



طراحی، ساخت و بررسی عملکرد متمرکز کننده با نقطه کانونی ثابت شفلر در کرمان

محمدامین طالبی زاده^۱، ابراهیم جهانشاهی جواران^{۱*}، محمد رهنما^۲

^۱ پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
^۲ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۵ مرداد ۱۳۹۶
بازنگری: ۴ آبان ۱۳۹۶
پذیرش: ۸ آبان ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۲ آبان ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

انرژی خورشیدی
متمرکز کننده شفلر
دریافت کننده
تعقیب کننده
نقطه‌ی کانونی ثابت

چکیده: متمرکز کننده با نقطه کانونی ثابت شفلر در نقاط مختلف جهان در کاربرد های خانگی و صنعتی مورد استفاده قرار می گیرد. این متمرکز کننده دارای قاب بیضوی شکلی است و بنوعی طراحی شده است که می‌تواند با چرخش مناسب در طول سال، نقطه‌ی کانونی ثابتی داشته باشد. در این پژوهش، اصول طراحی و ساخت متمرکز کننده ایستاده شفلر به مساحت ۲/۷ مترمربع ارائه می‌شود. بدین منظور، متمرکز کننده و دریافت کننده‌ی آن به کمک نرم‌افزار سالیدورکز طراحی شدند. متمرکز کننده ساخته شده در روزهای مختلف و تحت شرایط متفاوت، مورد آزمایش قرار گرفت و راندمان حرارتی آن محاسبه گردید. نتایج نشان داد که متمرکز کننده با مساحت ۲/۷ مترمربعی قادر خواهد بود که تا ۹/۸۲ برابر تابش دریافتی در سطح افق را در نقطه‌ی کانونی، تابش فراهم کند. علاوه بر این، نتایج آزمایشات نشانگر آن هستند که متمرکز کننده قادر خواهد بود ۱۲ لیتر آب را در مدت زمان کمتر از ۲ ساعت در حالتی که دریافت کننده از رنگ مشکی و پوشش شیشه‌ای برخوردار است به نقطه‌ی جوش برساند. در این حالت راندمان حرارتی ۳۷٪ می‌باشد. در نهایت، از متمرکز کننده ایستاده جهت تأمین گرمایش ۱۰۰ لیتر آب نیز استفاده گردید و توانست دمای این مقدار آب را به ۶۰ درجه سلسیوس برساند.

۱- مقدمه

می‌باشد. امروزه متمرکز کننده‌ها بیشتر برای تولید حرارت مورد نیاز برای تولید بخار و در نهایت تولید توان الکتریکی به کمک توربین‌های بخار مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از متمرکز کننده‌های خورشیدی در صنایع به دلیل هزینه‌ی بالای آنها و وجود محدودیت‌هایی در این نوع سیستم‌ها تاکنون مورد استقبال صنایع قرار نگرفته است. پیش‌بینی می‌شود که در آینده‌ای نزدیک، صنایع برای کاهش مصرف انرژی خود و کاهش هزینه‌ی تولید، به استفاده از انرژی خورشیدی و متمرکز کننده‌های آن ترغیب شوند. متمرکز کننده‌های فعلی اگرچه دمای نسبتاً بالایی فراهم می‌کنند، اما هزینه‌های نصب و راه اندازی بالای آنها و همچنین پیچیدگی ساخت و متحرک بودن نقطه‌ی کانونی، راه را برای ورود این گونه متمرکز کننده‌ها به صنعت با مشکل روبه‌رو ساخته است. حال اگر بتوان به نحوی هزینه‌ی ساخت و نگهداری این گونه متمرکز کننده‌ها را کاهش داد و علاوه بر آن نقطه‌ی کانونی ثابتی را فراهم کرد، کاربرد های بیشتری از انرژی خورشیدی در صنایع حاصل خواهد شد که این مهم توسط متمرکز کننده‌های شفلر^۳ قابل انجام است.

تقریباً حدود ۳۰ سال پیش، دانشمند اتریشی ولفگانگ شفلر^۴، در این فکر بود که چگونه می‌توان نقطه‌ی کانونی ثابتی را برای متمرکز کننده‌های

تولید حرارت مورد نیاز در کاربردهای خانگی و صنعتی با استفاده از تشعشع خورشید معمول ترین روش استفاده از انرژی خورشیدی است. شاید بتوان گفت که استفاده از انرژی خورشیدی در صنایع کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. بعضی از صنایع برای تکمیل چرخه‌ی تولید خود نیاز به حرارت‌هایی با دمای پایین دارند، به طوری که محدوده‌ی دمای کاری آنها برای استفاده از انرژی خورشیدی بسیار مناسب می‌باشد. صنایعی از جمله صنایع لبنی، پاستوریزاسیون^۱، استریلیزاسیون^۲، سیستم‌های تهویه مطبوع، خشک کن‌ها، آب شیرین کن‌ها و غیره از این قبیل صنایع هستند. محدوده‌ی دمای کاری اکثر این صنایع بین ۶۰ °C تا ۲۷۰ °C است [۱]. آزمایش‌ها و مطالعات متعددی برای استفاده از کلکتورهای لوله خال در صنایع با این محدوده‌ی دمای کاری انجام شده است. کلکتورهای لوله خال اگرچه در دماهای پایین راندمان کاری خوبی دارند، اما برای کار به طور پیوسته آن هم در محدوده‌ی دمایی بالاتر به دلیل افزایش افت ناشی از افزایش سطح کلکتورها مناسب نیستند [۱]. استفاده از متمرکز کننده‌های خورشیدی راه دیگری برای کاربرد انرژی خورشیدی در صنایع با دمای کاری نسبتاً پایین

- 1 Pasteurization
- 2 Sterilization

- 3 Scheffler concentrator
- 4 Wolfgang scheffler

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: e.jahanshahi@kgut.ac.ir

آزمایش یک آب شیرین کن چند مرحله‌ای تبخیری^۲ با یک متمرکز کننده‌ی شفلر پرداختند. در این سیستم آن‌ها از دو متمرکز کننده‌ی خورشیدی که مساحت هر کدام ۱۶m^2 بود جهت تولید بخار در مرحله‌ی اول در فشار ۸ بار که این فشار به‌طور مرحله‌ی در چهار مرحله به ۱ بار کاهش پیدا می‌کرد جهت شیرین سازی آب استفاده کردند. نتایج این پروژه نشان داد که پتانسیل فراوانی جهت تولید کردن آب شیرین توسط متمرکز کننده‌های شفلر وجود دارد [۳].

در سال ۲۰۱۰ مونی^۳ و همکاران [۱]، اصول طراحی و ساخت متمرکز کننده‌ای به مساحت ۸ مترمربعی را بیان کردند. محاسبات ریاضی جهت طراحی معادله‌ی سهمی متمرکز کننده و قاب بیضی شکل آن نسبت به اعتدال بهاری ارائه گردید. همچنین، معادلات مربوط به میله‌های میانی^۴ و سایر پارامترهای مهم آن‌ها از قبیل طول کمان، عمق و شعاع آن‌ها محاسبه گردید. علاوه بر آن، معادلات سهمی متمرکز کننده در دو حالت زمستانی و تابستانی در نیم‌کره‌ی شمالی برای یک متمرکز کننده ایستاده ارائه گردید.

پاتیل^۵ و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۳، به مطالعه‌ی عملکرد متمرکز کننده‌ی ۸ متر مربعی شفلر به کمک مخزنی با قطر بالا و حجم تقریبی ۲۰ لیتر که هم نقش لوله‌ی جاذب و هم نقش مخزن ذخیره را هم زمان بر عهده داشت پرداختند. عملکرد متمرکز کننده‌ی مذکور در شهر بنگلور^۶ هندوستان مورد بررسی قرار گرفت. مقدار دمایی بیشینه‌ی آب $۹۴\text{ }^\circ\text{C}$ در روز صاف کاملاً آفتابی با دمای محیط بین $۲۸\text{ }^\circ\text{C}$ تا $۳۱\text{ }^\circ\text{C}$ گزارش شده است. همچنین، آن‌ها به آنالیز ابعادی و مدل سازی ریاضی جهت تعیین پارامترهای وابسته و مستقل در عملکرد این نوع متمرکز کننده پرداختند.

پاتیل^۷ و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۴، بر اساس داده‌های آزمایشگاهی رابطه‌ای بین متغیرهای مختلف متمرکز کننده‌ی شفلر را ارائه کردند. متمرکز کننده‌ی شفلر بر اساس داده‌های آزمایشگاهی در بنگلور هندوستان مورد مطالعه قرار گرفت و به کمک آنالیز ابعادی معادله‌ای برای متغیرهای مستقل و وابسته‌ی متمرکز کننده شفلر ارائه گردید.

فاته^۸ و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۴، به بررسی عملکرد یک متمرکز کننده‌ی $۲/۷\text{m}^2$ پرداختند. آن‌ها از ظرف آبی به حجم ۱۰ لیتر برای انجام آنالیز خود استفاده کردند. آنالیز عملکرد متمرکز کننده‌ی مذکور، مقدار توان متوسط ۵۵۰ W و راندمان ۱۹٪ را برای جوشاندن آب نشان داد. همچنین، آنالیز ابعادی و مدل سازی ریاضی برای پیدا کردن ارتباط بین متغیرهای وابسته و مستقل انجام گردید. آنالیز ابعادی نشان داد که دمای تولیدشده به حاصل ضرب زاویه در مساحت دیش بر سرعت باد بستگی دارد.

مونی^۹ و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۴، یک سیستم تقطیر خورشیدی جهت

خورشیدی ایجاد کرد تا بتوان به راحتی از انرژی خورشید در کاربردهای مختلف استفاده کرد. در واقع با ثابت شدن نقطه‌ی کانونی استفاده‌های فراوانی می‌توان در زمینه‌های مختلف از انرژی خورشیدی کرد. خورشید به دلیل حرکت وضعی زمین در آسمان ثابت نیست و پیوسته در حال حرکت است. یک راه برای توقف حرکت در هنگام چرخش این است که ناظر در مرکز محور دوران قرار گیرد. در واقع اگر نقطه‌ی کانونی متمرکز کننده دقیقاً در محور چرخش متمرکز کننده قرار گیرد در این صورت است که می‌توان نقطه‌ی کانونی را ثابت نگه داشت.

شکل ۱ شماتیکی از متمرکز کننده شفلر را نشان می‌دهد [۲]. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود از آنجایی که زمین حول محوری که از شمال به سمت جنوب قرار دارد به دور خود می‌چرخد، متمرکز کننده‌ی شفلر هم حول محوری که موازی محور چرخش زمین قرار دارد در جهت مخالف آن باید دوران کند. سرعت چرخش متمرکز کننده یک دور بر روز می‌باشد و یا به عبارتی چون شب‌ها از انرژی خورشیدی استفاده نمی‌شود نیم دور در روز باید متمرکز کننده گردش کند. با این روش می‌توان نقطه‌ی کانونی ثابتی را همواره ایجاد کرد. این حرکت روزانه‌ی دیش را می‌توان به کمک مکانیزم‌هایی کنترل کرد [۲].

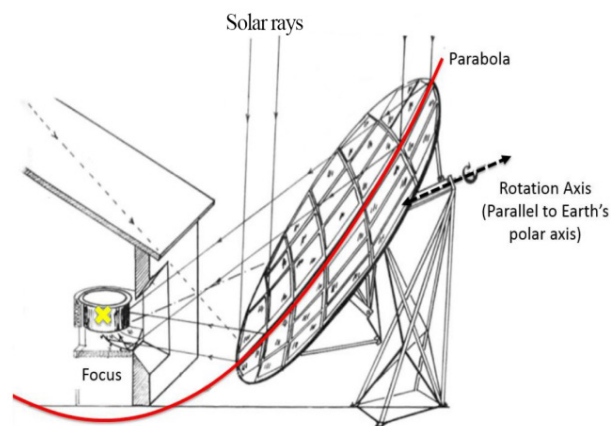


Fig. 1. Schematic of a Scheffler concentrator

شکل ۱: شماتیکی از یک متمرکز کننده‌ی شفلر [۲]

متمرکز کننده‌های شفلر می‌توانند با هزینه‌ی خیلی کمتری نسبت به سایر متمرکز کننده‌ها با روش‌های ساده‌تری ساخته شوند به طوری که ساخت آن‌ها برای کشورهای در حال توسعه بسیار مطلوب می‌باشد. اطلاعات خاصی از تعداد متمرکز کننده‌های نصب شده در جهان موجود نیست اما به طور تقریبی حدود ۸۰۰۰m^2 متمرکز کننده‌ی شفلر در جهان نصب گردیده است [۲].

علیرغم اینکه این متمرکز کننده‌ها در مناطق مختلف جهان به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند ولی مطالعات زیادی در این زمینه در مراجع یافت نمی‌شود. چانداک^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۹، به طراحی و

2 Multistage Evaporator Desalination (MED)

3 Munir

4 Crossbars

5 Patil

6 Bengaluru

7 Patil

8 Phate

1 Chandak

پارامترهای طراحی متمرکز کننده انجام می‌پذیرد. شایان ذکر است که تمام معادلات ارائه شده در این بخش برای متمرکز کننده با هر سطح مقطعی قابل استفاده می‌باشند. هنگام طراحی معادله‌ی سهمی برای دیش شفلر تمامی محاسبات بر اساس اعتدال بهاری و زاویه‌ی انحراف صفر انجام می‌شود. نمای جانبی سهمی اصلی، دیش و قاب اطراف آن مطابق شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد [۸].

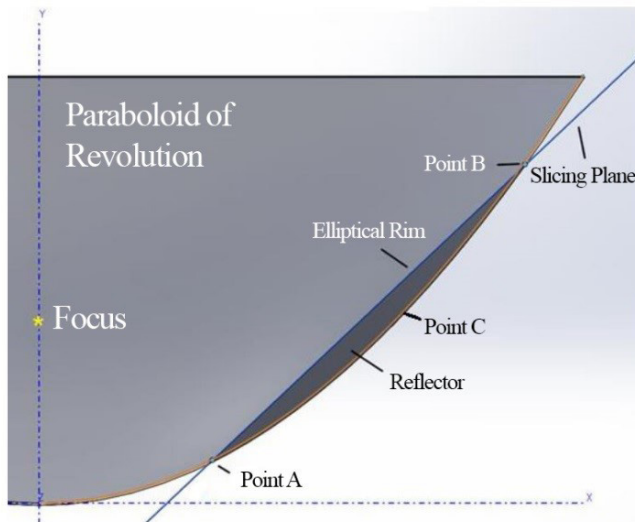


Fig. 2. Side view of Scheffler concentrator parabola
شکل ۲: نمای جانبی سهمی متمرکز کننده‌ی شفلر [۸].

به طور کلی معادله‌ی سهمی به شکل زیر است:

$$P(x) = m_p x^2 + C_p \quad (1)$$

که در این معادله m_p شیب سهمی و C_p عرض از مبدأ آن می‌باشد. برای سهمی نشان داده‌شده در شکل ۲ عرض از مبدأ صفر است و لذا معادله (۱) به صورت ساده‌تری نوشته می‌شود:

$$P(x) = m_p x^2 \quad (2)$$

با چرخش این سهمی حول محور y به صورت سه بعدی سهمی اصلی تشکیل می‌شود. از تقاطع این سهمی با یک صفحه یک مقطع بیضی ایجاد می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است. قسمتی از سهمی که در اثر برخورد این صفحه ایجاد شده (قسمت تیره تر در شکل ۳) بنام دیش شفلر مشهور است.

با استفاده از محور تقارن دیش شفلر که روی سهمی بزرگ واقع است، می‌توان نقطه‌ای روی آن پیدا کرد بطوریکه شیب خط مماس بر آن در آن نقطه ۴۵ درجه باشد. در واقع این نقطه (C)، نقطه‌ای است که بازتاب پرتو ورودی به دیش با زاویه‌ی ۹۰ درجه به نقطه‌ی کانونی می‌رسد [۱]. این نقطه همچنین محور چرخش روزانه‌ی سیستم تعقیب کننده‌ی متمرکز کننده را تعریف می‌کند. نقطه‌ی مذکور باید در نزدیکی مرکز هندسی دیش باشد

گرفتن عصاره گیاهان را مورد استفاده قرار داده‌اند. سیستم از مجموعه‌ی متمرکز کننده‌های شفلر و یک مجموعه‌ی کامل تقطیر تشکیل شده است. یک متمرکز کننده‌ی $8m^2$ با یک سیستم تقطیر جهت جدا سازی عصاره‌ی گیاهان مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق، تمامی محاسبات ریاضی جهت طراحی یک سیستم تقطیر خورشیدی ارائه گردید. نتایج همچنین نشان داد که دمایی بالا در نقطه‌ی کانونی می‌تواند دمای ثابتی را برای سیستم تقطیر فراهم کند که شرایط کاری آن را بهبود می‌بخشد.

تا آنجایی که نگارندگان مقاله اطلاع دارند، متمرکز کننده شفلر در کشور ساخته نشده و این پژوهش برای اولین بار در داخل کشور انجام می‌شود و تاکنون محققین داخلی این گونه از متمرکز کننده‌ها را مورد مطالعه قرار نداده‌اند. یکی از موارد مهم در طراحی دیش شفلر با هر مساحت دلخواه تعیین نقاط ابتدایی و انتهایی متمرکز کننده می‌باشد. با بررسی منابعی که در زمینه دیش شفلر وجود دارد نمی‌توان این نقاط را با استفاده از معادلات ارائه شده در این منابع تعیین نمود. در این پژوهش معادلاتی برای تعیین نقاط ابتدا و انتهایی ارائه شده است و در ادامه برنامه‌ای در نرم‌افزار حلگر معادلات مهندسی^۱ طراحی شده که برای دست آوردن تمامی پارامترهای مؤثر در طراحی دیش می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و به کمک آن طراحی متمرکز کننده با هر مساحت دلخواه امکان پذیر خواهد بود. همچنین، سیستم ردیابی و مدار پیشنهادی برای گرمایش آب که در این مطالعه استفاده شده در مطالعات قبلی در این زمینه وجود ندارد.

عمده‌ی اهداف این پژوهش را که در زیر آورده شده است، در قسمت‌های بعدی مقاله ارائه می‌گردد:

- به دست آوردن اصول طراحی این نوع از متمرکز کننده‌ها
- محاسبه و طراحی یک دیش شفلر به مساحت تقریبی $2/7m^2$
- به دست آوردن اصول ساخت این گونه متمرکز کننده‌ها
- ساخت یک نمونه از دیش شفلر به مساحت تقریبی $2/7m^2$
- بررسی آزمایشگاهی عملکرد این نوع متمرکز کننده‌ها با توجه به شرایط اقلیمی شهر کرمان

۲- اصول طراحی متمرکز کننده شفلر

در این قسمت، به بیان اصول طراحی و محاسبات مربوط به سطح مقطع متمرکز کننده و طراحی و محاسبات ساختمان آن پرداخته می‌شود.

۲-۱- طراحی سطح مقطع متمرکز کننده

متمرکز کننده‌ی شفلر قسمتی از یک سهمی بزرگ با محور عمودی می‌باشد که در اثر برخورد یک صفحه با سهمی ایجاد می‌شود (شکل ۲). اولین قدم در طراحی متمرکز کننده‌ی شفلر، تصمیم گیری برای معادله‌ی سهمی و انتخاب نقاط شروع و پایان سطح دیش می‌باشد. در این پژوهش حل معادلات برای متمرکز کننده با سطح مقطع $2/7m^2$ برای محاسبه‌ی

1 Engineering Equation Solver (EES)

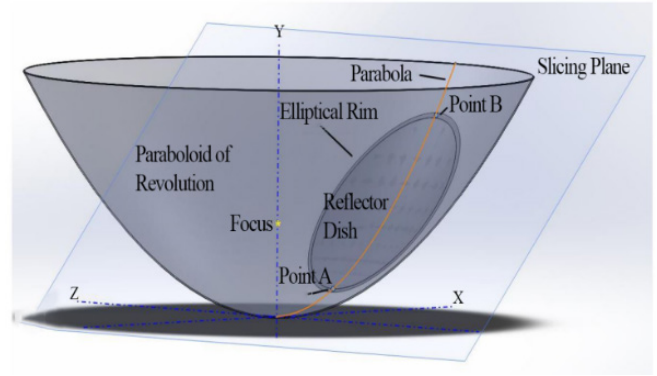


Fig. 3. Parabola forming Scheffler concentrator

شکل ۳: سهمی تشکیل دهنده متمرکز کننده شفلر [۸].

تا نسبت به محور چرخش روزانه متعادل باشد (شکل ۲). اگر این نقطه در نزدیکی مرکز جرم متمرکز کننده قرار داشته باشد چرخش آن حول محور تعقیب کننده روزانه با کمترین نیروی ممکن انجام می‌شود [۱].

یکی دیگر از نقاطی که در طراحی استفاده می‌شود، نقطه‌ی کانونی می‌باشد و همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود بر روی محور عمودی و در یک ارتفاع خاص قرار دارد. مختصات این نقطه را به روش زیر می‌توان به دست آورد. با یک بار مشتق‌گیری از رابطه‌ی (۲) رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$p(x) = 2m_p x \quad (3)$$

با توجه به معادله‌ی فوق و با توجه به اینکه شیب سهمی در نقطه‌ی C، ۴۵ درجه می‌باشد:

$$x_c = \frac{1}{2m_p} \quad (4)$$

از طرفی با جایگزینی رابطه‌ی (۴) در (۲) ارتفاع نقطه C بدست می‌آید:

$$y_c = \frac{1}{4m_p} \quad (5)$$

بنابراین مختصات کانون سهمی از روابط (۴) و (۵) به دست می‌آیند. برای دیش شفلر با مساحت تقریبی $2/7 \text{ m}^2$ ، مقادیر x_c ، y_c و m_p به ترتیب $۱/۶۶$ ، $۰/۸۳$ و $۰/۳۰$ به دست می‌آیند و در نهایت معادله‌ی سهمی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P(x) = 0.3x^2 \quad (6)$$

پس از به دست آوردن نقطه کانونی و معادله سهمی نوبت به تعیین نقاط A و B در شکل ۲ می‌رسد که باید آنها را به نحوی تعیین کرد که مساحت تقریبی دیش برابر $2/7 \text{ m}^2$ باشد و همچنین حول نقطه‌ی C تعادل داشته باشد. مقادیر ابتدا و انتهای دیش باید به نحوی انتخاب شوند که هر دو از نقطه‌ی C به یک فاصله باشند، یعنی طول کمان از نقطه‌ی A تا C با طول کمان از نقطه‌ی B تا C برابر باشد؛ و از طرفی دیگر طول کمان بین نقاط

A و B باید ۳۳٪ بیشتر از فاصله‌ی نقطه‌ی C تا کانون باشد [۶]. لازم به ذکر است که مقدار ۳۳٪ ذکر شده از تقسیم طول کمان بین نقاط A و B بر فاصله‌ی کانونی در مرجع [۱] به دست می‌آید.

هرچه نقاط A و B با فاصله‌ی بیشتری از هم انتخاب شوند نسبت فاصله‌ی کانونی به مساحت دیش کاهش می‌یابد، این امر انحنای دیش را کمتر می‌کند و کار را برای متمرکز سازی دیش راحت تر می‌سازد که این امر در واقع مقدار خطا از جهت ساخت دیش و متمرکز کردن پرتوی خورشید را کمتر می‌کند، اما اگر نقاط A و B نزدیک به هم انتخاب شوند فاصله‌ی کانونی به طور قابل توجهی، افزایش می‌یابد و انحنای دیش کمتر می‌شود. این امر نیاز به دقت بیشتری در ساخت دارد؛ اما مزایای زیادی از جمله توانایی متمرکز دیش در فواصل کانونی بیشتر را می‌دهد [۸].

حال برای انتخاب نقاط A و B و به دست آوردن طول کمان در سهمی به طریق زیر عمل می‌شود:

به طور کلی اگر $y=f(x)$ تابعی دلخواهی در مختصات کارترین باشد. طول کمان بین دونقطه از آن به کمک رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$L = \int_A^B \sqrt{1+(f'(x))^2} \quad (7)$$

که در معادله‌ی (۷)، L طول کمان بین نقاط A و B می‌باشد.

حال اگر معادله‌ی سهمی دیش به صورت $y=m_p x^2$ باشد، طول کمان به صورت زیر به دست می‌آید:

$$L = \int_A^B \sqrt{1+(2m_p x)^2} dx = \int_A^B \sqrt{1+(4m_p^2 x^2)} dx \quad (8)$$

با حل انتگرال فوق طول کمان تعیین می‌شود:

$$L = \frac{2m_p x \sqrt{4m_p^2 x^2 + 1} + \sinh^{-1}(2m_p x)}{4m_p} \Big|_A^B \quad (9)$$

با محاسبه‌ی عبارت فوق بین دو نقطه‌ی A و B می‌توان طول کمان را محاسبه کرد.

حال همان‌طور که گفته شد طول کمان بین نقاط A و B باید ۳۳٪ بیشتر از فاصله‌ی بین نقطه‌ی C با نقطه‌ی کانونی باشد. لذا:

$$1.33x_c = \frac{2m_p x_B \sqrt{4m_p^2 x_B^2 + 1} + \sinh^{-1}(2m_p x_B)}{4m_p} - \frac{2m_p x_A \sqrt{4m_p^2 x_A^2 + 1} + \sinh^{-1}(2m_p x_A)}{4m_p} \quad (10)$$

از طرفی، به منظور اینکه تعادل برای متمرکز کننده برقرار باشد طول کمان بین نقطه‌ی C و نقطه‌ی A باید با فاصله‌ی بین نقطه‌ی B و نقطه‌ی

C برابر باشد. لذا:

$$L_{AC} = \frac{2m_p x_C \sqrt{4m_p^2 x_C^2 + 1} + \sinh^{-1}(2m_p x_C)}{4m_p} - \frac{2m_p x_A \sqrt{4m_p^2 x_A^2 + 1} + \sinh^{-1}(2m_p x_A)}{4m_p} \quad (11)$$

همچنین:

$$L_{BC} = \frac{2m_p x_C \sqrt{4m_p^2 x_C^2 + 1} + \sinh^{-1}(2m_p x_C)}{4m_p} - \frac{2m_p x_B \sqrt{4m_p^2 x_B^2 + 1} + \sinh^{-1}(2m_p x_B)}{4m_p} \quad (12)$$

با مساوی قرار دادن و در نتیجه با توجه به معادله (۱۰) و حل این دو معادله در یک دستگاه معادلات می‌توان مختصات نقاط A و B را به دست آورد.

با توجه به اینکه نقاط A و B هر دو بر روی معادله سهمی قرار دارند با جایگذاری مختصات x به دست آمده از حل دستگاه در معادله سهمی می‌توان مختصات y آنها را نیز به دست آورد. برای دیش با مساحت $2/7 \text{ m}^2$ مقادیر x_A, x_B, y_A, y_B به ترتیب برابر با $0/77, 2/36, 0/18$ و $1/68$ به دست می‌آید. با داشتن مختصات نقاط A و B می‌توان معادله خطی که از نقاط A و B می‌گذرد و موازی با خط مماس بر دیش در نقطه C نیز هست را به دست آورد:

$$y_l = m_l x + b_l \quad (13)$$

که در آن m_l شیب خط و b_l عرض از مبدأ آن می‌باشند. زاویه خط مذکور با محور x همان زاویه خط مماس بر دیش در نقطه C است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \tan^{-1}(m_l) \quad (14)$$

حال مقادیر m_l و b_l به طریق زیر به دست می‌آیند:

$$m_l = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \quad (15)$$

$$b_l = y_A - m_l x_A \quad (16)$$

مقادیر m_l و b_l به ترتیب $0/94, -0/55$ و $43/37$ خواهند بود. در نهایت برای مساحت $2/7 \text{ m}^2$ معادله خط به صورت زیر به دست می‌آید:

$$y_l = 0.94x + 0.55 \quad (17)$$

تاکنون تمامی پارامترهای مربوط به سهمی و معادله خط گذرنده از آن

به دست آمده‌اند. تصویر مقطع بیضی شکل دیش بر روی صفحه افق دایره‌ای است با شعاع a که درواقع سطح مؤثری است که در معرض تابش خورشید قرار دارد اگر فرض شود تابش عمودی (موازی محور سهمی بزرگ) باشد. درواقع a همان نیم قطر کوچک بیضی می‌باشد که مقدار آن از رابطه‌ی (۱۸) به دست می‌آید که برابر است با $0/79$.

$$a = \frac{x_B - x_A}{2} \quad (18)$$

که در شکل ۴ قابل مشاهده است:

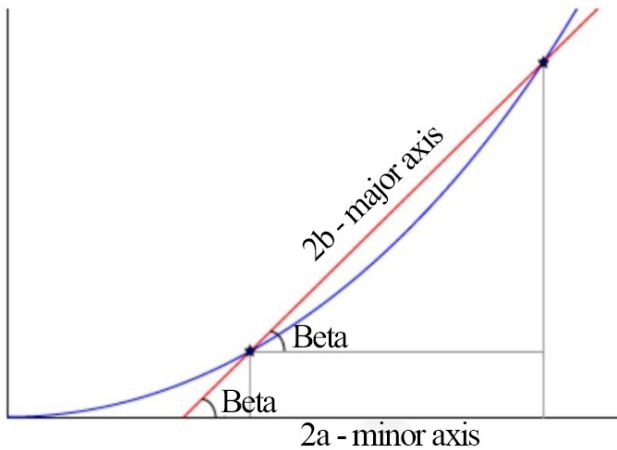


Fig. 4. Semi-major and minor diameters of elliptical surface
شکل ۴: نیم قطرهای کوچک و بزرگ سطح بیضی شکل [۸].

از طرفی نیم قطر بزرگ‌تر بیضی را می‌توان از رابطه‌ی (۱۹) به دست آورد که مقدار آن $1/0.92$ می‌باشد.

$$b = \frac{1}{2} \sqrt{(x_b - x_A)^2 - (m_p x_B^2 - m_p x_A^2)^2} \quad (19)$$

در نهایت با داشتن مقادیر a و b از بیضی می‌توان به کمک رابطه‌ی (۲۰) مساحت تقریبی دیش را به دست آورد که برابر با $2/7 \text{ m}^2$ است.

$$Area = \pi ab \quad (20)$$

۲-۲- محاسبات مربوط به کراس بارها (میله‌های میانی)

یکی از مهم‌ترین نکات در ساخت متمرکز کننده‌ی شفلر تعیین دقیق محل میله‌های میانی (کراس بارها) می‌باشد. کراس بارها در واقع میله‌هایی در سطح متمرکز کننده می‌باشند که انحناى سطح متمرکز کننده به کمک آنها تأمین می‌گردد. سطح مقطع متمرکز کننده شفلر بیضوی می‌باشد که می‌توان آن را از معادله‌ی (۲۱) به دست آورد:

$$\left(\frac{x}{b}\right)^2 + \left(\frac{y}{a}\right)^2 = 1 \quad (21)$$

در معادله‌ی فوق a نیم قطر کوچک و b نیم قطر بزرگ بیضی می‌باشند.

که در آن a_q و b_q ، نیم قطرهای کوچک و بزرگ بیضی تشکیل شده توسط کراس بارها می‌باشند.

با شروع از میله‌ی میانی، در وسط دیش که از نقطه‌ی مرکزی قاب بیضوی دیش می‌گذرد، معادله‌ی اصلی و اولیه کراس بارها شکل می‌گیرد که عبارت است از:

$$q_4(x) = m_{q_4}x + C_{q_4} \quad (24)$$

شیب معادله‌ی خط کراس بار وسط برابر است با:

$$m_{q_4} = \tan(-46.63) = -1.058 \quad (25)$$

مختصات نقطه‌ی برخورد کراس بار وسط با قاب بیضوی دیش (نقطه C در شکل ۵)، مختصات نقطه‌ی میانگین دونقطه‌ی x_A و x_B می‌باشد. مختصات y این نقطه با جایگزینی مقدار مختصات x در معادله‌ی (۱۷) به دست خواهد آمد که به صورت زیر می‌باشد:

$$q_4(1.66) = 0.82 \quad (26)$$

با جایگذاری مقادیر به دست آمده برای m_{q_4} ، $q_4(x)$ و x در معادله‌ی (۲۴) مقدار عرض از مبدأ برای کراس بار میانی به دست می‌آید که مقدار آن $2/58$ می‌باشد. بنابراین معادله مربوط به کراس بار میانی به طریق زیر به دست می‌آید:

$$q_4(x) = -1.058x + 2.58 \quad (27)$$

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود کراس بارها به صورت مساوی از کراس بار میانی قرار گرفته‌اند که فاصله‌ی بین دو کراس بار متوالی $0/27$ متر می‌باشد. در ادامه، فاصله‌ی بین دو کراس بار متوالی بر روی محور y با تقسیم کردن مقدار $0/27$ بر $\cos(46/63)$ به دست می‌آید که مقدار آن $0/39$ می‌باشد.

معادلات مربوط به سایر کراس بارها با اضافه و کم کردن مقادیر $0/39$ ، $0/78$ و $1/17$ بر عرض از مبدأ در معادله‌ی (۲۷) به دست می‌آیند.

به طور خلاصه تمامی مقادیر، از جمله عرض از مبدأ، معادله‌ی کراس بارها، و سایر پارامترهای مربوط به آنها در جدول ۱ آمده است.

بعد از محاسبه‌ی معادلات مربوط به کراس بارها، برای ساخت دیش، نیاز به عمق دقیق کراس بارها و طول کمان هر یک از آنها می‌باشد. عمق برای کراس بار n ام (Δ_n) با استفاده از روابطی که در ادامه ذکر خواهند شد و با توجه به شکل ۷ به دست می‌آید.

$$\Delta_n = \frac{a_{qn}}{\cos 46.63} - z \quad (28)$$

در معادله‌ی (۲۸) مقدار z برابر است با:

$$z = \frac{(a_{qn}^2 - Y_n^2)^{0.5}}{\cos 46.63} \quad (29)$$

برای مشخص کردن هر نقطه‌ای با مختصات (x_n, y_n) بر روی قاب بیضوی شکل دیش می‌توان از معادله‌ی زیر کمک گرفت:

$$Y_n = (\cos 43.37)(b^2 - x_n^2)^{0.5} \quad (22)$$

از معادله‌ی فوق برای مشخص کردن موقعیت کراس بارها بر روی قاب بیضی متمرکز کننده‌ی شفلر نیز استفاده می‌شود.

تعداد کراس بارها می‌تواند به طور دلخواه تعیین شود. هرچه تعداد آنها بیشتر باشد، طبیعتاً سطح متمرکز کننده به صورت دقیق‌تری در خواهد آمد. در خصوص متمرکز کننده‌ای به مساحت $2/7 \text{ m}^2$ ، تعداد تقریبی ۷ کراس بار کافی می‌باشد. بدیهی است هرچه تعداد کراس بارها زیادتر باشد متمرکز کننده از کیفیت بهتری جهت ساخت بهره‌مند خواهد بود، ولی هزینه‌ی ساخت را افزایش می‌دهد. لازم به ذکر است برای متقارن بودن محل قرارگیری کراس بارها، تعداد آنها باید فرد باشد. اگر مرکز قاب بیضی شکل دیش به عنوان مرکز مختصات در نظر گرفته شود، تعداد کراس بارها و مختصات (x, y) آنها و نحوه‌ی محاسبه‌ی فواصل آنها به شرح زیر می‌باشند:

صفحات مربوط به کراس بارها بر سطح مقطع بیضوی دیش عمود می‌باشد و شماتیکی از آنها در شکل ۵ نشان داده شده است.

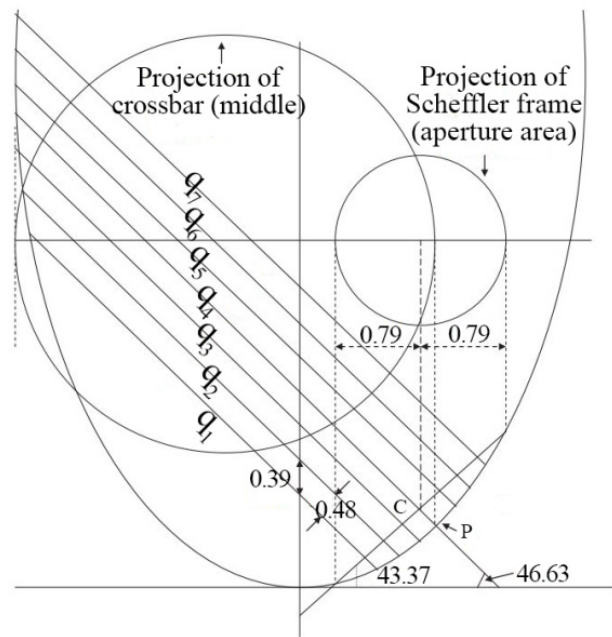


Fig. 5. Scheffler reflector crossbars

شکل ۵: کراس بارهای متمرکز کننده‌ی شفلر [۱].

$(q_7 - q_1)$ معرفی کننده ۷ کراس بار مربوط به متمرکز کننده می‌باشند. شیب مربوط به هر یک از کراس بارها مقدار $46/63^\circ$ می‌باشد. از آنجایی که هر ۷ کراس بار باهم موازی هستند، زوایای آنها یکی می‌باشد. تقاطع هر یک از کراس بارها با سهمی دوار اصلی یک بیضی را تشکیل می‌دهد، لذا:

$$\left(\frac{a_q}{b_q}\right) = \cos 46.63 \quad (23)$$

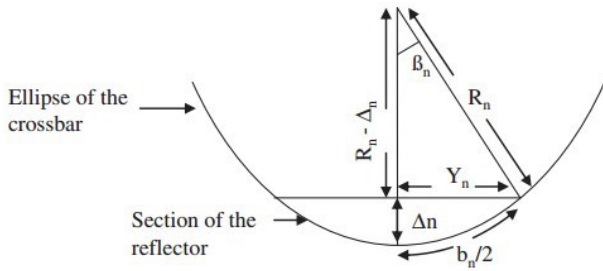


Fig. 7. Radius, depth and arc length of crossbars
شکل ۷: شعاع، عمق و طول کمان کراس بارها [۱].

$$R_n = \frac{(\Delta_n^2 + Y_n^2)}{2\Delta_n} \quad (32)$$

همچنین با استفاده از شکل ۷ زاویه کمان تعیین می شود:

$$\beta_n = \sin^{-1}\left(\frac{Y_n}{R_n}\right) \quad (33)$$

در نهایت:

$$\left(\frac{b_n}{2}\right) = R_n \left(\frac{2\pi\beta_n}{360}\right) \quad (34)$$

سایر مشخصات محاسبه شده برای کراس بارها در جدول ۲ مشخص گردیده اند.

جدول ۲: سایر مشخصات کراس بارها
Table 2. Other properties of crossbars

b_n (m)	β_n (°)	R_n (m)	Δ_n (m)	Y_n (m)	کراس بار
۱/۰۵	۱۵/۸۰	۱/۹۲	۰/۰۷	۰/۵۲	۱
۱/۳۹	۱۹/۱۴	۲/۰۸	۰/۱۱	۰/۶۸	۲
۱/۵۶	۲۰/۰۰	۲/۲۳	۰/۱۳	۰/۷۶	۳
۱/۶۱	۱۹/۴۵	۲/۳۷	۰/۱۳	۰/۷۹	۴
۱/۵۵	۱۷/۸۴	۲/۴۹	۰/۱۲	۰/۷۶	۵
۱/۳۸	۱۵/۱۹	۲/۶۱۴	۰/۰۹	۰/۶۸	۶
۱/۰۵	۱۱/۰۸	۲/۷۲	۰/۰۵	۰/۵۲	۷

۲-۳- محاسبات مربوط به راندمان حرارتی متمرکز کننده شفلر

با توجه به داده‌های به دست آمده می‌توان راندمان متمرکز کننده را به صورت رابطه (۳۵) تعریف کرد [۳]:

$$\eta = \frac{10^3 E_p}{\int_{t=0}^{t_p} (G \times A_s) dt} \quad (35)$$

که در آن، E_p مقدار کل انرژی حرارتی، G تابش دریافتی از خورشید

جدول ۱: مشخصات کراس بارها

Table 1. Characteristics of crossbars

نیم قطر بزرگ	نیم قطر کوچک	معادله‌ی خط کراس بار	عرض از مبدأ	کراس بار
۴/۰۳	۲/۷۷	$q_1(x) = -1.058x + 1.39$	۱/۳۹	۱
۴/۳۶	۲/۹۹	$q_2(x) = -1.058x + 1.78$	۱/۷۸	۲
۴/۶۷	۳/۲۰	$q_3(x) = -1.058x + 2.18$	۲/۱۸	۳
۴/۹۶	۳/۴۰	$q_4(x) = -1.058x + 2.58$	۲/۵۸	۴
۵/۲۳	۳/۵۹	$q_5(x) = -1.058x + 2.97$	۲/۹۷	۵
۵/۴۹	۳/۷۷	$q_6(x) = -1.058x + 3.37$	۳/۳۷	۶
۵/۷۳	۳/۹۴	$q_7(x) = -1.058x + 3.76$	۳/۷۰	۷

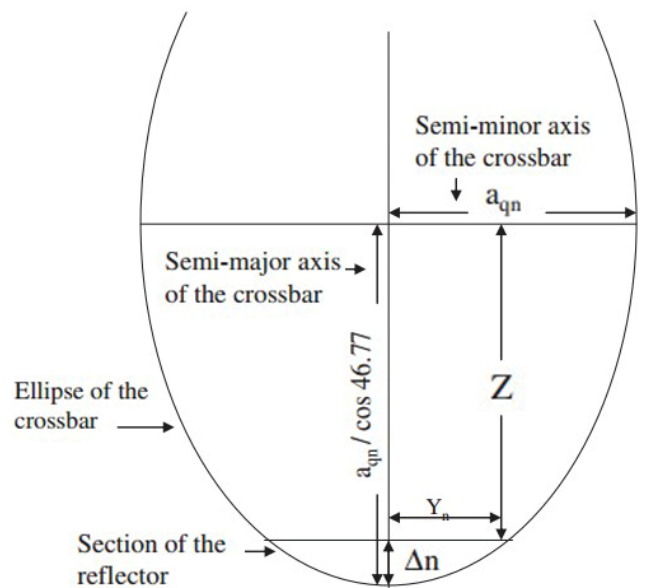


Fig. 6. Ellipse comprising crossbars

شکل ۶: بیضی تشکیل دهنده‌ی کراس بارها [۱].

بر اساس معادلات اصلی بیضی با جایگذاری مقدار z در معادله‌ی (۲۸) عمق کراس بارها بدست می‌آید:

$$\Delta_n = \frac{[a_{qn} - (a_{qn}^2 - Y_n^2)^{0.5}]}{\cos 46.63} \quad (30)$$

مقادیر Δ_n در معادله‌ی فوق بیانگر عمق کراس بارها می‌باشند. همچنین مقادیر شعاع R_n ، طول کمان b_n و زاویه‌ی ساخته شده با نیم طول کمان β_n که در شکل ۷ نشان داده شده‌اند از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$R_n^2 = (R_n - \Delta_n)^2 + (Y_n^2) \quad (31)$$

با ساده‌سازی معادله‌ی فوق شعاع کراس بارها حاصل می‌شود:

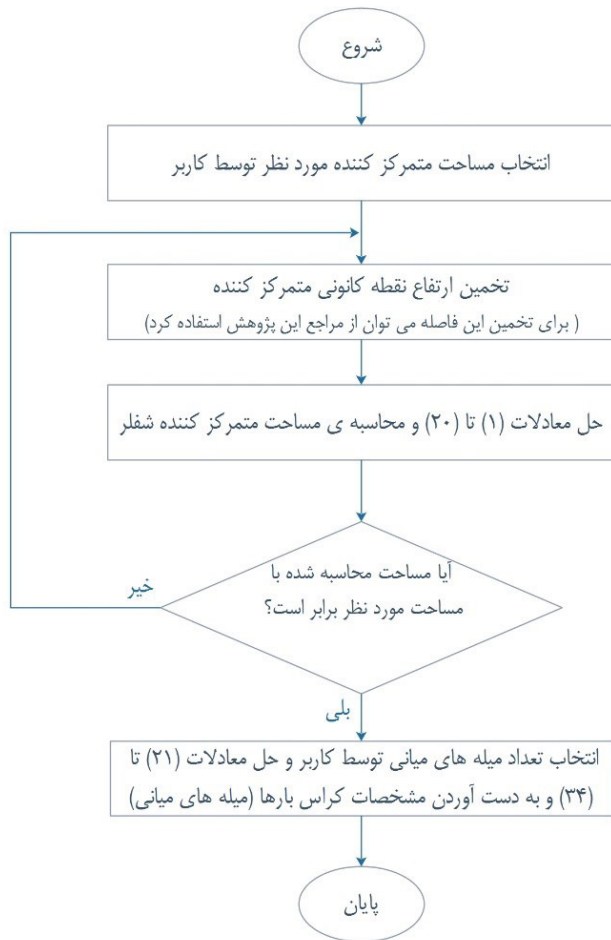


Fig. 8. Solving equations Diagram for scheffler reflector design

شکل ۸: دیاگرام حل معادلات برای طراحی دیش شفلر

۱۰۰ وات می باشد که دور نامی آن ۱۴۰۰ دور بر دقیقه می باشد. این موتور به صورت مستقیم به یک گیربکس با نسبت دور ۱ به ۱۰۰ متصل شده است. بر روی شفت خروجی از گیربکس چرخنده ای نصب گردیده که با زنجیر متصل بر روی قسمت متحرک متمرکز کننده در تماس است و چرخش موتور از این طریق به متمرکز کننده منتقل می شود. باتری مورد استفاده در این مکانیزم دارای ظرفیت ۷Ah می باشد و ولتاژ خروجی باتری ۱۲ ولت است. در شکل ۱۱ این مکانیزم مشاهده می گردد.

۳-۲- دریافت کننده نقطه کانونی

پرتوی خورشیدی که به سطح دیش می تابد در نقطه ی کانونی آن متمرکز می شود. حال جهت استفاده از این انرژی در نقطه ی کانونی، دریافت کننده ای به شرح زیر طراحی و ساخته شد. ابتدا در محل کانون متمرکز کننده یک ورق چوبی قرار داده شد. قسمتی از ورق چوبی توسط متمرکز کننده سوخته شد و مساحت تقریبی سوخته شده به عنوان مساحت تقریبی کانون انتخاب گردید. شایان ذکر است که این روش تعیین کانون تقریبی بوده و برای محاسبه مقدار دقیق آن باید از تکنیک ردیابی پرتو استفاده شود. مساحت تقریبی نقطه ی کانونی دایره ای به قطر

و A_s سطح مؤثر متمرکز کننده می باشد و تابعی از روز سال می باشد که از رابطه ی (۳۵) محاسبه می گردد.

$$A_s = A \times \cos\left(\frac{43.23 - \delta}{2}\right) \quad (36)$$

در معادله ی فوق A و δ به ترتیب مساحت متمرکز کننده و زاویه ی انحراف خورشیدی می باشند. معادلات متفاوتی برای محاسبه ی مقدار δ پیشنهاد شده است [۹]. فانک^۱ و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۰ رابطه ی زیر را برای محاسبه مقدار کل انرژی حرارتی پیشنهاد دادند:

$$E_p = m_w c_w \frac{\Delta T}{3600} \quad (37)$$

در معادله ی فوق m_w جرم آب برحسب کیلوگرم، c_w گرمای ویژه آب در فشار ثابت که مقدار آن $4/187 \text{ kJ/kg.K}$ می باشد. در نهایت، می توان گفت که مقدار توان متوسط دریافتی از متمرکز کننده بر اساس رابطه ی (۳۸) قابل محاسبه است:

$$P_{avg} = \frac{E_p}{t_p} \quad (38)$$

که در آن t_p مدت زمان کل آزمایش می باشد. در شکل ۸ فرآیند حل معادلات ذکر شده جهت طراحی متمرکز کننده شفلر با هر مساحت دلخواه مشاهده می شود. همچنین، برنامه ای در نرم افزار EES طراحی شده که برای دست آوردن تمامی پارامترهای مؤثر در طراحی دیش می تواند مورد استفاده قرار گیرد و به کمک آن طراحی متمرکز کننده با هر مساحت دلخواه امکان پذیر خواهد بود. شکل ۹ نمایی از این نرم افزار را نشان می دهد.

۳-۳- فرآیند ساخت متمرکز کننده شفلر

در این پژوهش، با استفاده از محاسبات انجام شده و در نهایت طراحی با نرم افزار سالیدورکز^۲، کار ساخت متمرکز کننده شفلر ایستاده با مساحت تقریبی $2/7 \text{ m}^2$ صورت گرفت.

شکل ۱۰ متمرکز کننده طراحی شده توسط نرم افزار سالیدورکز را نشان می دهد.

۳-۱- سیستم تعقیب کننده خورشیدی

جهت دنبال کردن خورشید در روز از یک مکانیزم الکتریکی استفاده گردید. روش کار این مکانیزم به این صورت می باشد که با تنظیم مولتی تایمر دیجیتال در حالت فلاشر، مدار الکتریکی ۷۱۹ ثانیه قطع و ۱ ثانیه متصل می گردد. این تنظیمات قابل تغییر بوده و تنظیمات اولیه آن در طول یک روز به صورت دستی محاسبه شده است. موتور این مکانیزم از نوع DC با توان

- 1 Funk
- 2 Solidworks

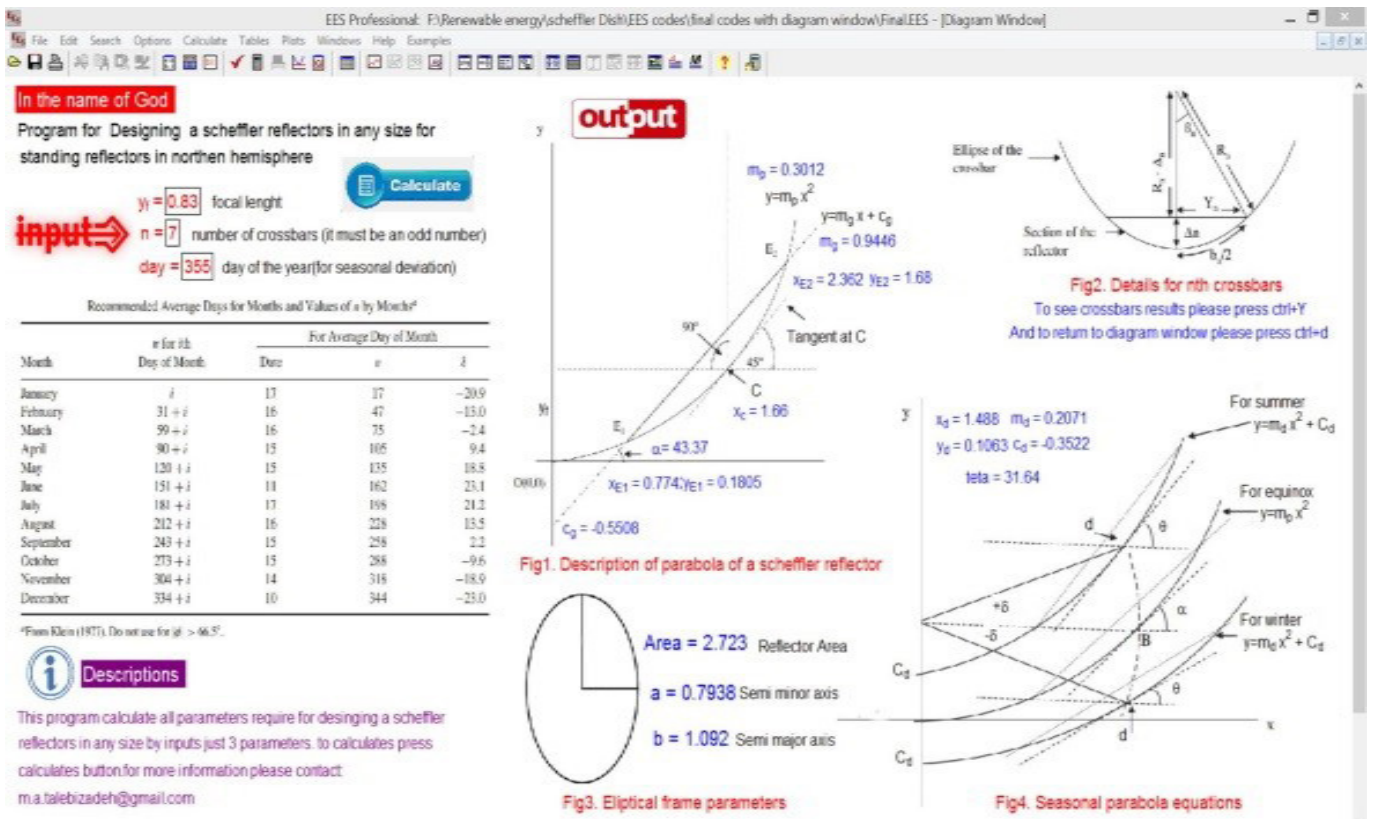


Fig. 9. The computer program which can be used for any concentrator design with desired area
 شکل ۹: برنامه نوشته شده در نرم افزار EES جهت طراحی متمرکز کننده سفلر با هر مساحت دلخواه



Fig. 11. Sun tracking system

شکل ۱۱: سیستم تعقیب کننده خورشیدی

مذکور به کمک ورق گالوانیزه با ضخامت ۰/۶ میلی متر ساخته شد و اتصال آن جهت آب بندی به کمک جوشکاری کاربرد انجام گرفت. در ادامه، جهت کاهش افت حرارتی دریافت کننده از دو لایه عایق پشم شیشه استفاده گردید. همچنین، از یک لایه ورق آلومینیوم برای زیبایی کار و



Fig. 10. Scheffler standing reflector designed by Solidworks software
 شکل ۱۰: متمرکز کننده ایستاده سفلر طراحی شده با نرم افزار سالیدورکز

تقریبی ۲۵ سانتی متر می باشد. از انرژی رسیده به نقطه کانونی برای گرم کردن ۱۲ لیتر آب در روز استفاده گردید. علاوه بر این، با در نظر گرفتن سطح مقطع دریافت کننده با قطر ۳۵ سانتی متر (۵ سانتی متر از هر طرف بزرگ تر از مقدار ۲۵ سانتی متر) عرض دریافت کننده مشخص گردید. دریافت کننده ی

جدول ۴: مشخصات ترموکوپل Testo 922

Table 4. Testo 922 thermometer Characteristics

دمای کارکرد (°C)	وزن (g)	عمر باتری (hours)	دقت اندازه‌گیری (W/m ²)	رنج اندازه‌گیری (W/m ²)
-۵۰	۱۵۸	۱۰۰	۱	۰-۲۰۰۰

است. طول و عرض جغرافیایی این محل به ترتیب برابر با E ۵۷/۲۹۰ و N ۳۰/۰۶۰ می‌باشند.

۴- نتایج

در این قسمت به شرح و ارائه نتایج آزمایش‌های مربوط به متمرکز کننده‌ی ساخته شده پرداخته می‌شود.

۴-۱- نصب متمرکز کننده شفلر

ابتدا با بهره‌گیری از قطب نما جهت شمال در محل نصب متمرکز کننده مشخص گردید و بر اساس آن محور متمرکز کننده تنظیم گردید. پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشات شامل دمای آب داخل متمرکز کننده، دمای هوای محیط و شدت تشعشع خورشید می‌باشد. در شکل ۱۳ تغییرات این سه پارامتر در طول روز برای یک روز (۱۶ آگوست ۲۰۱۶) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، دمای آب موجود در متمرکز کننده با افزایش تشعشع در طول روز، تا ۹۳°C افزایش می‌یابد. در این دما آب به جوش آمده، لذا دمای آن تا انتهای آزمایش ثابت می‌ماند و تمامی انرژی دریافتی صرف تغییر فاز آب موجود در دریافت کننده می‌گردد.

می‌توان گفت که متمرکز کننده شفلر به شدت وابسته به نحوه‌ی قرارگیری محور آن نسبت به محور زمین می‌باشد، به طوری که هرگونه انحراف اندک در قرارگیری محور دوران متمرکز کننده نسبت به محور شمال-جنوب باعث بر هم خوردن کانون متمرکز کننده خواهد شد و از عملکرد آن کاسته می‌شود.

۴-۲- بررسی تأثیر استفاده از رنگ مشکی و نصب شیشه در سطح دریافت کننده

در این پژوهش، تأثیر استفاده از رنگ مشکی و پوشش شیشه‌ای بر روی دریافت کننده، جهت افزایش انرژی جذب شده، نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا متمرکز کننده ایستاده بدون استفاده از رنگ مشکی و شیشه بر روی دریافت کننده در روز ۲۶ مرداد ۱۳۹۵ (۱۶ آگوست ۲۰۱۶) مورد آزمایش قرار می‌گیرد. شکل ۱۳ منحنی تغییرات پارامترهای اندازه‌گیری شده در متمرکز کننده ایستاده بدون رنگ مشکی و شیشه را نشان می‌دهد. در ادامه، از یک لایه رنگ مشکی جهت افزایش انرژی جذب شده توسط دریافت کننده استفاده گردید و گرمایش ۱۲ لیتر آب در روز ۲۷ مرداد ۱۳۹۵ مورد آزمایش قرار گرفت. این لایه مشکی رنگ از طریق یک اسپری مشکی بر روی سطح دریافت کننده ایجاد گردید. در شکل ۱۴ منحنی تغییرات

جلوگیری از رسیدن رطوبت به پشم شیشه استفاده گردید و در نهایت پایه‌ای برای قرارگیری دریافت کننده در نقطه‌ی کانونی طراحی و ساخته شد تا دریافت کننده بر روی آن قرار بگیرد. لازم به ذکر است که دو عدد بوش در بالا و پایین دریافت کننده جهت ورودی و خروجی تعبیه گردید تا در صورت نیاز در کاربردهای خاص مورد استفاده قرار گیرد. در شکل ۱۲ متمرکز کننده شفلر ساخته شده و کانون آن مشاهده می‌شوند.



Fig. 12. A view of the manufactured Scheffler concentrator with its receiver

شکل ۱۲: نمایی از متمرکز کننده شفلر ساخته شده با دریافت کننده آن

۳-۳- دستگاه‌های اندازه‌گیری

در این پژوهش جهت اندازه‌گیری میزان تشعشع خورشید از یک دستگاه تشعشع سنج مدل TES1333R ساخت شرکت TES کشور تایوان استفاده شده است. از ویژگی‌های این تشعشع سنج قابلیت اندازه‌گیری تا میزان تشعشع ۲۰۰۰ W/m² و همچنین قابلیت ذخیره سازی دستی اطلاعات می‌باشد. در جدول ۳ مشخصات مهم این تشعشع سنج مشاهده می‌گردد. جهت اندازه‌گیری دمای داخل رسیور از ترموکوپل مدل Testo 922 ساخت شرکت آلمان Testo استفاده گردید. از ویژگی‌های مهم این دستگاه می‌توان به عدم نیاز به کالیبراسیون، دقت بالای آن در اندازه‌گیری و قابلیت اندازه‌گیری تا دمای ۱۰۰۰ °C اشاره کرد. جدول ۴ مشخصات مهم این دستگاه را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که متمرکز کننده شفلر ساخته شده در ۳۰ کیلومتری شهر کرمان در محل دانشگاه تحصیلات تکمیلی نصب و راه اندازی شده

جدول ۳: مشخصات تشعشع سنج TES1333R

Table 3. TES1333R Pyranometer Characteristics

دمای کارکرد (°C)	وزن (g)	عمر باتری (hours)	دقت اندازه‌گیری (W/m ²)	رنج اندازه‌گیری (W/m ²)
-۵۰	۱۵۸	۱۰۰	۱	۰-۲۰۰۰

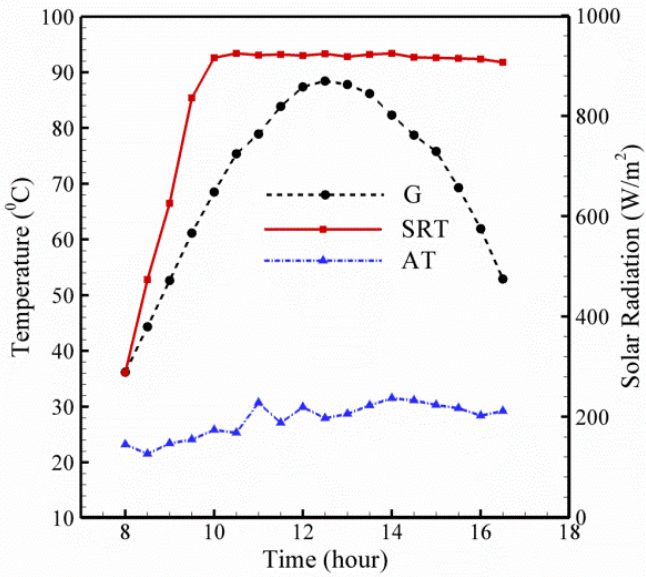


Fig. 15. Variations of measured parameters in standing concentrator using a receiver with black color and glass, at August 18

شکل ۱۵: تغییرات پارامترهای اندازه گیری شده در متمرکز کننده ایستاده با دریافت کننده با رنگ مشکی و شیشه در ۱۸ آگوست

حال تغییرات دمای دریافت کننده در سه حالت بدون رنگ مشکی و شیشه، با رنگ مشکی و بدون شیشه، با رنگ مشکی و با شیشه، در شکل ۱۶ مورد مقایسه قرار گرفته است.

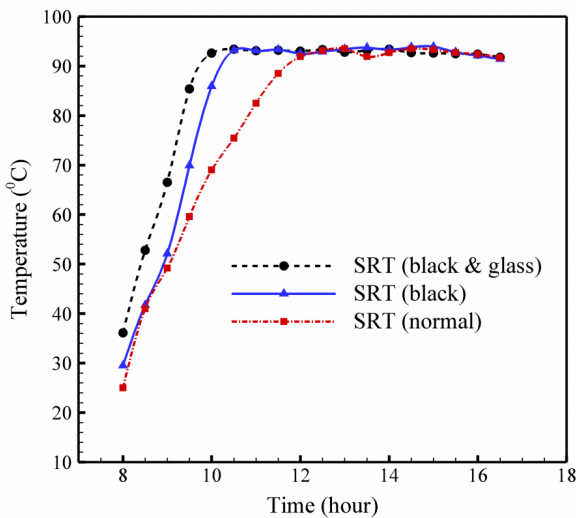


Fig. 16. Comparison of water temperature inside receiver at three cases: without black color and glass, with black color and without glass, with black color and glass

شکل ۱۶: مقایسه دمای آب درون دریافت کننده در سه حالت: بدون رنگ مشکی و شیشه، با رنگ مشکی و بدون شیشه، با رنگ مشکی و شیشه

همان طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، استفاده از رنگ مشکی جهت افزایش ضریب جذب سطح دریافت کننده و شیشه جهت کاهش افت ناشی از جابجایی و تشعشع تا حد زیادی انرژی جذب شده توسط دریافت کننده را افزایش داده و مدت زمان لازم جهت به جوش آمدن حجم آب داخل آن را تا حد زیادی کاهش داده‌اند.

پارامترهای اندازه گیری شده در متمرکز کننده ایستاده با رنگ مشکی و بدون شیشه مشاهده می‌گردد که نشان دهنده گرم شدن سریعتر آب موجود در متمرکز کننده می‌باشد.

جهت کاهش افت ناشی از جابجایی و تشعشع در سطح دریافت کننده از یک شیشه به ضخامت ۴ میلی‌متر با درصد آهن کم (جهت کاهش انرژی جذب شده توسط شیشه)، استفاده گردیده است و گرمایش ۱۲ لیتر آب در این حالت مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند.

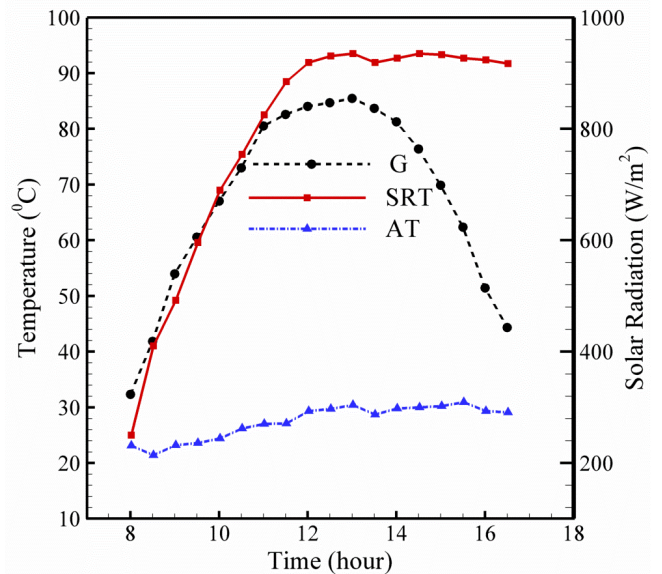


Fig. 13. Variations of measured parameters in standing concentrator using a receiver without black color and glass, at August 16

شکل ۱۳: تغییرات پارامترهای اندازه گیری شده در متمرکز کننده ایستاده با دریافت کننده بدون رنگ مشکی و شیشه در ۱۶ آگوست

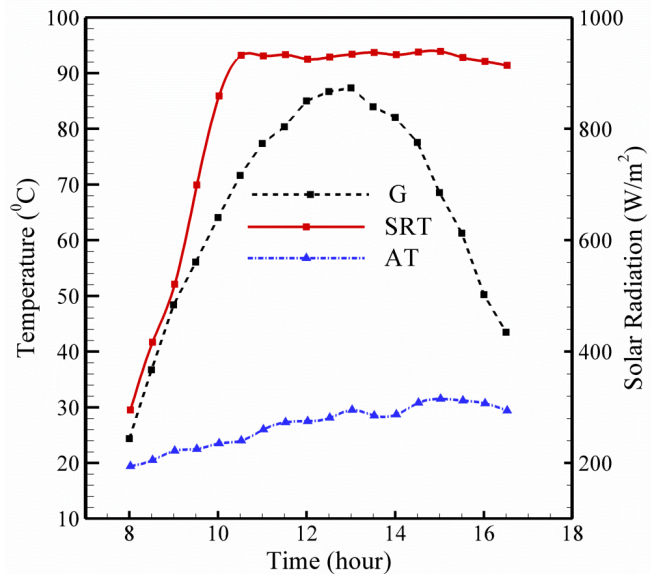


Fig. 14. Variations of measured parameters in standing concentrator using a receiver with black color and without glass, at August 17

شکل ۱۴: تغییرات پارامترهای اندازه گیری شده در متمرکز کننده ایستاده با دریافت کننده با رنگ مشکی و بدون شیشه در ۱۷ آگوست

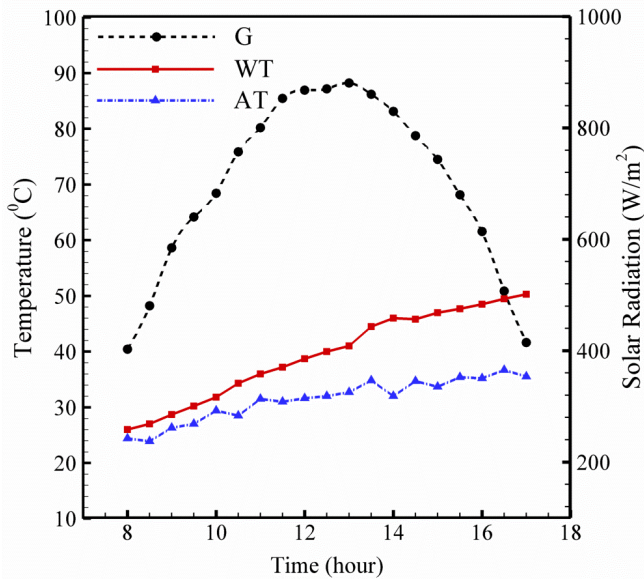


Fig. 18. Variation of water temperature inside storage tank using a receiver without black color glass, at August 9

شکل ۱۸: تغییرات دمای آب درون مخزن ذخیره با دریافت کننده بدون شیشه و بدون رنگ مشکی در روز ۹ آگوست

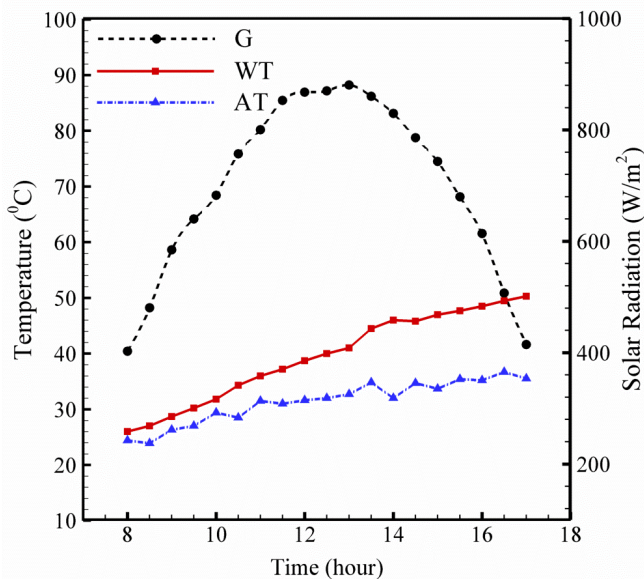


Fig. 19. Variation of water temperature inside storage tank using a receiver with black color and without glass, at August 22

شکل ۱۹: تغییرات دمای آب درون مخزن ذخیره با دریافت کننده بدون شیشه و با رنگ مشکی در روز ۲۲ آگوست

رفتن دمای شیشه می‌شود و از رسیدن به سطح دریافت کننده جلوگیری می‌کند. در شکل ۲۱ مقایسه‌ی دمای مخزن در سه حالت ذکر شده مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌گردد، بیشینه دمای آب میزان $59/5^{\circ}\text{C}$ می‌باشد که مربوط به حالت رنگ مشکی و بدون شیشه دریافت کننده می‌باشد.

۴-۳ گرمایش ۱۰۰ لیتر آب توسط متمرکز کننده ایستاده

یکی از کاربردهای متمرکز کننده شفلر تأمین آب گرم مصرفی یک ساختمان می‌باشد. بدین منظور، گرمایش ۱۰۰ لیتر آب به‌وسیله‌ی متمرکز کننده ایستاده مورد آزمایش قرار گرفت. ابتدا طبق شکل ۱۷ سیستمی جهت گرم کردن آب طراحی و اجرا گردید. در این سیستم از یک پمپ جهت سیرکولاسیون آب و دو عدد شیر جهت قطع و وصل کردن جریان در خروجی و ورودی دریافت کننده و همچنین یک مخزن استفاده گردید.

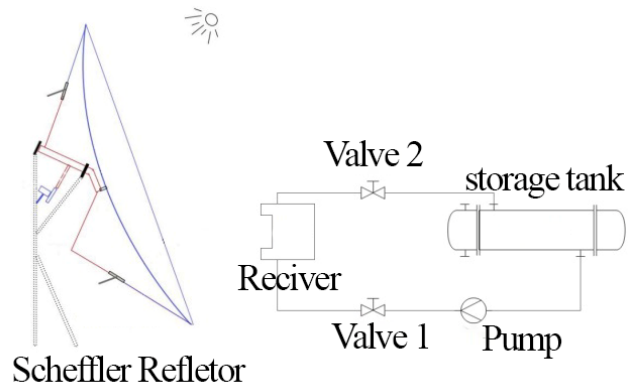


Fig. 17. Schematic of water heating system

شکل ۱۷: شماتیکی از سیستم گرمایش آب

این آزمایش برای هر سه حالت دریافت کننده بدون شیشه و بدون رنگ مشکی (حالت عادی)، بدون شیشه و با رنگ مشکی و در نهایت با رنگ مشکی و پوشش شیشه‌ای در یک دبی ثابت مورد آزمایش قرار گرفت. مسیر لوله‌کشی بین منبع و دریافت کننده تا حد امکان توسط عایق‌های الاستومری جهت جلوگیری از افت حرارتی در مسیر لوله‌ها عایق بندی شده است. در این آزمایش دبی $0/15 \text{ lit/s}$ می‌باشد.

شکل ۱۸، بیشینه دمای آب درون منبع در حالت دریافت کننده بدون شیشه و بدون رنگ مشکی در تاریخ ۱۹ مرداد (۹ آگوست) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد بیشینه دمای آب داخل منبع $49/5^{\circ}\text{C}$ می‌باشد.

شکل ۱۹ نتایج مشابهی را در حالت دریافت کننده بدون شیشه و با رنگ مشکی در روز ۱ شهریور (۲۲ آگوست) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌گردد در این حالت بیشینه دمای منبع مقدار 60°C می‌باشد. استفاده از رنگ مشکی در حدود ۱۰ درجه باعث افزایش دمای آب داخل مخزن گردیده است.

شکل ۲۰ تأثیر استفاده از شیشه و رنگ مشکی بر بیشینه دمای آب منبع نشان می‌دهد.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد استفاده از شیشه تغییرات محسوسی در افزایش دمای آب داخل مخزن ایجاد نکرده است. استفاده از شیشه اگرچه از افت ناشی از جابجایی و تشعشع جلوگیری می‌کند، اما مقداری از تشعشع دریافتی به دریافت کننده را جذب خود کرده که باعث بالا

مقدار حرارت ۹۳۴/۵ محاسبه می‌گردد که در یک بازه‌ی یک ساعته توانی تقریباً برابر با ۲۵۹/۶W می‌باشد.

با توجه به زاویه‌ی انحراف خورشیدی در روز آزمایش ۲۶ مرداد (۱۶ اوت) مقدار سطح مؤثر دیش در این روز برابر با $2/6\text{m}^2$ می‌باشد. این در حالی است که متوسط تابش دریافتی در این ساعت $539/5\text{ W/m}^2$ می‌باشد. لذا تابش دریافتی بر سطح دیش مقدار 1408 W می‌باشد.

حال با در نظر گرفتن مقدار حرارت دریافتی از سوی آب داخل دریافت‌کننده و با صرف‌نظر کردن از سایر افت‌های حرارتی در دریافت‌کننده مقدار تابش وارد شده به سطح دریافت‌کننده که مساحت تقریبی آن $0/49\text{m}^2$ می‌باشد، برابر است با 5298 W/m^2 در واقع تابش دریافتی در دریافت‌کننده $9/82$ برابر تابش دریافتی در سطح افق می‌باشد.

حال با توجه به معادله‌ی (۳۴) راندمان حرارتی متمرکز کننده در این ساعت را می‌توان محاسبه کرد که مقدار آن برابر با $18/44$ درصد می‌باشد. به طور مشابه راندمان و توان متمرکز کننده برای حالتی که دریافت‌کننده بارنگ مشکی پوشش داده شده است و حالتی که از شیشه برای جلوگیری از افت ناشی از جابجایی و تشعشع استفاده گردیده است، قابل محاسبه است. جدول ۵ راندمان و توان متمرکز کننده در سه حالت ذکر شده جهت گرمایش ۱۲ لیتر آب در بازه‌ی زمانی ۸:۳۰ تا ۹:۳۰ صبح مورد مقایسه قرار می‌دهد.

جدول ۵: راندمان و توان متمرکز کننده در حالت‌های مختلف جهت گرمایش لیتر آب در بازه‌ی زمانی ۸:۳۰ تا ۹:۳۰

Table 5. Efficiency and thermal power of concentrator at different cases for water heating, between 8:30-9:30 AM.

توان (W)	راندمان (%)	تابش متوسط	میزان افزایش دمای آب	
۲۵۹/۶	۱۸/۴۴	۵۳۹/۵	۱۸/۶	حالت عادی
۳۹۳/۶	۳۱/۱۹	۴۸۳/۹	۲۸/۲	رنگ مشکی
۴۵۵	۳۷/۱	۴۷۱/۹	۳۲/۶	رنگ مشکی و شیشه

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود مشکی شدن سطح دریافت‌کننده راندمان حرارتی آن را به میزان ۶۹٪ افزایش داده است. همچنین استفاده از شیشه راندمان را در حالت عادی دو برابر کرده است و نسبت به حالتی که سطح دریافت‌کننده دارای رنگ مشکی می‌باشد راندمان را در حدود ۱۸/۹٪ افزایش داده است. همچنین میزان توان در حالت رنگ مشکی حدود ۵۱/۶٪ افزایش نسبت به حالت عادی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، استفاده از شیشه میزان توان دریافتی را نسبت به حالت عادی ۷۵/۲٪ و نسبت به حالت رنگ مشکی ۱۵/۵٪ افزایش داده است.

۵- نتیجه‌گیری

متمرکز کننده‌ی شفلر قسمتی از یک منحنی سهمی شکل می‌باشد که دارای سطح بیضوی شکل است و می‌تواند در طول سال یک نقطه‌ی کانونی

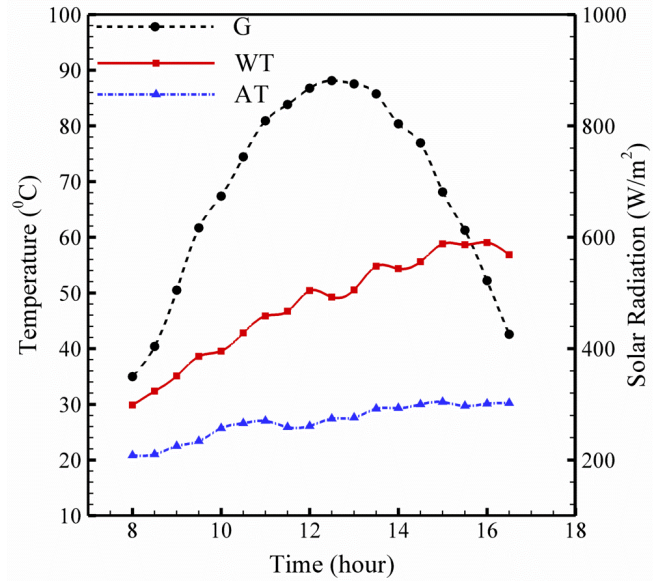


Fig. 20. Variation of water temperature inside storage tank using a receiver with black color and glass, at August 23

شکل ۲۰: تغییرات دمای آب درون مخزن ذخیره با دریافت‌کننده با شیشه و رنگ مشکی در روز ۲۳ آگوست

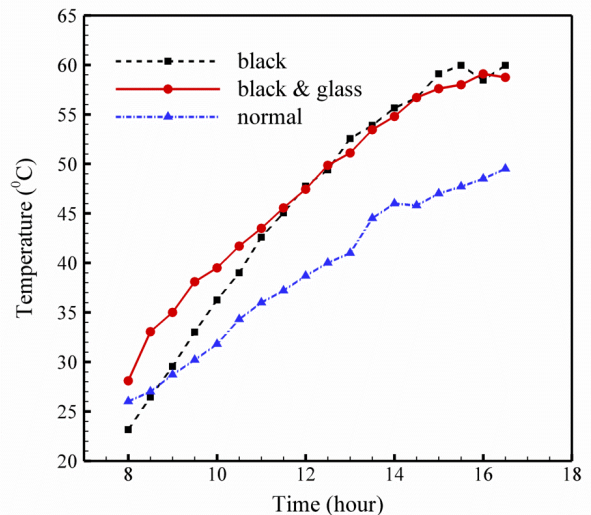


Fig. 21. Comparison of water temperature inside storage tank at three cases: without black color and glass, with black color and without glass, with black color and glass

شکل ۲۱: مقایسه دمای آب درون منبع ذخیره در سه حالت: بدون رنگ مشکی و شیشه، با رنگ مشکی و بدون شیشه، با رنگ مشکی و شیشه

۴-۴ محاسبه‌ی توان و راندمان متمرکز کننده جهت گرمایش ۱۲ لیتر آب حال با توجه به روابط بیان شده و داده‌های به دست آمده از تست متمرکز کننده ایستاده به محاسبه‌ی راندمان متمرکز کننده در حالت‌های مختلف در یک بازه‌ی زمانی به مدت یک ساعت پرداخته می‌شود.

ابتدا حالت بدون شیشه و بدون رنگ مورد بررسی قرار می‌گیرد. بازه‌ی زمانی ۸:۳۰ تا ۹:۳۰ صبح برای انجام محاسبات در نظر گرفته می‌شود. در این مدت زمان دمای آب داخل دریافت‌کننده از $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ به $59/6\text{ }^{\circ}\text{C}$ رسیده است. با محاسبه‌ی میزان حرارت دریافتی جهت گرم شدن ۱۲ کیلوگرم آب،

t_p	طول ناحیه‌ی حل، m
WT	بار الکتریکی بر واحد سطح، C/m^2
Y_n	نسبت چگالی
Z	نسبت چگالی
علامت یونانی	
β	کشش سطحی، N/m
β_n	نفوذپذیری الکتریکی، pF/m
Δ_n	نسبت نفوذپذیری الکتریکی
δ	نفوذپذیری الکتریکی فضای آزاد، pF/m
η	نسبت چسبندگی
زیرنویس	
n	الکتریکی
w	الکتریکی
avg	هیدرودینامیکی

ثابت را فراهم کند. جهت تمرکز خورشید در یک نقطه‌ی کانونی ثابت در این نوع متمرکز کننده از سیستم دنبال کننده‌ی خورشیدی روزانه استفاده گردید. در سیستم تعقیب کننده روزانه متمرکز کننده در طول یک روز همراه با خورشید حرکت می‌کند. در سیستم تعقیب کننده فصلی متمرکز کننده بسته به روز سال تغییر زاویه خواهد داد. در این پژوهش به اصول طراحی و فرآیند ساخت یک متمرکز کننده شفلر با مساحت تقریبی $2/7m^2$ پرداخته شد. نتایج آزمایش متمرکز کننده در شهر کرمان نشان می‌دهد که عملکرد این گونه متمرکز کننده‌ها به گونه‌ای است که حتی با مساحت کم قادر خواهند بود به خوبی جهت گرمایش آب گرم و پخت و پز در مناطق به دور از منابع انرژی استفاده شوند. همچنین، نتایج نشان داد که متمرکز کننده با مساحت تقریبی $2/7m^2$ قادر خواهد بود که تا $9/82$ برابر تابش دریافتی در سطح افق در نقطه‌ی کانونی، تابش فراهم کند. علاوه بر این، در این پژوهش مشاهده گردید که استفاده از رنگ مشکی در سطح دریافت کننده میزان جذب انرژی را تا 69% افزایش می‌دهد، اگر چه استفاده از شیشه راندمان متمرکز کننده را تا 18% نسبت به رنگ مشکی افزایش می‌دهد، اما به دلیل جذب مقداری انرژی توسط آن استفاده از آن در سطح دریافت کننده توصیه نمی‌گردد.

منابع

- [1] A. Munir, O. Hensel, W. Scheffler, Design principle and calculations of a Scheffler fixed focus concentrator for medium temperature applications, *Solar Energy*, 84(8) (2010) 1490-1502.
- [2] W. Scheffler, S. Bruecke, G. von Werdenbergstr, Introduction to the revolutionary design of Scheffler reflectors, in: *2006 Solar Cookers and Food Processing International Conference*, Granada, Spain, July, 2006, pp. 12-16.
- [3] A. Chandak, S. Somani, Design of multistage evaporators for integrating with Scheffler solar concentrators for food processing applications, in: *International Solar Food Processing Conference*, 2009.
- [4] R.J. Patil, G.K. Awari, M.P. Singh, Comparison of performance analysis of Scheffler reflector and model formulation, *Indian Journal of Science and Technology*, 4(10) (2011) 1335-1339.
- [5] G.A. R. Patil, M.Singh, An Approximate Generalized Experimental Data Based Model for Scheffler Reflector, *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Basic Sciences* Vol. 1 , 2014.
- [6] M.R. Phate, D.M. Gadkari, S.S. Avachat, A.D. Tajne, Experimental analysis of 2.7 m² Scheffler reflector and formulation of a model, *Int J Eng Trends Technol*, 12(1) (2014) 1-5.
- [7] A. Munir, O. Hensel, W. Scheffler, H. Hoedt, W. Amjad, A. Ghafoor, Design, development and experimental

فهرست علائم

A	شعاع قطره، m
A_s	فاصله‌ی عمودی مرکز قطره از دیوار، m
AT	تغییر شکل بی بعد قطره
a	میدان الکتریکی، V/m
b	نیروی الکتریکی بر واحد حجم، N/m^3
a_q	فاصله‌ی بی بعد از دیوار
b_q	ارتفاع ناحیه‌ی حل، m
b_n	طول ناحیه‌ی حل، m
C_p	بار الکتریکی بر واحد سطح، C/m^2
c_w	نسبت چگالی
E_p	زمان مشخصه‌ی الکتریکی، s
G	زمان مشخصه‌ی هیدرودینامیکی، s
L_{AC}	عرض ناحیه‌ی حل، m
L_{BC}	طول ناحیه‌ی حل، m
m_p	بار الکتریکی بر واحد سطح، C/m^2
m_w	نسبت چگالی
n	زمان مشخصه‌ی الکتریکی، s
p_{avg}	زمان مشخصه‌ی هیدرودینامیکی، s
R_n	عرض ناحیه‌ی حل، m
SRT	عرض ناحیه‌ی حل، m

- [9] J.A. Duffie, W.A. Beckman, W. Worek, *Solar engineering of thermal processes*, Wiley Online Library, 2013.
- [10] P.A. Funk, Evaluating the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance, *Solar Energy*, 68(1) (2000) 1-7.
- results of a solar distillery for the essential oils extraction from medicinal and aromatic plants, *Solar energy*, 108 (2014) 548-559.
- [8] S. Alberti, *Analysis and Optimization of the Scheffler Solar Concentrator*, (2014).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M.A. Talebizadeh, E. Jahanshahi Javaran, M. Rahnama, Design, Manufacturing and Performance Evaluation of a Fixed

Focus Scheffler Concentrator in Kerman, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(6) (2018) 1303-1318.

DOI: 10.22060/mej.2017.13206.5567



