

یافتن رابطه بین زاویه شیب بهینه کلکتورهای لوله خلاء خورشیدی و عرض جغرافیایی

مهدی صادقی دستجردی^{۱*}، محمدحسن مقدس^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، خمینی شهر

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، خمینی شهر

* ۸۱۷۴۶۵۹۱۱۱، msd1360@yahoo.com، اصفهان

چکیده

آبگرمکن‌های خورشیدی یکی از پرکاربردترین سیستم‌های استفاده از انرژی خورشیدی است. این سیستم‌ها زمانی بالاترین راندمان خود را خواهند داشت که در شیب بهینه خود نصب شوند و البته این امر به پارامترهای مختلف از جمله موقعیت جغرافیایی بستگی دارد. پژوهش حاضر به منظور دستیابی به شیب بهینه کلکتورهای لوله خلاء و ارتباط آن با عرض جغرافیایی محل نصب صورت گرفته است. از آنجا که بررسی این دسته از کلکتورها در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف و در طول کل سال به علت مشکلات زیاد از جمله شرایط جوی، متغیربودن میزان تابش و ...، بسیار دشوار است لذا در ابتدای این تحقیق، لوله‌های خلاء در یک روز ثابت و در یک موقعیت جغرافیایی معلوم در شیب‌های مختلف به صورت تئوری و تجربی بررسی گردیده و پس از مقایسه نتایج و اطمینان از توصیف رفتاری این کلکتورها به کمک معادلات کنترل‌کننده مربوطه؛ بررسی این کلکتورها در کل سال انجام گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مدل آسمان غیرهمسانگرد دایوین (Davies) و های (Hay)، رفتار دمایی کلکتور لوله خلاء را با دقت خوبی بیان می‌کند. به کمک این مدل نشان داده شد که شیب بهینه سالانه با عرض جغرافیایی ارتباط مستقیم دارد و برای کلکتورهای لوله خلاء این مقدار برابر با عرض جغرافیایی محل نصب است و شیب بهینه در فصول سال نیز ارتباط خطی با عرض جغرافیایی دارد.

کلیدواژگان: کلکتور لوله خلاء، شیب بهینه، عرض جغرافیایی

Finding the optimal tilt angle of evacuated tube solar collectors and their correlation with latitude

Mehdi Sadeghi Dastjerdi*, Mohammad Hasan Moghadas

Faculty of Mechanical Engineering, Islamic Azad University Khomeinishahr Branch, Khomeinishahr, Iran

* 8174659111, Iran, Isfahan, msd1360@yahoo.com

Received: 17 August 2016 Accepted: 16 February 2017

Abstract:

Solar water heater is the most employed solar energy system. This system is in utmost efficiency if it is installed in optimal slope and direction's and this subject depends as different parameters such as geographical location. This study examines the way of attaining optimum slope and direction for evacuated solar collector and their relation to geographical location of their installation. As examining this type of Evacuated Solar Collector in different geographical locations and during the year is difficult for example because of environmental conditions, changing amount of radiation and etc. At the begging of the study evacuated solar collector has been examined in fixed day and in a fixed geographical location in different slope and direction and then. After comparing the result are assuring from the behavior of these evacuated solar collector, with the help of related controlling formulas. Evacuated solar collector has been examined during the whole year. The results of this study demonstrated that Hay and Davies's Anisotropic Sky models efficiently describe thermal behavior of evacuated solar collector. This model demonstrated that the optimum annual and seasons slope is related to the latitude of installation place and for evacuated solar collector, optimum annual slope is equal to the latitude.

Keyword: Evacuated Solar Collector, Optimum Slope, Latitude



۱- مقدمه

منطقه زاویه‌ی بهینه‌ی سالانه حدود 17° کمتر از عرض جغرافیایی یعنی حدود $20/6^\circ$ به دست آمد [۳].

سال ۱۳۹۱- بهرامی و ثانی نیز با بررسی شیب بهینه آرایه‌های خورشیدی در شرایط اقلیمی کرج و با استفاده از داده‌های تابشی ۱۲ سال (از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۵) دریافتند که زاویه شیب بهینه در شهر کرج بین صفر درجه (در ماههای می، ژوئن، جولای و آگوست) تا 69° درجه (ژانویه) متغیر است. بر اساس محاسبات آنها مقدار این زاویه در شهر کرج و در فصل زمستان $65/33^\circ$ درجه، در بهار 22° درجه، در تابستان صفر درجه و در پاییز $37/33^\circ$ درجه می‌باشد. بر اساس همین محاسبات مقدار شیب زاویه بهینه سالانه نیز به عوامل متعددی از جمله عرض جغرافیایی منطقه و شرایط آب و هوایی وابسته است و مقدار متوسط آن در سال $31/66^\circ$ درجه است [۴].

سال ۱۳۹۲- رحیمی و همکارانش نیز با استفاده از دو مدل آسمان ایزوتروپیک رابطه (Liu-Jordan) و مدل آسمان غیرایزوتروپیک (رابطه Hay - Davies نشان دادند برای شهر شهر کرد، تغییرات زاویه شیب بهینه از صفر درجه برای ماه می تا 62° درجه برای ماه دسامبر متغیر است و زاویه بهینه سالانه در شهر شهر کرد 29° درجه نسبت به افق محاسبه شد [۵].

سال ۱۳۹۳- دلفان و همکارانش نیز به بررسی تجربی تأثیر زاویه شیب بر عملکرد کلکتورهای لوله خلاء در شهر کرمانشاه پرداختند. آنها با انجام آزمایشی بر روی لوله‌های خلاء در 5° شیب $22/5^\circ$ ، 30° ، $27/5^\circ$ ، $52/5^\circ$ درجه نشان دادند که بازدهی کلکتورهای لوله خلاء تابع دو عامل اختلاف دمای محیط با مخزن و مقدار تابش خورشید در سطح کلکتور است [۶].

در سایر مناطق جهان نیز تحقیقاتی در این خصوص انجام گرفته که خلاصه برخی از این تحقیقات نیز در زیر ارائه گردیده است.

سال ۱۹۹۴- گوردو و همکارانش با استفاده از ۱۶ فرمول تحلیلی مختلف زاویه شیب مطلوب در شهر کابل افغانستان را بررسی کردند و نتایج حاصل را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. پس از صحت‌سنجی به کمک روابط پیشنهادی؛ دیگر عرض‌های جغرافیایی را بررسی کرده و با استفاده از نتایج حاصل؛ روابط خطی بین شیب بهینه در ماه‌های مختلف سال و عرض جغرافیایی را به صورت ارائه شده در جدول ۱ پیشنهاد کردند.

جدول ۱ روابط ارائه شده برای شیب بهینه (β_{opt}) ماهانه توسط نیجه گوردو و همکارانش

ژانویه	فوریه	مارس	آوریل
$0.89 \times \varphi + 29$	$0.97 \times \varphi + 17$	$\varphi + 4$	$\varphi - 10$
می	ژوئن	جولای	آگوست
$0.93 \times \varphi - 24$	$0.87 \times \varphi - 34$	$0.89 \times \varphi - 30$	$0.97 \times \varphi - 17$
سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
$\varphi - 2$	$\varphi + 12$	$0.93 \times \varphi + 25$	$0.87 \times \varphi + 34$

محدوده پیشنهادی آنها برای استفاده از این روابط عرض جغرافیایی 60° درجه جنوبی تا 60° درجه شمالی است [۷].

سال ۱۹۹۸- الکاسی در بررسی زاویه بهینه و ارتباط آن با عرض جغرافیایی و عدد مربوط به روز از یک مدل کامپیوتری استفاده کرد که میزان زاویه بهینه را در هر ماه ارائه می‌کرد و نتایج را با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه کرد. پس از بررسی مشاهده کرد که مقادیر تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از روابط مدل سازی کامپیوتری تطابق خوبی دارد [۸].

سال ۲۰۰۲- شاریا با انجام آزمایشاتی نشان داد که زاویه شیب بهینه برای یک آبگرمکن خورشیدی،

از بحران‌های اساسی پیش‌روی بشر امروز می‌توان به آلودگی محیط زیست و کاهش منابع انرژی فسیلی اشاره کرد. متخصصین بر این باورند که استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر به طور همزمان می‌تواند هر دوی این بحران‌ها را مهار نماید. بی‌شک انرژی خورشید در بین انرژی‌های نو و تجدیدپذیر به علت در دسترس بودن، همخوانی با سیستم‌های انرژی کنونی و نامحدود بودن میزان انرژی نسبت به سایر دیگر منابع از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. در بین روش‌های استفاده از انرژی خورشید، استفاده از گرمایش خورشید در تأمین انرژی لازم برای آب گرم مصرفی از کاربردی‌ترین این روش‌هاست. اصلی‌ترین بخش آبگرمکن‌های خورشیدی کلکتور آن است، که معمولاً به دو صورت صفحه تخت و لوله خلاء موجود می‌باشد. در این بین کلکتورهای لوله خلاء به علت راندمان بالاتر، استفاده بیشتری دارد.

کلکتورهای خورشیدی زمانی بالاترین راندمان را خواهند داشت که تابش خورشید بر روی سطح آنها کاملاً عمودی باشد اما با توجه به اینکه کلکتورهای لوله خلاء جزء کلکتورهای ثابت (و نه دنبال کننده خورشید) هستند و از طرفی مسیر حرکت خورشید در آسمان در هر روز از سال متفاوت با روز دیگر می‌باشد، لذا یافتن زاویه‌ای که حداکثر میزان تابش را از خورشید در طول یک بازه زمانی (سالانه و یا فصلی) دریافت کند؛ بسیار حائز اهمیت است. زاویه بهینه به پارامترهای مختلفی بستگی دارد ولی بی‌شک از مهمترین این پارامترها می‌توان از عرض جغرافیایی محل نصب نام برد. در این پژوهش به بررسی ارتباط بین شیب بهینه کلکتورهای لوله خلاء خورشیدی و عرض جغرافیایی محل نصب پرداخته خواهد شد.

۱-۱- پژوهش‌های پیشین

در ایران پژوهش‌های در این خصوص انجام گرفته که خلاصه برخی از این پژوهش‌ها در زیر ارائه گردیده است.

سال ۱۳۸۹- پوینده و همکارانش با استفاده از یک الگوی ریاضی زاویه بهینه سالانه برای شهر تهران را 30° درجه بیان کردند. بر اساس این پژوهش؛ زاویه بهینه در شهر تهران و در ماه‌های سرد سال حدود 55° درجه و در ماه‌های گرم سال حدود 10° درجه خواهد بود [۱].

سال ۱۳۹۱- طالبی زاده و همکارانش زاویه بهینه را برای عرض‌های جغرافیایی 20° درجه تا 40° درجه شمالی (گستره عرض جغرافیایی ایران) بررسی کردند و روابط زیر (رابطه ۱) را ارائه کردند. در این روابط β_{opt} شیب بهینه و φ عرض جغرافیایی است [۲].

$$\beta_{opt} = \begin{cases} 0.4885 \times \varphi - 10.27 & \text{بهار} \\ 0.2631 \times \varphi + 4.961 & \text{تابستان} \\ 0.8966 \times \varphi + 23.81 & \text{پاییز} \\ 1.073 \times \varphi + 10.3 & \text{زمستان} \\ 0.6804 \times \varphi + 7.203 & \text{سالیانه} \end{cases} \quad (1)$$

سال ۱۳۹۱- احترام و همکارانش نیز با تحقیقی در شهر ارومیه بیان داشتند که شیب کلکتورهای خورشیدی در این منطقه در فصل زمستان برابر عرض جغرافیایی یعنی $37/34^\circ$ ، در فصل پاییز حدود 10° بیشتر از عرض جغرافیایی، و در فصل تابستان 25° کمتر از عرض جغرافیایی و در بهار صفر باشد. برای این



مرحله سوم: آماده‌سازی و بسط روابط در کل سال و در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف جهت یافتن مقادیر شیب بهینه در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف و در بازه زمانی یک ساله.
مرحله چهارم: استخراج روابط از نتایج حاصل شده در مرحله سوم و صحت سنجی روابط.

۲- بررسی تئوری و تجربی شیب بهینه کلکتور لوله خلاء در یک مکان مشخص و زمان معین
در این بخش کلکتور لوله خلاء به صورت تئوری و تجربی و با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۲ مشخصات و متغیرهای مسئله

مشخصات لوله خلاء	قطر داخلی: ۴۳ میلی‌متر قطر خارجی: ۵۸ میلی‌متر طول: ۱/۸ متر
دامنه تغییرات شیب	۱۰ تا ۸۰ درجه
فاصله تغییرات	۱۰ درجه
موقعیت جغرافیایی	شهر اصفهان طول جغرافیایی: ۳۲/۶ درجه عرض جغرافیایی ۵/۱۶ درجه
زمان	۱۳۹۴/۲/۱۵ هجری شمسی مطابق با ۵ می ۲۰۱۵ میلادی بازه زمانی اول: ۱۰:۳۰' تا ۱۱:۳۰' بازه زمانی دوم: ۱۲:۳۰' تا ۱۳:۳۰' (مقتارن نسبت به نیمروز محلی) زمان نیمروز محلی (ظهر شرعی): ۱۳:۰۰
سیال عامل	آب ظرفیت گرمایی ۴۱۸۶ ژول بر کیلوگرم کلونین جرم: ۲/۵ کیلوگرم
پارامتر مورد بررسی	دما (بر حسب درجه سلسیوس) هر ۵ دقیقه

۲-۱- بررسی تئوریک مسئله

برای بررسی تغییرات دما از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$Q_T = mc_p \Delta T \quad (4)$$

مطابق شکل ۱ اگر دسته پرتوی نور خورشید با شدت تابش I_b به سطح یک کلکتور لوله خلاء برخورد کند مقدار انرژی که جذب جزء سطح با زاویه $d\lambda$ می‌شود از قاعده ضرب داخلی پیروی می‌کند و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

زاویه‌ای است که سهم خورشیدی سالیانه برای سامانه‌های خورشیدی را بیشینه می‌کند [۹].

سال ۲۰۰۹- اسکیکر در تحقیقات خود دریافت که کارایی یک گردآور خورشیدی، به موقعیت آن (با توجه به خط استوا) و زاویه شیب آن با سطح افق (با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه)، مرتبط است [۱۰].

سال ۲۰۰۹- رونشینگ تانگ و همکارانش در مقاله‌ای با عنوان شیب بهینه در کلکتورهای لوله خلاء خورشیدی؛ عوامل موثر بر شیب بهینه خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که عوامل بسیاری از جمله نوع کلکتور، فاصله مرکزی بین لوله‌ها، قطر داخلی و خارجی لوله و شیب کلکتورها بر روی جذب انرژی این نوع از کلکتورها تأثیرگذار است. بر اساس این تحقیق؛ بر خلاف کلکتورهای صفحه تخت، کلکتورهای لوله خلاء بایستی با شیبی کمتر از عرض جغرافیایی، نصب شوند تا بیشترین دریافت انرژی را داشته باشند [۱۱].

سال ۲۰۱۳- درهمایی و همکارش با استفاده از داده‌های تابشی ۴ سال بر روی یک سطح افقی در ۳۵ سایت کشورهای مختلف منطقه مدیترانه؛ روابط زیر را پیشنهاد کردند [۱۲].

$$\beta_{opt} = 1.25351 \times \varphi \quad (2)$$

$$\beta_{opt} = 1.25351 \times \varphi - 0.00728944 \times \varphi^2 \quad (3)$$

سال ۲۰۱۴- خدیم و همکارانش با استفاده از وبسایت‌های Google Earth و NASA توانستند پژوهشی را پیرامون شیب بهینه جذب‌های خورشیدی در کشور عراق انجام دهند. آنها دریافتند که شیب بهینه سالانه تقریباً ۲ تا ۳ درجه با عرض جغرافیایی و شیب بهینه ماهانه نیز در استان‌های مختلف عراق از ۱ تا ۸ درجه با عرض جغرافیایی فاصله دارد [۱۳].

سال ۲۰۱۵- دورین و همکارانش نیز با استفاده از یک مدل ریاضی بر مبنای رابطه هتل و ورتز و همچنین مدل لیو و جردن توانستند ارتباط شیب بهینه را با عرض جغرافیایی به دست آورند. آنها همچنین توانستند تأثیر بازتابش زمین را نیز مورد بررسی قرار دهند [۱۴].

۲-۱- اهمیت و اهداف پژوهش حاضر

از آنجا که کلکتورهای لوله خلاء خورشیدی در ایران کاربردی وسیع دارند و از طرفی سازه این گونه کلکتورها ثابت و در برخی موارد متناسب با محل نصب نمی‌باشد؛ و از طرفی تحقیقات صورت گرفته بیشتر پیرامون کلکتورهای صفحه تخت است. لذا این پژوهش جهت به دست آوردن رابطه‌ای جهت ارتباط بین زاویه بهینه کلکتورهای لوله خلاء و عرض جغرافیایی محل نصب انجام گرفت تا سازندگان و نصب‌کنندگان اینگونه کلکتورها با تنظیم درست کلکتور، کارایی آن را افزایش دهند.

۳-۱- مراحل انجام پژوهش

این پژوهش در چهار مرحله صورت گرفته است که عبارتند از:

- مرحله اول: بررسی تئوری و تجربی شیب بهینه کلکتور لوله خلاء در یک مکان مشخص و زمان معین.
- مرحله دوم: مقایسه نتایج تئوری و تجربی جهت اطمینان از قدرت حل مسئله توسط روابط تئوری انتخاب شده.



$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0.09 K_T & \text{for } K_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604K_T + 4.388K_T^2 & \text{for } 0.22 \leq K_T \leq 0.8 \\ -16.683K_T^3 + 12.336K_T^4 & \text{for } K_T > 0.8 \\ 0.165 & \end{cases} \quad (9)$$

در رابطه فوق

$$K_T = 0.53$$

و مقدار I نیز از رابطه ۱۰ قابل محاسبه است [۱۵].

$$K_T = \frac{I}{I_0} \quad (10)$$

برای استفاده از این رابطه نیز، یافتن مجهول I_0 الزامی است که می توان آن را از رابطه ۱۱ به دست آورد [۱۵].

$$I_0 = \frac{12 \times 3600 G_{SC}}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \times \left(\cos \delta \times \cos \varphi \times (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \varphi \sin \delta \right) \quad (11)$$

در این رابطه $G_{SC} = 1367 \text{ W/m}^2$ ؛

n ، نیز با توجه به روز انجام آزمایش برای بررسی شیب (پانزدهم اردیبهشت، مطابق با پنجم می) محاسبه می شود [۱۵].

$$n = 120 + i \begin{cases} i = 5 & \rightarrow & n = 125 \\ i = 17 & \rightarrow & n = 137 \end{cases} \quad (12)$$

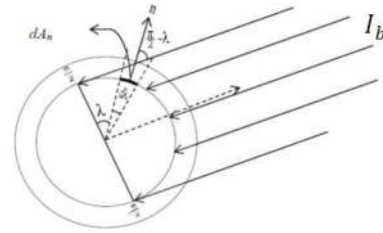
δ ، از رابطه (۱۳) (رابطه Copper) و با توجه به مقادیر n محاسبه شده؛ به صورت زیر به دست می آید [۱۵].

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \begin{cases} \text{for } n = 125 \rightarrow \delta = 16.1114^\circ \\ \text{for } n = 137 \rightarrow \delta = 19.2636^\circ \end{cases} \quad (13)$$

φ ، از آنجا که آزمایش در شهر اصفهان انجام گرفته لذا مقدار عرض جغرافیایی (φ)، برابر با عرض جغرافیایی شهر اصفهان است و بنابراین برابر است با $\varphi = 32.6^\circ$.

ω_1 و ω_2 ، همانگونه که در تشریح آزمایش نیز اشاره گردید، آزمایش در دو بازه زمانی متفاوت انجام شده است.

الف) بازه زمانی اول از ساعت ۱۰:۳۰ تا ۱۱:۳۰ با فواصل زمانی ۵ دقیقه ای و نیمروز محلی ساعت ۱۳:۰۰ و چون هر یک ساعت فاصله از نیمروز محلی برابر ۱۵ درجه در زاویه ساعت است لذا مقادیر ω_1 از رابطه ۱۴ و مقدار ω_2 از رابطه ۱۵ برابر است با:



شکل ۱ نمای مقطع برش خورده لوله به هنگام تابش مستقیم

$$dQ_b = dA_n \cdot I_b \rightarrow \int dQ_b = \int dA_n \cdot I_b \rightarrow Q_b = A_n \cdot I_b \quad (5)$$

در کلکتورهای لوله خلاء همواره نیمی از محیط لوله در معرض تابش مستقیم خورشید قرار دارد و مساحت مربوطه به صورت زیر محاسبه می شود.

$$dA_n = L \times \frac{D_2}{2} \times d\lambda \rightarrow A_n = L \times \frac{D_2}{2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} d\lambda = L \frac{D_2}{2} \pi \quad (6)$$

در خصوص مساحت بخشی از لوله که پرتوهای منعکس شده و پرتوهای پراکنده را جذب می کند نظر دقیقی نمی توان داد، لذا با فرض اینکه همواره نیمی از مساحت لوله درگیر جذب انرژی است برای محاسبه انرژی کل دریافتی نیز مشابه رابطه ۶ عمل می کنیم و بنابراین کل انرژی دریافتی عبارت است از:

$$Q_{total} = A_n \cdot I_{total} \quad (7)$$

با توجه به اینکه کلکتورهای لوله خلاء از تابش مستقیم، پراکنده و بازتابش شده از زمین بهره می برد؛ لذا جهت تحلیل تئوریک مسئله از روابط مدل آسمان غیر همسانگرد (غیرایزوتروپیک) که مدلی بهبود یافته تلقی می شود و توسط داویس (Davies) و های (Hay) در سال ۱۹۸۰ ارائه گردیده است [۱۵] استفاده می شود تا مقدار تابش ساعتی بر روی یک کلکتور لوله خلاء شبیدار محاسبه گردد.

در این مدل؛ بازتابش زمین بر اساس جنس سطح زمین در نظر گرفته می شود و همچنین مقادیر پارامترهای مطرح شده برای شهر اصفهان (شهر مورد بررسی) موجود می باشد. از طرفی برنامه نویسی و حل این مسئله نیز پیچیدگی سایر روش ها را ندارد. براساس این مدل، تابش روی سطح شبیدار شامل سه مؤلفه است. مستقیم (همسانگرد و غیرهمسانگرد)، پراکنده (همسانگرد و غیرهمسانگرد) و تابش خورشیدی که به طور پراکنده از زمین منعکس می شود.

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (8)$$

برای اینکه بتوان I_T را محاسبه کرد؛ ابتدا لازم است که A_i و R_b ، I_b ، I_d محاسبه گردد.

محاسبه I_d : برای محاسبه I_d از رابطه ۹ (رابطه همبستگی اریبس [۱۵]) استفاده می کنیم.



محدوده زمانی دوم: شروع آزمایش از ساعت ۱۲:۳۰ دقیقه و پایان آزمایش ساعت ۱۳:۳۰ دقیقه است.



شکل ۲ آرایش کلکتورهای لوله خلاء در شیب‌های ۱۰ تا ۸۰ درجه

$$\omega_1 = 10.5 - 13 = -2.5 \times 15^\circ = -37.5^\circ \quad (14)$$

$$\omega_2 = 11.5 - 13 = -1.5 \times 15^\circ = -22.5^\circ \quad (15)$$

$$\Delta\omega = \frac{5}{60} \times 15 = 1.25 \quad (16)$$

ب) بازه زمانی دوم از ساعت ۱۲:۳۰ تا ساعت ۱۳:۳۰ که در این حالت نیز مقادیر ω_1 از رابطه ۱۷ و ω_2 از رابطه ۱۸ برابر است با:

$$\omega_1 = 12.5 - 13 = -0.5 \times 15^\circ = -7.5^\circ \quad (17)$$

$$\omega_2 = 13.5 - 13 = 0.5 \times 15^\circ = 7.5^\circ \quad (18)$$

و I_b ، با توجه به این نکته که تابش کل خورشیدی مجموع دو تابش پراکنده و مستقیم است لذا داریم [۱۵]:

$$I_b = I - I_d \quad (19)$$

A_i ، به کمک رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۵]:

$$A_i = \frac{I_{bn}}{I_{on}} = \frac{I_b}{I_o} \quad (20)$$

R_b ، نیز از رابطه ۲۱ محاسبه می‌گردد [۱۵].

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \times \sin \delta}{\cos \varphi \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin \varphi \times \sin \delta} \quad (21)$$

β نیز دارای مقدار متغییر بوده و از ۱۰ درجه تا ۸۰ درجه با اختلاف ۱۰ درجه تغییر می‌کند. برای اینکه بتوان ΔT را در بازه‌های ۵ دقیقه‌ای محاسبه کرده و اطلاعات دقیقی از روند افزایش دما در داخل لوله‌های خلاء داشت؛ از نرم افزار متلب استفاده می‌شود و با نوشتن برنامه‌ی محاسباتی مناسب امکان انجام محاسبات فراهم می‌شود.

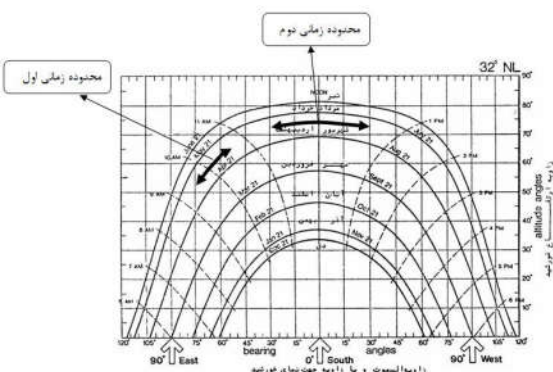
نتایج حاصل از انجام بررسی تئوری در شکل‌های ۴ تا ۱۲ و به تفکیک شیب ارائه گردیده است.

۲-۲- بررسی تجربی مسئله

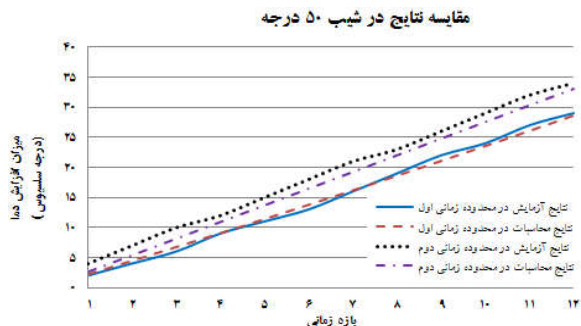
در این آزمایش پارامتر مورد تغییر و بررسی، شیب کلکتور لوله خلاء است. همانگونه که در بیان مسئله نیز تشریح گردید و در شکل ۲ نیز نشان داده شده است؛ ابتدا کلکتورها در فاصله مناسب از همدیگر (به دلیل تأثیر ناپذیری از سایه یکدیگر) رو به جهت جنوب و با زوایای مختلف نسبت به افق از ۱۰ تا ۸۰ درجه و با اختلاف ۱۰ درجه از یکدیگر نصب می‌گردد. در بالای هر کدام از لوله‌ها دماسنجی قرار داده می‌شود و دمای هر لوله، به فاصله زمانی ۵ دقیقه ثبت می‌گردد. بدلیل افزایش قابل توجه دما در مدت زمان کوتاه؛ امکان انجام آزمایش در کل روز وجود ندارد و بنابراین در دو محدوده زمانی بررسی صورت می‌گیرد. محدوده زمانی اول: شروع آزمایش از ساعت ۱۰:۳۰ و پایان آزمایش ساعت ۱۱:۳۰ دقیقه است.

با توجه به اینکه نیمروز محلی (ظهر شرعی) در ساعت ۱۳:۰۰ (زمان‌های روی نمودار بر اساس زمان خورشیدی است بدین معنا که ظهر معادل ساعت ۱۲:۰۰ خورشیدی است و با زمان رسمی در روز آزمایش یک ساعت اختلاف وجود دارد) اتفاق می‌افتد، و از طرفی منحنی حرکت روزانه خورشید نسبت به ساعت نیمروز محلی متقارن است لذا این دو محدوده زمانی، دو محدوده زمانی مناسب می‌باشند و تغییرات تابش را هم در صبح (و به علت تقارن عصر) و هم در ظهر (هنگام گذر از خط تقارن نمودار حرکت خورشید) مورد ارزیابی قرار می‌دهد. شکل ۳ محدوده زمانی انجام آزمایش را بر روی نمودار حرکت خورشید در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه شمالی (نزدیک‌ترین نمودار به شهر اصفهان) نشان می‌دهد.

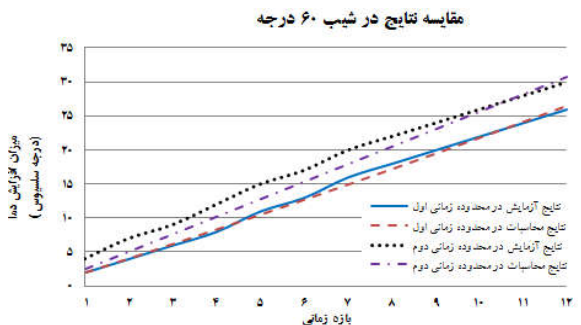
نتایج حاصل از انجام بررسی تجربی در شکل‌های ۴ تا ۱۲ و به تفکیک شیب ارائه گردیده است.



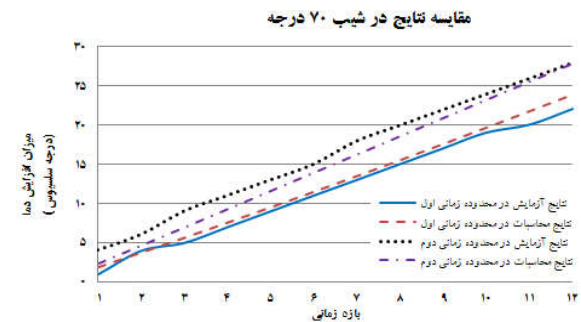
شکل ۷ روند تغییرات دما حاصل از آزمایش و محاسبات در دو محدوده زمانی برای شیب ۴۰ درجه



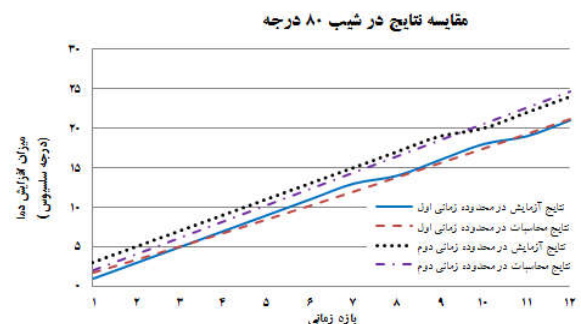
شکل ۸ روند تغییرات دما حاصل از آزمایش و محاسبات در دو محدوده زمانی برای شیب ۵۰ درجه



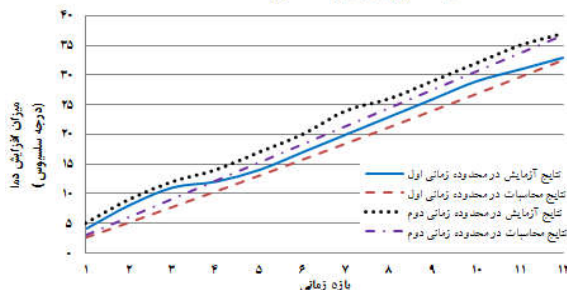
شکل ۹ روند تغییرات دما حاصل از آزمایش و محاسبات در دو محدوده زمانی برای شیب ۶۰ درجه



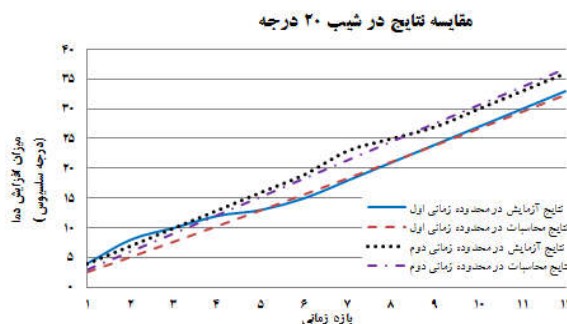
شکل ۱۰ روند تغییرات دما حاصل از آزمایش و محاسبات در دو محدوده زمانی برای شیب ۷۰ درجه



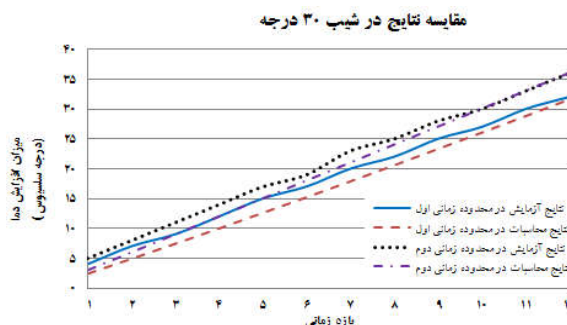
شکل ۳ نمایش محدوده زمانی پژوهش بر روی نمودار مسیر حرکت خورشید در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه شمالی مقایسه نتایج در شیب ۱۰ درجه



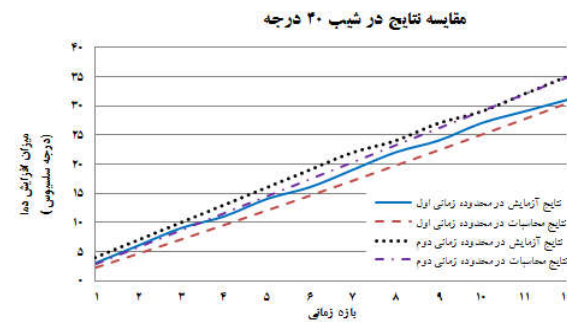
شکل ۴ روند تغییرات دما حاصل از آزمایش و محاسبات در دو محدوده زمانی برای شیب ۱۰ درجه



شکل ۵ روند تغییرات دما حاصل از آزمایش و محاسبات در دو محدوده زمانی برای شیب ۲۰ درجه

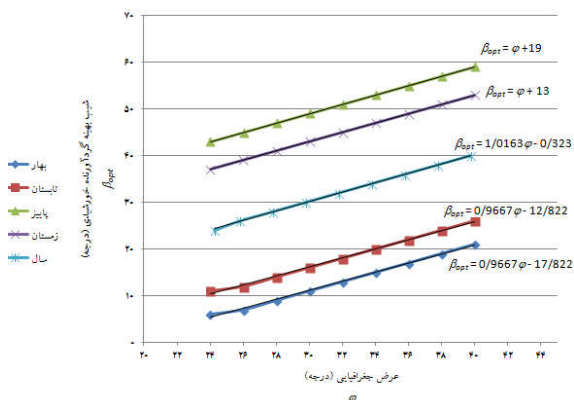


شکل ۶ روند تغییرات دما حاصل از آزمایش و محاسبات در دو محدوده زمانی برای شیب ۳۰ درجه



۴۰° ۲۱ ۲۶ ۵۹ ۵۳ ۳۹/۷۵

شکل ۱۱ روند تغییرات دما حاصل از آزمایش و محاسبات در دو محدوده زمانی برای شیب ۸۰ درجه



شکل ۱۲ منحنی تغییرات زاویه بهینه بر حسب عرض جغرافیایی به صورت فصلی و سالیانه

روابط به دست آمده از این نمودار (رابطه ۲۲)، بیانگر ارتباط خطی بین شیب بهینه فصلی و سالیانه با عرض جغرافیایی است.

$$\beta_{opt} = \begin{cases} 0.9667 \times \varphi - 17.822 & \text{بهار} \\ 0.9667 \times \varphi - 12.822 & \text{تابستان} \\ \varphi + 19 & \text{پاییز} \\ \varphi + 13 & \text{زمستان} \\ 1.0163 \times \varphi - 0.323 & \text{سالیانه} \end{cases} \quad (22)$$

در رابطه ۲۲ اگر مقادیر اعشاری را گرد کرده، رابطه ۲۳ که بسیار صریح و ساده و کاربردی است؛ حاصل می‌گردد.

$$\beta_{opt} = \begin{cases} \varphi - 18 & \text{بهار} \\ \varphi - 13 & \text{تابستان} \\ \varphi + 19 & \text{پاییز} \\ \varphi + 13 & \text{زمستان} \\ \varphi & \text{سالیانه} \end{cases} \quad (23)$$

لازم به ذکر است با توجه به اینکه محدوده استفاده از روز میانی که در محاسبات این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته تا عرض جغرافیایی ۶۶/۵ درجه است؛ لذا روابط به دست آمده (رابطه ۲۲ و ۲۳) نیز تا عرض جغرافیایی ۶۶/۵ درجه معتبر می‌باشد.

۵- صحت سنجی روابط به دست آمده

در این بخش برای اینکه صحت روابط (۲۲ و ۲۳) مورد ارزیابی قرار بگیرد؛ این روابط را با اطلاعات به دست آمده از سایت سازمان ملی هوا فضا آمریکا

۲-۳- مقایسه نتایج حاصل از بررسی تئوری و تجربی مسئله

همانگونه که از شکل‌های ۴ تا ۱۱ مشاهده می‌شود؛ چه در محدوده زمانی اول و چه در محدوده زمانی دوم، هر چند اختلافاتی بین مقادیر تئوری و تجربی مشاهده می‌شود که البته این امر ناشی از دقت آزمایش (۱ درجه سیلیسیوس) و همچنین ثابت در نظر گرفتن مقدار ظرفیت ویژه آب است ولی؛ الگوی روند تغییرات دمایی در شیب‌های مختلف تشابه خوبی دارند و چنین می‌توان نتیجه گرفت که مدل آسمان غیر همسانگرد (غیرایزوتروپیک) داویس (Davies) و های (Hay) جهت بررسی کلکتورهای لوله خلاء در طول سال، مدلی مناسب و قابل اطمینان است.

۳- بررسی شیب بهینه کلکتور لوله خلاء در طول یک سال و در عرض‌های جغرافیایی مختلف

با توجه به اینکه گستره جغرافیایی ایران از عرض جغرافیایی ۲۵ درجه و ۳ دقیقه شمالی تا ۳۹ درجه و ۳۷ دقیقه شمالی است [۱۶]؛ لذا جهت دقیق‌تر شدن محاسبات دامنه تغییرات عرض جغرافیایی در محدوده ۲۴ درجه تا ۴۰ درجه شمالی در نظر گرفته شده است.

در این مرحله، به کمک نرم افزار متلب برنامه‌ای تهیه گردیده که با استفاده از مدل آسمان غیرهمسانگرد، محاسبات تئوری مسئله را در طول یک سال انجام داده و اطلاعات خروجی از این برنامه، شیب بهینه در عرض‌های جغرافیایی مختلف است. نتایج حاصل از این بررسی در جدول ۳ ارائه گردیده است.

۴- یافتن ارتباط بین شیب بهینه و عرض جغرافیایی

با عبور دادن خط بهینه از داده‌های مذکور در جدول ۳ می‌توان ارتباط بین زاویه شیب بهینه و عرض جغرافیایی را به تفکیک فصول و همچنین برای کل سال به دست آورد.

نمودار شکل ۱۲ ارتباط خطی بین زاویه شیب بهینه سالیانه و فصلی را با عرض جغرافیایی از ۲۴ درجه تا ۴۰ درجه شمالی نشان می‌دهد.

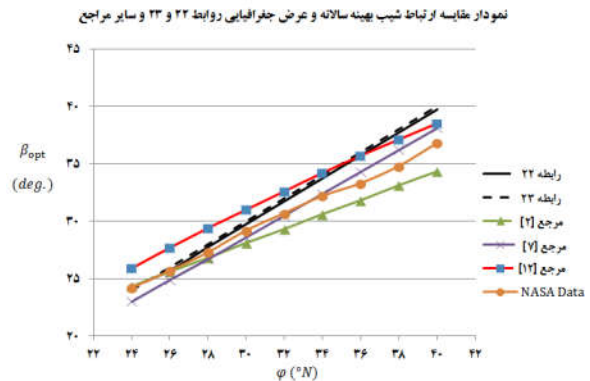
جدول ۳ مقدار زاویه (بر حسب درجه) شیب بهینه سالیانه و فصلی محاسبه شده برای کلکتورهای لوله خلاء برای عرض‌های جغرافیایی ۲۴ تا ۴۰ درجه شمالی

عرض جغرافیایی (شمالی)	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	زاویه بهینه سالیانه
۲۴°	۶	۱۱	۴۳	۳۷	۲۴/۲۵
۲۶°	۷	۱۲	۴۵	۳۹	۲۵/۷۵
۲۸°	۹	۱۴	۴۷	۴۱	۲۷/۷۵
۳۰°	۱۱	۱۶	۴۹	۴۳	۲۹/۷۵
۳۲°	۱۳	۱۸	۵۱	۴۵	۳۱/۷۵
۳۴°	۱۵	۲۰	۵۳	۴۷	۳۳/۷۵
۳۶°	۱۷	۲۲	۵۵	۴۹	۳۵/۷۵
۳۸°	۱۹	۲۴	۵۷	۵۱	۳۷/۷۵



نسبت قطر خارجی به قطر داخلی کلکتور لوله خلاء	ضریب اعمالی
$\frac{D_2}{D_1} = \frac{58}{43} = 1.35$	1.34

(NASA¹) و تحقیقات پیشین مورد مقایسه قرار می‌دهیم. این مقایسه در نمودار شکل ۱۳ به صورت سالانه ارائه گردیده است.



شکل ۱۳ نمودار مقایسه نتایج حاصل از روابط ۲۲ و ۲۳ با مراجع معتبر

لازم به ذکر است که جهت محاسبه مقدار شیب بهینه سالانه از رابطه (۴) میانگین مقادیر فصلی لحاظ گردید و جهت استفاده از روابط نیچه گوردو (مراجع ۱۰) که در جدول ۱ ارائه گردیده، میانگین مقادیر ماهیانه مورد استفاده قرار گرفت.

همانگونه که در شکل ۱۳ نیز مشاهده می‌شود روابط به دست آمده از دقت خوبی خصوصاً در عرض‌های جغرافیایی پایین دارند و بنابراین می‌توان از این روابط با اطمینان جهت نصب آبگرمکن‌های خورشیدی لوله خلاء استفاده کرد.

۶- نتایج و پیشنهادات

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که ارتباط بین عرض جغرافیایی و شیب بهینه نصب کلکتورهای لوله خلاء در محدوده کشور ایران خطی است و ارتباط بین این دو پارامتر در رابطه ۲۲ به طور دقیق و رابطه ۲۳ به صورت کاربردی ارائه گردید. بر اساس این روابط و نتایج پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردد. الف) پیشنهاد می‌گردد که طراحی و ساخت سازه‌های آبگرمکن خورشیدی برای عرض‌های جغرافیایی مختلف متناسب با همان عرض جغرافیایی ساخته شود.

ب) سازه آبگرمکنی طراحی و ساخته شود که قابلیت تغییر شیب بر اساس روابط ارائه شده در این پژوهش را داشته باشد.

از دیگر نتایج این پژوهش که در خلال محاسبات مربوط به مساحت دریافت انرژی در کلکتورهای لوله خلاء حاصل گردید؛ این است که چنانچه جهت محاسبه سطح دریافت انرژی از قطر خارجی استفاده شود، نتایج با مقادیر واقعی تطابق خوبی دارد، همچنین نتایج حاصل از انتخاب قطر داخلی نیز با اعمال یک ضریب ثابت با نتایج حاصل از انجام آزمایش انطباق دارد و این ضریب به نسبت دو قطر خارجی به داخلی کلکتور بسیار نزدیک است. مقادیر بیان شده در جدول ۴ این امر را بیان می‌کند. این امر نشان می‌دهد که هر چند مساحت سطحی که با جذب پوشش داده شده است با قطر داخلی قابل محاسبه است اما به نظر می‌رسد که در هنگام دریافت انرژی نوعی تمرکز از طریق جدار خارجی اتفاق می‌افتد. که این تمرکز با نسبت دو قطر در ارتباط است.

جدول ۴ مقایسه مقدار نسبت قطر خارجی به قطر داخلی و ضریب اعمالی به نتایج تئوری با در نظر گرفتن قطر داخلی کلکتور

۷- علایم

علائم انگلیسی

A_i	شاخص غیرهمسانگرد
n	عدد مربوط به روز سال
D_1	قطر داخلی کلکتور لوله خلاء
D_2	قطر خارجی کلکتور لوله خلاء
K_T	شاخص وضوح آسمان
R_b	نسبت تابش
I	تابش ساعتی
I_b	تابش مستقیم ساعتی
I_d	تابش پراکنده ساعتی
I_o	تابش خارج از جو
L	طول کلکتور لوله خلاء
G_{SC}	ثابت خورشیدی
m	جرم
ΔT	تغییرات دما
Q	انرژی
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه آب

علائم یونانی

β	زاویه شیب کلکتور
φ	عرض جغرافیایی
δ	زاویه انحراف یا میل خورشیدی
ρ_g	ضریب انعکاس (آلبدو) زمین
ω	زاویه ساعت
θ	زاویه برخورد

اندیس‌ها

opt	بهینه
S	مربوط به خورشید
T	سطح شیبدار
n	عمود بر راستای تابش
b	مستقیم
d	پراکنده
$total$	مقدار کل

۸- مراجع



- [1] ر. پوینده، م. ثقفی، م. اسدی خلیجی، شیب بهینه گردآورهای خورشیدی و مقایسه با حالت نصب شده روی نمای جنوبی در تهران، نشریه هنرهای زیبا، شماره ۴۴، سال ۱۳۸۹
- [2] A. Talebizadeh, M. A. Mehrabian, M. Abdolzadeh, Effect of Solar Angles on Incident Energy of the Flat Collectors, The Journal of Energy: Engineering & Management, No.4, 1391
- [3] ح. احترام، ع. آقایی، ح. خراسانی زاده، پتانسیل سنجی انرژی خورشیدی و تعیین زاویه بهینه کلکتورهای خورشیدی در شهر ارومیه، دومین همایش ملی انرژی باد و خورشید، تهران، ۱۳۹۱
- [4] ا. بهرامی، ک. عباسپور ثانی، تعیین زاویه شیب بهینه آرایه‌های خورشیدی در شرایط اقلیمی کرج، نشریه انرژی ایران، جلد ۱۵، شماره ۲، سال ۱۳۹۱
- [5] ع. ملکی، ر. رحیمی، ش. بشارتی، تعیین زاویه بهینه کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت برای خشک‌کن‌های خورشیدی در منطقه شهرکرد، هشتمین کنگره ملی ماشین‌های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون ایران، مشهد، سال ۱۳۹۲
- [6] ا. دلفان، ف. ویسی، م. یاراحمدی، بررسی تجربی تأثیر زاویه شیب بر عملکرد کلکتورهای خورشیدی آبگرمکن لوله خلاء، اولین کنفرانس و نمایشگاه بین‌المللی انرژی خورشیدی، تهران، سال ۱۳۹۳
- [7] N. Nijegorodov, K. R. S. Devan, P. K. Jain & S. Carlsson, Atmospheric Transmittance Models and an Analytical Method to Predict The Optimum Slope of an Absorber Plate, Variously Oriented at any Latitude, *Renewable Energy*, vol. 4, no. 5, 1994
- [8] M. M. EL-Kassaby, Monthly and daily optimum tilt angel for south facing solar collectors, theoretical model, experimental and empirical correlations, *Solar & Wind Technology*, vol. 5, no. 6, 1998
- [9] Shariah, A., M.A Al-Akhras, I.A Al-Oman, Optimizing the tilt angle of solar collectors, *Renewable Energy*, no. 26, 2002.
- [10] Skeiker, K, Optimization tilt angle and orientation for solar collectors in Syria, *Energy Conversion and Management*, No.50, 2009.
- [11] Runsheng Tang, Wenfeng Gao, Yamei Yu, Hua chen, Optimal tilt angels of all-glass evacuated tube solar collectors, *Energy*, no.43, 2009.
- [12] Hassane Darhamoui, Driss Lahjouji, Latitude Based Model for Tilt Angle Optimization for Solar Collectors in the Mediterranean Region, *Energy Procedia*, no.42, 2013.
- [13] Imad Jawad Khadim, Emad jaleel mahdi, Ali Hussian Ubaid, Determining Tilt Angel for Fixed Solar Panel to Sites of Iraq's Provinces by using the Programs on NASA and Google Earth Website, *Eng. & Tech. Journal*, no. 3, Vol. 32, part B, 2014.
- [14] Dorin Stanciu, Camelia Stanciu, Loana Paraschiv, Mathematical links between optimum solar collector tilts in isotropic sky for intercepting maximum solar irradiance, *Journal of Atmospheric and solar – Terrestrial Physics*, no. 137, 2015.
- [15] ج. ویلیام، ا.بکمن، مهندسی خورشیدی فرآیندهای حرارتی (جلد ۱)، انتشارات نوآور، تهران، ۱۳۹۳
- [16] سایت مرکز اطلاعات علمی اتمسفر ناسا، <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid>

