GLAM, Kempkes F, Campen JB, Bot GPA. Greenhouse with an Integrated NIR Filter and a solar coolings system. *ActaHorticulturae* 2006;719:123–30.
- [4] Sonneveld PJ, Swinkels GLAM, Bot GPA. Design of a solar greenhouse with energy delivery by the conversion of near infrared radiation — Part Ioptics and PV-cells. *ActaHorticulturae* 2009;807:47–53
- [5] Lane GA. Encapsulation of heat of fusion storage materials. In: *Proceedings of 2nd southeastern conference on application of solar energy*. 1976. p. 442– 50.
- [6] Lane GA. Low temperature heat storage with phase change materials. *Int J Ambient Energy* 1980;1:155–68.
- [7] Ettouney H, El-Dessouky H, Al-Ali A. Heat transfer during phase change of paraffin wax stored in spherical shells. *ASME J Sol Energy Eng* 2005;127:357–65.
- [8] Grigiane M, Mottes F, Zardi D, de Francheschi M. Experimental solar radiation measurements and their effectiveness in setting up a real- sky irradiance model. *Renewable Energy* 2011; 36, 1-8
- [9] Elsherbiny SM., Ragab EH. Laminar natural convection in inclined rectangular cavities with a localiaed heat source. *Alexandria Engineering Journal* 2013; 52, 249-257.
- [10] Oliveski RDC, Macagnan MH, Copetti JB. Review Entropy generation and natural convection in rectangular cavities. *Applied Thermal Engineering* 2009; 29, 1417-1425.
- [11] G.D. Val Davis, I.P. Jones, Natural convection in a square cavity: a comparison exercise, *Int. J. Numer. Methods Fluids* 3 (1993)227–248.

۶- نتیجه گیری و جمع بندی

در این کار در مطالعه نوع جدیدی از گلخانه‌های خورشیدی برای ممانعت از ورود طیف هایی از نور خورشید که برای فوتوسنتز گیاهان غیر ضروری است، نوع خاصی از پوشش‌ها بر روی سقف شیشه‌ای گلخانه شبیه‌سازی شده است. این پوشش باعث می‌شود PAR که برای رشد گیاهان ضروری است وارد فضای گلخانه شده و NIR بازتاب شود. با توجه به شکل منحنی وار سقف گلخانه، NIR بازتابی در خط کانونی سقف متمرکز می‌شود. در خط کانونی لوله‌ای حاوی آب و مواد تغییر فاز دهنده PCM الصاق شده که انرژی بازتابی در آن ذخیره می‌شود. فضای بالای این ذخیره‌ساز توسط یک شیشه شفاف بسته شده که از اتلافات بیشتر جلوگیری می‌کند. ذخیره‌سازی در این سیستم به همراه تحولات درون گلخانه‌ای برای چهار روز منتخب از چهار فصل سال به روش عددی شبیه‌سازی شده و نتایج به دست آمده‌اند. برای تعیین مقدار بهینه قطر لوله در مقابل نسبت حجمی PCM درون آن، محاسبات انجام شده و نتایج گزارش شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در سیستم مورد تحلیل در این کار، در روزهای منتخب سه فصل بهار، تابستان و پاییز انرژی جمع‌آوری شده در ذخیره‌ساز ترکیبی برای تأمین گرمای لازم گلخانه تا دمای هوای درون آن در ساعات سرد و شبانه‌گاهی در ۱۹ درجه سلسیوس ثابت بماند، کفایت می‌کند و انرژی مازاد نیز در اختیار می‌گذارد. در حالی که برای شرایط محاسباتی این کار، انرژی ذخیره شده، جوابگوی روز زمستانی نخواهد بود. اما مطالعات تکمیلی نشان داد که استفاده از عایق‌های قوی‌تر در دیواره گلخانه می‌تواند تلفات را تا اندازه‌ای کاهش دهد که انرژی ذخیره شده در روز زمستانی نیز پاسخ‌گوی بار گرمایشی باشد. انرژی مازاد در دیگر فصول نیز می‌تواند به دیگر مصارف گرمایشی و بهداشتی برسد.



شکل ۵- تغییرات تلفات حرارتی کل Q_{out} نسبت به تغییرات میزان

رسانایی گرمایی دیوار k در

$$h_i = 0.5 \frac{W}{m^2K}, \quad h_{out,Day} = 15 \frac{W}{m^2K},$$

$$h_{out,Night} = 25 \frac{W}{m^2K}, \quad L = 0.1m$$

۷- منابع و مراجع

- [1] Mavrogianopoulos GN., *Greenhouses*. third ed. Athens: Ath. Stamoulis; 2001.
- [2] Sonneveld PJ, Swinkels GLAM, Campen J, Van Tuijl BAJ, Janssen HJJ, Bot GPA. Performance