



A Parametric Study on Optical Performance of a Multi-Tubular Solar Reactor by Monte-Carlo ray Tracing Method

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Riahi A.¹ MSc,
Atashkari K.*¹ PhD,
Mahmoudimehr J.¹ PhD

How to cite this article

Riahi A, Atashkari K, Mahmoudimehr J. A Parametric Study on Optical Performance of a Multi-Tubular Solar Reactor by Monte-Carlo ray Tracing Method. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(3):643-653

ABSTRACT

Cavity receiver in solar tower concentrator usually experiences highly intense radiation. Due to asymmetric concentration of solar rays, non-uniform heat flux distribution occurs on the different parts of the cavity receiver. This non-uniform distribution leads to uneven thermal expansion and stresses in receiver, which affects the reliable operation and reduces life time of receiver parts. Therefore, it is necessary to reduce the non-uniformity of solar flux on the surface of the absorber tubes and different parts of the solar reactor. The aim of this study was to focus on the distributions of concatenated solar flux over graphite tubes of a 50kW solar reactor, which was previously designed for methane thermal dissociation at the focus of a solar furnace. In this study, the absorbed solar power on the different parts of the reactor is determined by Monte Carlo ray tracing method. Moreover, the effect of aperture size and the absorptivity of receiver parts on the net magnitude and distribution of absorbed power in reactor are investigated. The results prove that the 16cm aperture absorbs the maximum power and leads to even better solar flux distributions. Replacing the absorbing walls by the reflective walls will also result in more power absorbed by the tubes and better uniformity of flux distribution around the tubes.

Keywords Solar Furnace; Concentrated Solar Power; Cavity Receiver; Flux Distribution; Monte-Carlo Ray Tracing Method

¹Energy Conversion Department,
Mechanical Engineering Faculty,
University of Guilan, Rasht, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering
Faculty, University of Guilan, Rasht,
Iran
Phone: +98 (13) 33691065
Fax: -
atashkar@guilan.ac.ir

Article History

Received: June 19, 2018
Accepted: November 18, 2018
ePublished: March 01, 2019

CITATION LINKS

[1] High temperature solar furnace: Current ... [2] Radiation performance of dish solar ... [3] Numerical and experimental analysis of a point ... [4] Study on radiation flux of the receiver with ... [5] Effect of directional dependency of wall reflectivity ... [6] Optical performance of a solar dish concentrator ... [7] The optical efficiency of three different geometries ... [8] High concentration linear Fresnel ... [9] A novel computational approach to combine the optical ... [10] Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver ... [11] A comprehensive model for optical and thermal ... [12] Experimental and numerical investigation of a linear Fresnel solar collector with ... [13] Compact linear Fresnel reflector solar thermal ... [14] Experimental and theoretical analysis on a linear ... [15] Modelling of cavity receiver heat transfer for ... [16] Design of an innovative linear Fresnel collector ... [17] Solar hydrogen production from the thermal splitting ... [18] Solar hydrogen production by thermal decomposition ... [19] Hydrogen production by steam-gasification ... [20] Numerical and experimental study of gas-particle ... [21] Solar thermal cracking of methane in a particle-flow reactor ... [22] Pilot scale demonstration of a 100-kWth solar thermochemical ... [23] Design considerations for a multiple tube solar ... [24] Rapid solar-thermal dissociation of natural ... [25] Co-production of hydrogen and carbon black from solar [26] Thousand kW solar furnace, built by the National Center ... [27] Hydrogen production from solar thermal dissociation ... [28] A pilot-scale solar reactor for the production ... [29] Dynamic modeling and experimental demonstration ... [30] Comparison of 3 heat flux gauges and a water ... [31] Handbook of mathematics for engineers ... [32] Thermal radiation heat ... [33] SolTRACE: A new optical modeling tool for concentrating ... [34] Development of photovoltaic systems with ...

بررسی پارامتریک کارایی یک راکتور خورشیدی چندلوله‌ای به روش رهگیری اشعه مونت- کارلو

عبدالله ریاحی MSc

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

کازم آتشکاری PhD

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

جواد محمودی مهر PhD

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

دریافت‌کننده خورشیدی که در مرکز کانونی سیستم‌های متمرکزکننده خورشیدی قرار دارد عموماً شار تابشی شدیدی را تحمل می‌کند. تمرکز نامتقارن پرتوهای خورشیدی باعث می‌شود شار حرارتی روی قسمت‌های مختلف دریافت‌کننده به صورت یکنواخت توزیع نشود. این توزیع نامتقارن منجر به تنش‌های حرارتی در دریافت‌کننده می‌شود که روی عملکرد آن تأثیر منفی گذاشته و طول عمر مفید آن را کاهش می‌دهد. از این رو کاهش توزیع غیریکنواخت شار تابشی روی قسمت‌های مختلف دریافت‌کننده از جمله لوله‌های داخل آن امری ضروری است. هدف از این پژوهش بررسی توزیع شار متمرکز خورشیدی روی لوله‌های گرافیتی داخل یک راکتور خورشیدی ۵۰ کیلوواتی است که قبلاً برای تجزیه حرارتی متان طراحی شده و در یک کوره خورشیدی آزمایش شده است. در این مطالعه با استفاده از روش رهگیری اشعه مونت‌کارلو توان خورشیدی جذب‌شده توسط قسمت‌های مختلف این راکتور محاسبه شده و تأثیر ضریب جذب دیواره‌های راکتور و سایز روزنه ورودی روی میزان و توزیع توان جذب‌شده توسط لوله‌های داخل راکتور بررسی شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که روزنه ورودی ۱۶ سانتیمتری بیشترین جذب توان را داشته و منجر به توزیع شار خورشیدی یکنواخت‌تری می‌شود. جایگزین کردن دیواره‌های منعکس‌کننده به جای دیواره‌های جاذب نیز توان بیشتری توسط لوله‌ها جذب شده و توزیع شار بهتری را باعث می‌شود.

کلیدواژه‌ها: کوره خورشیدی، انرژی متمرکز خورشیدی، دریافت‌کننده مرکزی، توزیع شار، روش رهگیری اشعه مونت‌کارلو

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۸/۲۷

*نویسنده مسئول: atashkar@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

انرژی متمرکز خورشیدی می‌تواند به عنوان منبع مفیدی برای تامین گرمای مورد نیاز واکنش‌های شیمیایی گرماگیر در دمای بالا استفاده شود. واکنش‌هایی مانند تجزیه مستقیم آب، گازی‌سازی زغال‌سنگ و سایر مواد کربنی، احیای حرارتی اکسیدهای فلزی برای تولید هیدروژن و تجزیه حرارتی متان که می‌توانند برای تولید سوخت‌های پاک مانند هیدروژن به کار گرفته شوند. کوره‌های خورشیدی از جمله تجهیزاتی هستند که می‌توانند انرژی خورشید را تا چند هزار برابر حتی بالاتر از ۱۰ هزار برابر متمرکز نمایند و دمای بالای مورد نیاز این گونه فرایندهای ترموشیمیایی را تامین کنند [1].

کوره خورشیدی متشکل از تعداد زیادی آینه بوده که به طور هماهنگ نور خورشید را روی یک نقطه کانونی که همان کوره است متمرکز می‌کند تا دمای آن نقطه افزایش یابد. کوره‌های خورشیدی به دو گروه عمده هدف- متحرک و هدف- ثابت تقسیم می‌شوند. اغلب سیستم‌های کوره خورشیدی از نوع هدف- ثابت هستند که از دو جزء اصلی هلیوستات (آینه مسطح) به عنوان مرحله ابتدایی و متمرکزکننده سهموی به عنوان مرحله ثانویه که مساحت آن به اندازه سطح انعکاسی هلیوستات است، تشکیل شده‌اند. در کوره‌های خورشیدی هدف- ثابت کار اصلی هلیوستات، رهگیری خورشید و

انعکاس پرتوهای آن به سمت متمرکزکننده سهموی بوده که در یک مکان ثابت قرار گرفته است. طبق قوانین اپتیک، هر گاه دسته پرتوهای موازی به یک آینه مقعر بتابد، پرتوها در محل کانون آن آینه متمرکز می‌شوند. بنابراین پرتوهای خورشید در مرکز این متمرکزکننده سهموی متمرکز می‌شوند و امکان دستیابی به دماهای بسیار بالا در این نقطه را فراهم می‌سازند.

در این سیستم‌ها برای رسیدن به بیشترین کارایی و اطمینان از عملکرد مطمئن و طولانی‌مدت لازم است راکتورهای خورشیدی که در مرکز کانون متمرکزکننده قرار می‌گیرند، تحت دمای یکنواختی کار کنند که این دمای یکنواخت نتیجه تابش یکنواخت است. بنابراین ضروری است توزیع تابش در سطوح مختلف راکتور با توجه به تغییرات روزانه و ساعتی تابش خورشید محاسبه شود. روش‌های متعددی برای پیش‌بینی توزیع شار حرارتی روی یک دریافت‌کننده خورشیدی به کار گرفته شده که در این میان روش رهگیری اشعه مونت کارلو به طور گسترده استفاده شده است.

شوای و همکاران [2]، از روش رهگیری اشعه مونت کارلو برای محاسبه کارایی یک سیستم متمرکزکننده بشقاب خورشیدی که یک دریافت‌کننده کاویتی‌شکل در مرکز آن قرار داشت، استفاده کردند. به طور مشابه ژری و همکاران [3]، کارایی اپتیک سه نوع دریافت‌کننده کاویتی‌شکل را با یکدیگر مقایسه و طراحی بهینه را شناسایی نمودند.

مائو و همکاران [4]، روش رهگیری اشعه مونت کارلو را برای پیش‌بینی توزیع شار تابشی روی یک سیستم دریافت‌کننده بشقاب سهموی به کار گرفتند. آنها تأثیرات میزان تابش خورشید، نسبت هندسی (نسبت ارتفاع دریافت‌کننده به قطر آن) و خطاهای سیستم را روی دریافت‌کننده مورد بررسی قرار دادند.

لاروتورو و همکاران [5]، تأثیر ضریب جذب دیواره‌های کاویتی را روی کارایی حرارتی یک دریافت‌کننده مکعبی شکل بررسی کردند. آنها با استفاده از روش رهگیری اشعه مونت کارلو، توان تلف شده از طریق انعکاس دیواره‌ها را محاسبه نمودند.

لی و همکاران [6]، تأثیر پارامترهای هندسی و خواص سطوح دریافت‌کننده کاویتی را روی کارایی اپتیک یک دریافت‌کننده بشقاب سهموی مورد مطالعه قرار دادند. این پارامترها شامل نسبت قطر (نسبت قطر روزنه به قطر بیرونی جاذب)، نسبت ارتفاع (نسبت ارتفاع جاذب به قطر بیرونی جاذب) و ضریب جذب دیواره‌های دریافت‌کننده بود.

دبو و همکاران [7]، کارایی اپتیک و توزیع شار را برای سه هندسه مختلف دریافت‌کننده کاویتی مورد مطالعه قرار دادند. آنها رفتار دریافت‌کننده‌های استوانه‌ای، مخروطی و کروی را با استفاده از روش مونت کارلو تحت تابش خورشید مطالعه نمودند. نتایج بررسی آنها نشان داد که بین توزیع شار ورودی سطوح داخلی کاویتی و کارایی اپتیک ارتباط وجود دارد. ضمن این که دریافت‌کننده مخروطی‌شکل، میزان انرژی تابشی بیشتری را نسبت به هندسه‌های دیگر جذب می‌کند.

علاوه بر بشقاب‌های سهموی، روی کارایی اپتیک دریافت‌کننده فرسnel خطی نیز مطالعاتی صورت گرفته است [8-15]. در این بررسی‌ها با استفاده از روش مونت کارلو، توزیع شار خورشیدی روی قسمت‌های مختلف دریافت‌کننده چندلوله‌ای دوزنقه‌ای شکل به دست آمده است [8-11, 14].

مقیمی و همکاران [9] به کمک روش مونت کارلو، شار خورشیدی رسیده به یک دریافت‌کننده چندلوله‌ای را محاسبه کردند. آنها دریافتند که اغلب اشعه‌ها به سطوح تحتانی لوله‌ها برخورد می‌کنند

ویلاسمیل و همکاران^[22]، یک راکتور خورشیدی ۱۰۰ کیلوواتی را برای تجزیه حرارتی ZnO در کوره خورشیدی یک‌مگاواتی مرکز تحقیقات PROMES فرانسه^[26] طراحی و آزمایش کردند. این راکتور، نمونه بزرگ‌تر راکتور ۱۰ کیلوواتی بوده که در شبیه‌ساز خورشیدی شار بالای مرکز تحقیقات PSI سوئیس آزمایش شده است.

راکتورهای گرمایش غیرمستقیم لوله‌ای، برای فائق آمدن بر مشکلات ته‌نشینی ذرات روی شیشه توسط د/هل و همکاران^[24] و رودت و همکاران^[25] پیشنهاد شد. د/هل و همکاران^[25]، یک راکتور سه‌لوله‌ای ۱۰ کیلوواتی را برای تجزیه متان به هیدروژن و کربن‌بلک طراحی و آزمایش کردند. آنها در شبیه‌سازی خود شرط دمای ثابت را برای دیواره لوله راکتور در نظر گرفتند.

مارتینیک و ویمیر^[23] در مطالعه‌ای یک دریافت‌کننده کاویتی‌شکل با گرمایش غیرمستقیم را مورد مطالعه قرار دادند که در آن تعدادی لوله جاذب به‌صورت عمودی قرار گرفته بود. آزمایش‌های آنها در کوره خورشیدی شار بالا (HFSF) در آزمایشگاه ملی انرژی‌های نو در ایالات متحده (NREL) انجام شد. آنها راندمان راکتور را در دو حالت دیواره‌های کاویتی جاذب و منعکس‌کننده مقایسه کردند. همچنین در این پژوهش، تأثیرات پارامترهای طراحی مختلف بررسی شد که خود شامل شرایط عملکردی (تابش خورشیدی ورودی، نرخ کربن ورودی، نرخ مولی بخار به کربن ورودی و دبی گاز ورودی) و هندسه لوله (اندازه و موقعیت لوله‌ها در داخل کاویتی) است.

رودت و همکاران^[27]، یک راکتور خورشیدی لوله‌ای را برای تولید هیدروژن و کربن‌بلک از تجزیه حرارتی متان طراحی کردند. این راکتور برای توان اسمی ۱۰ کیلووات طراحی و در کوره خورشیدی یک‌مگاواتی مرکز تحقیقات PROMES آزمایش شد. شار ورودی خورشید در شبیه‌سازی‌های آنها به‌صورت یکنواخت روی روزنه ورودی راکتور در نظر گرفته شده بود. برای رسیدن به هدف صنعتی‌سازی راکتورهای خورشیدی، یک راکتور خورشیدی چندلوله‌ای با ابعاد بزرگ‌تر و توان اسمی ۵۰ کیلووات توسط همین محققان^[28] ساخته و آزمایش شد.

با توجه به تاریخچه کارهای انجام‌شده، شبیه‌سازی‌های اپتیک صورت‌گرفته روی کل سیستم خورشیدی بیشتر روی بشقاب‌های سهموی یا سیستم‌های سهموی خطی انجام گرفته است که در دماهای پایین‌تری نسبت به کوره‌های خورشیدی کار می‌کنند. اکثر مطالعات مربوط به کوره‌های خورشیدی نیز به فضای داخل راکتور معطوف شده است که در مرکز کانونی این متمرکزکننده‌ها قرار دارد. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، مسیر پیچیده تابش از خورشید تا دریافت‌کننده در نظر گرفته نشده و شار تابشی دریافتی از خورشید عموماً به‌صورت ثابت و یکنواخت در نظر گرفته شده، در حالی که شار تابشی روی قسمت‌های مختلف راکتور غیرهمگن است و منجر به اختلاف دمای زیادی در داخل راکتور می‌شود. در این مطالعه ابتدا کوره خورشیدی یک‌مگاواتی مرکز تحقیقاتی PROMES مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس شار تابشی غیریکنواخت رسیده از خورشید روی قسمت‌های مختلف راکتور مکعبی ۵۰ کیلوواتی که در مرکز کانون کوره خورشیدی فوق قرار گرفته است، با روش رهگیری اشعه مونت کارلو محاسبه می‌شود. این راکتور توسط رودت و همکاران^[28]، برای تولید هیدروژن و کربن‌بلک از تجزیه مستقیم متان آزمایش شده است. همچنین در این پژوهش، تأثیرات قطر روزنه و ضریب جذب سطوح داخلی راکتور روی توزیع شار روی

که منجر به شار تابشی غیریکنواخت روی هر لوله می‌شود و این غیریکنواختی میان لوله‌ها بسیار مهم است.

عباس و همکاران^[8, 16] با استفاده از روش مونت کارلو، میزان تابش رسیده به دریافت‌کننده صفحه تخت را مورد مطالعه قرار دادند که این دریافت‌کننده صفحه تخت می‌تواند روزنه ورودی یک دریافت‌کننده کاویتی‌شکل باشد. آنها دریافتند که شار تابشی روی دریافت‌کننده صفحه تخت به‌شدت غیر یکنواخت بوده و مرکز آن دارای بیشترین شار دریافتی است. همچنین لین و همکاران^[14]، یک دریافت‌کننده فرسnel خطی V شکل را به‌صورت تجربی و تئوری مورد مطالعه قرار دادند. آنها به‌کمک روش مونت کارلو، کارایی اپتیک یک سیستم پیشنهادی فرسnel خطی را پیش‌بینی کردند.

موارد ذکرشده در فوق، بیانگر مطالعاتی در زمینه سیستم‌های خورشیدی و عمدتاً بشقاب سهموی و فرسnel خطی است که در دماهای متوسط کار می‌کنند و در آنها تأثیرات پارامترهای مختلف روی کارایی دریافت‌کننده‌ها توسط روش رهگیری اشعه مونت کارلو بررسی شده است. برای سیستم‌های خورشیدی دمای بالا مثل کوره خورشیدی مطالعات کمی در زمینه میزان تابش دریافتی از خورشید به مرکز کانونی و راکتور قرارداده‌شده در آن انجام شده و عمده بررسی‌ها معطوف به شبیه‌سازی داخل راکتور بوده است. این راکتورها به‌صورت دریافت‌کننده کاویتی‌شکل بوده و تابش متمرکز خورشید از طریق روزنه کوچکی که در آنها تعبیه شده است، وارد راکتور می‌شود و گرمای مورد نیاز واکنش‌های شیمیایی را تأمین می‌کند.

راکتورهای شیمیایی خورشیدی عمدتاً به دو نوع مستقیم^[17-22] و غیرمستقیم^[23-25] تقسیم می‌شوند. در راکتورهای نوع مستقیم، برای افزایش انتقال گرمای بین گاز و جامد، واکنش‌دهنده‌ها مستقیماً در معرض تابش خورشید قرار می‌گیرند. در حالی که در راکتورهای غیرمستقیم، سطوح مات (لوله، صفحه و غیره) به‌عنوان جاذب و هادی گرما، ابتدا در معرض تابش ورودی قرار می‌گیرند، سپس گرما را به واکنش‌دهنده‌ها منتقل می‌کنند. راکتورهای خورشیدی مستقیم، میزان گرمای بالاتری را در ناحیه واکنش فراهم می‌کنند، ولی محافظت از شیشه در برابر ته‌نشینی ذرات روی آن کار دشواری است. در نوع غیرمستقیم، نرخ حرارت پایین‌تر بوده، ولی کنترل محیط واکنش آسان‌تر است و مشکلات مربوط به شیشه ورودی وجود ندارد.

آبانادس و فلانمت^[17]، در PROMES، تأثیر هندسه نازل گرافیتی را برای یک راکتور یک‌کیلوواتی بررسی کردند. آنها یک راکتور شیمیایی خورشیدی را برای مطالعه تجزیه متان و تولید هیدروژن طراحی کردند. طرح آنها یک دریافت‌کننده گرافیتی به‌شکل نازل بود که انرژی خورشید را جذب و گرما را به گاز متان منتقل می‌کرد. آنها توانستند ۹۵٪ متان را به هیدروژن و کربن‌بلک تبدیل نمایند. آنها در شبیه‌سازی خود از شار خورشیدی ثابت روی دیواره‌های داخلی راکتور استفاده کردند و مسیر پیچیده تابش از خورشید به دریافت‌کننده مرکزی را در نظر نگرفتند.

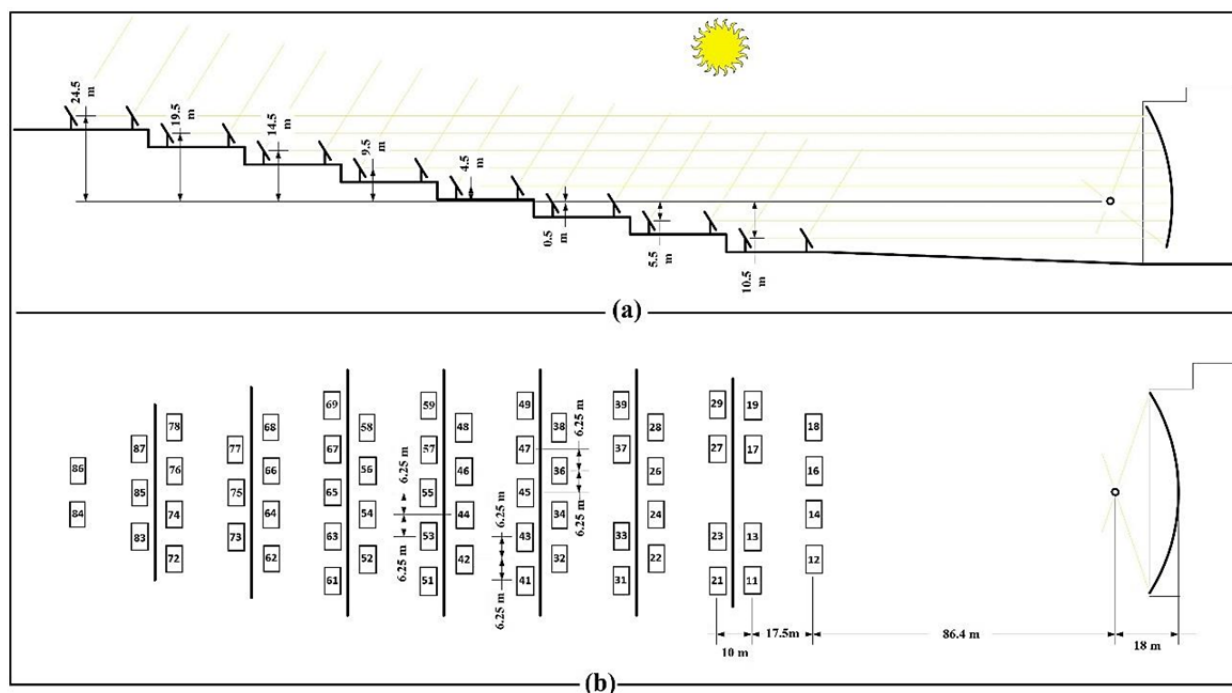
وان‌زدویتچ و همکاران^[20]، یک راکتور لوله‌ای از جنس کوارتز که مستقیماً در معرض تابش متمرکز خورشیدی قرار داشت را توسعه دادند. آنها این نمونه راکتور خورشیدی را در شبیه‌ساز خورشیدی شار بالا در ETH سوئیس برای گازی‌سازی زغال سنگ در یک بستر سیال آزمایش کردند.

راکتور ۵ کیلوواتی جریان گردابی، نمونه دیگری از راکتورهای مستقیم خورشیدی بوده که برای تولید هیدروژن از تجزیه حرارتی گاز طبیعی^[18, 21] و گازی‌سازی زغال‌سنگ^[19] توسعه داده شده

فوتوالکتریک، خورشید را رهگیری می‌کنند. این کوره دارای یک متمرکزکننده سهموی به مساحت ۲۰۰۰ متر مربع با ارتفاع ۴۰ متر و عرض ۵۴ متر بوده که به سمت شمال واقع شده و نیز یک برج دریافت‌کننده به ارتفاع ۲۰ متر است. متمرکزکننده از ۹۵۰۰ عدد صفحه شیشه‌ای جداگانه تشکیل و طوری تنظیم شده است که حداکثر تابش تا ۹۵۰۰ خورشید (sun) (میزان متمرکزکنندگی پرتوهای خورشیدی با واحد خورشید یا sun سنجیده می‌شود) را به مرکز کانونی منعکس نماید که در ۱۸ متری از مرکز سهموی قرار دارد [26].

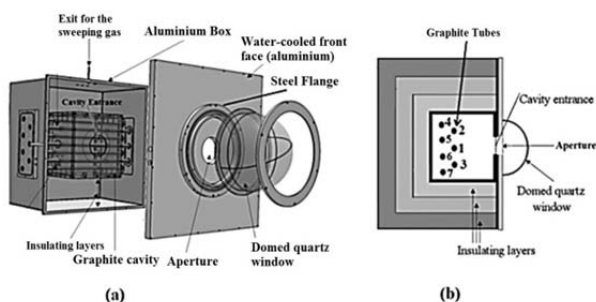
۲- کوره خورشیدی یک‌مگاواتی اودیلو

کوره خورشیدی یک‌مگاواتی (MWSF) مرکز تحقیقاتی PROMES، بزرگ‌ترین کوره خورشیدی در جهان است که در سال ۱۹۷۰ میلادی در منطقه‌ای به نام اودیلو در فرانسه احداث شد. کوره خورشیدی ذکرشده که در شکل ۱ آورده شده، از ۶۳ عدد هلیوستات تخت، هر کدام به ابعاد ۷/۵ در ۶ متر تشکیل شده است. این هلیوستات‌ها به سمت جنوب واقع شده‌اند و به صورت



شکل ۱) موقعیت نسبی ۶۳ هلیوستات و متمرکزکننده سهموی کوره بزرگ خورشیدی اودیلولی فرانسه (MWSF) [30]: (a) نمای جانبی، (b) نمای فوقانی

جلویی آن توسط آب خنک می‌شود و دارای یک روزنه به قطر ۱۳ سانتی‌متر است که تابش متمرکز خورشیدی از این قسمت وارد راکتور می‌شود. تابش خورشید توسط کاویتی گرافیتی به ابعاد (۳۶۰×۴۰۰×۳۰۰mm) جذب شده است که تقریباً مانند یک جسم سیاه رفتار می‌کند. هفت عدد لوله گرافیتی هر کدام به طول ۸۰۰mm، قطر خارجی ۲۶mm و قطر داخلی ۱۸mm به صورت افقی از داخل این کاویتی عبور کرده‌اند.



شکل ۲) شماتیک راکتور ۵۰ کیلوواتی رودت و همکاران [28]: (a) ترکیب کلی راکتور، (b) موقعیت لوله‌های گرافیتی

برای جلوگیری از تماس گرافیت با محیط اکسیدی، روزنه توسط

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، هلیوستات‌ها در هشت طبقه در ارتفاع‌های مختلف روی تپه‌ای قرار داده شده‌اند و تابش خورشید را به صورت افقی به متمرکزکننده سهموی ثابت منعکس می‌کنند که این پرتوها پس از برخورد به متمرکزکننده به مرکز کانونی آن بازتابیده می‌شوند. هر طبقه دارای دو ردیف هلیوستات است و هیچ گونه فاصله افقی بین هلیوستات‌ها وجود ندارد. ارتفاع طبقات نیز طوری تنظیم شده است که فاصله عمودی بین هلیوستات‌ها و به دنبال آن تصویر ایجادشده روی متمرکزکننده در زاویه‌های آزمون متوسط وجود نداشته باشد. دو درب کرکره‌ای بازتابنده در جلوی برج قرار داده شده است تا میزان تابش خورشیدی که به صفحه کانونی برخورد می‌کند، قابل کنترل باشد. میزان تابش مستقیم عمودی و داده‌های هندسی و اپتیک دریافت‌کننده، هلیوستات‌ها و متمرکزکننده سهموی از پژوهش ویلاسمیل [29] گرفته شده‌اند. سایر ابعاد این سیستم خورشیدی در شکل ۱ آورده شده است [30].

۳- راکتور خورشیدی

راکتور ۵۰ کیلوواتی که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته، در شکل ۲ نشان داده شده است. بدنه این راکتور از یک پوسته آلومینیومی ساخته شده (۸۰۰×۷۸۰×۵۵۰mm) است که وجه

از تقسیم تعداد پرتوهای برخوردی به سطح بر مساحت سطح محاسبه می‌شود[32].

در این مطالعه، نرم‌افزار SolTrace برای تعیین میزان تابش خورشیدی رسیده به سطوح داخلی راکتور به کار گرفته می‌شود. SolTrace، یک نرم‌افزار مدل‌سازی اپتیک است که از روش رهگیری اشعه مونت کارلو برای تخمین شدت تابش برخوردی به سطوح استفاده می‌کند[33]. این روش می‌تواند سیستم‌های متمرکزکننده خورشیدی را مدل‌سازی کند و کارایی آنها را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. با توجه به مباحث فوق، هلیوستات‌ها و متمرکزکننده سهموی MWSF توسط نرم‌افزار SolTrace مدل‌سازی می‌شوند.

شکل ۴ Error! Reference source not found. نحوه رهگیری اشعه‌ها از خورشید تا هدف واقع‌شده در مرکز کانونی متمرکزکننده سهموی را نشان می‌دهد. پرتوها به‌صورت جداگانه از خورشید ساطع شده‌اند و پس از برخورد هلیوستات‌ها به‌صورت افقی منعکس می‌شوند و به متمرکزکننده سهموی برخورد می‌کنند، سپس متمرکزکننده، این پرتوها را به نقطه کانونی خود منعکس می‌کند.

در این شبیه‌سازی، هلیوستات‌ها به‌صورت سطوح مستطیل مدل می‌شوند که قادرند به‌صورت جداگانه و با توجه به ساعت و روز سال، موقعیت خورشید را ردیابی نمایند. جهت قرارگرفتن هلیوستات‌ها را با توجه به شکل ۴ می‌توان به دست آورد. ابتدا بردار نرمال پرتوهای ساطع‌شده از خورشید با توجه به زوایای ارتفاع (altitude angle α_s) و سمت (azimuth angle γ_s) خورشیدی، از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\omega = 15(Hr - 12) \quad (۱)$$

$$\delta = 23.45 \sin[360(284 + Day)/365] \quad (۲)$$

$$\alpha_s = \sin^{-1}(\cos L \cos \delta \cos \omega + \sin L \sin \delta) \quad (۳)$$

$$\gamma_s = \cos^{-1}[(\sin \alpha_s \sin L - \sin \delta) / \cos \alpha_s \cos L] \quad (۴)$$

بردار نرمال اشعه تابیده از خورشید نیز به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\hat{x} = \sin \gamma_s \cos \alpha_s \quad (۵)$$

$$\hat{y} = \sin \alpha_s \quad (۶)$$

$$\hat{z} = \cos \gamma_s \cos \alpha_s \quad (۷)$$

حال با توجه به این که جهت پرتوی بازتابیده از هلیوستات باید حتماً در راستای محور z باشد و به‌صورت افقی به متمرکزکننده سهموی برخورد نماید، لذا بردار نرمال $\vec{r}$ که همان بردار اشعه بازتابیده از هلیوستات است، به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\vec{r} = 0\vec{i} + 0\vec{j} + 1\vec{k} \quad (۸)$$

بنابراین بردار نرمال هلیوستات را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$\vec{n} = \vec{s} - \vec{r} \quad (۹)$$

این بردار از اختلاف بردار نرمال پرتوهای ساطع‌شده از خورشید و بردار اشعه بازتابیده از هلیوستات محاسبه می‌شود.

برای مطالعه میزان تابش غیریکنواخت روی لوله‌ها، پارامتری تحت عنوان i که بیانگر میزان غیریکنواختی تابش است، به‌صورت زیر تعریف می‌شود[34]:

یک شیشه کوارتز گنبدی شکل پوشانده شده است و داخل آن توسط جریان نیتروژن جاروب می‌شود. شکل نیم‌کره‌ای شیشه نسبت به شیشه تخت دارای این مزیت بوده که به‌علت نزدیک‌نبودن آن به کاوبیتی داغ و مرکز کانونی، از افزایش دمای بیش از حد آن جلوگیری شده است و مانع شکسته‌شدن آن می‌شود. فضای بین کاوبیتی گرافیتی و پوسته آلومینیومی با سه لایه عایق مختلف با مجموع ضخامت ۱۵ سانتی‌متر برای جلوگیری از اتلاف گرمای هدایتی پر شده است[28]. ۳۵ عدد از هلیوستات‌های داخلی که در شکل ۳ با رنگ تیره‌تر مشخص شده‌اند، برای فراهم‌کردن توان ۵۰ کیلووات مورد نیاز به کار گرفته شده‌اند.

			83	84	85	86	87	
		72	73	74	75	76	77	78
61	62	63	64	65	66	67	68	69
51	52	53	54	55	56	57	58	59
41	42	43	44	45	46	47	48	49
31	32	33	34		36	37	38	39
21	22	23	24		26	27	28	29
11	12	13	14		16	17	18	19

شکل ۳) نمای رو به شمال هلیوستات‌های کوره بزرگ خورشیدی[28]

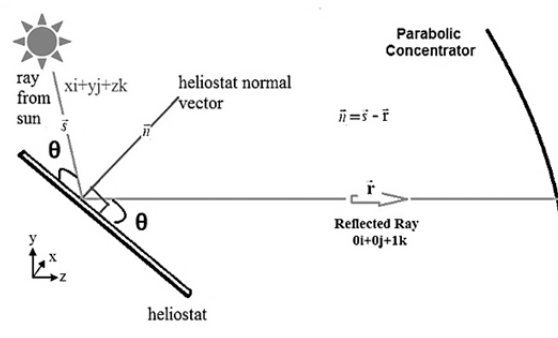
۴- روش رهگیری اشعه مونت کارلو

روش مونت کارلو جنبه کاربردی شبیه‌سازی تصادفی با توجه به گسترش، رشد و پیشرفت رایانه‌ها است. طی نیم‌قرن اخیر، روش مونت کارلو بیش از پیش در حل مسائل مختلف ریاضی، فیزیک و مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. می‌توان گفت روش مونت کارلو یک روش عددی حل مسائل با استفاده از نمونه‌گیری تصادفی است. به بیان دقیق‌تر، روش مونت کارلو، روابط ریاضی را که ممکن است مدل‌شده قوانین فیزیکی باشند، مستقیماً به‌وسیله فرایندهای تصادفی مدل می‌کند. این روش‌ها با انجام تکرار بسیار زیاد الگوریتم‌ها و محاسبات رایانه‌ای همراه هستند. روش‌های مونت کارلو برای سامانه‌های پیچیده غیرخطی با درجه عدم قطعیت زیاد مانند اغتشاش در سیالات، محیط‌های ناهمگن، ساختارهای سلولی یا سامانه‌های با ورودی‌های نامعین با موفقیت به کار می‌رود[31].

روش رهگیری اشعه مونت کارلو ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی سیستم‌های خورشیدی است. در این روش، تعداد زیادی از پرتوهای ساطع‌شده از خورشید رهگیری‌شده و پس از ورود به داخل سیستم تعریف‌شده، با سطوح مختلف برخورد می‌کنند. انرژی تمامی پرتوها مساوی بوده و هر پرتو دارای جهت مشخصی است که از تابع چگالی احتمال مناسب به دست می‌آید. بسته به خواص سطوح (ضریب صدور، ضریب انعکاس و ضریب جذب)، هر پرتو مسیر مشخصی را طی می‌کند که با استفاده از روابط آماری تعیین می‌شود. توزیع انرژی پرتوها به ضرایب صدور، انعکاس و جذب مواد نیز بستگی دارد. برای سطوح دیفیوز، جهت انعکاس به‌صورت تصادفی تعیین می‌شود، در حالی که در سطوح آینه‌ای، جهت انعکاس با توجه به زاویه برخورد تعیین می‌شود. محاسبات تا هنگامی که پرتوها جذب شوند یا از طریق روزنه ورودی به اجزای کاوبیتی منتقل شوند، ادامه می‌یابد. تمامی سطوح داخلی به اجزای مشخصی، تقسیم و شار خورشیدی روی دیواره‌های داخلی کاوبیتی

$$i = \Delta R / R_{avg} = (R_{max} - R_{min}) / R_{avg} \quad (10)$$

در این رابطه، ΔR معرف اختلاف بین مقادیر تابش بیشینه (R_{max}) و کمینه (R_{min}) است و متوسط تابش روی یک ناحیه مشخص با R_{avg} تعریف می‌شود.

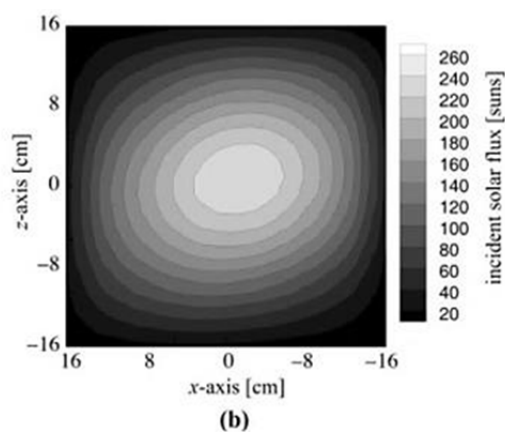
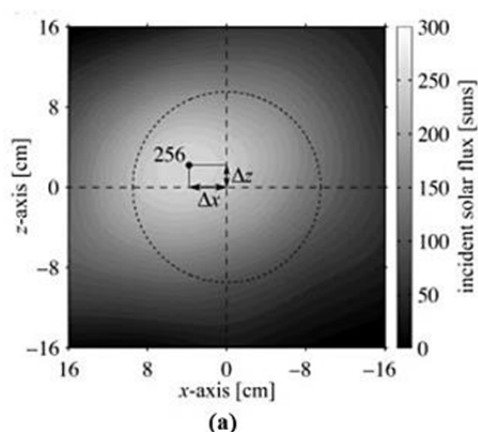


شکل ۴) شماتیک محاسبه بردار نرمال هلیوستات

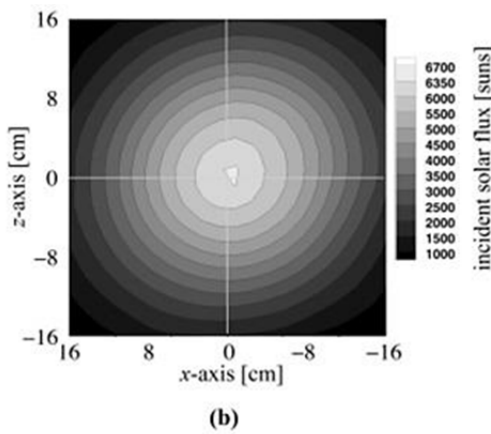
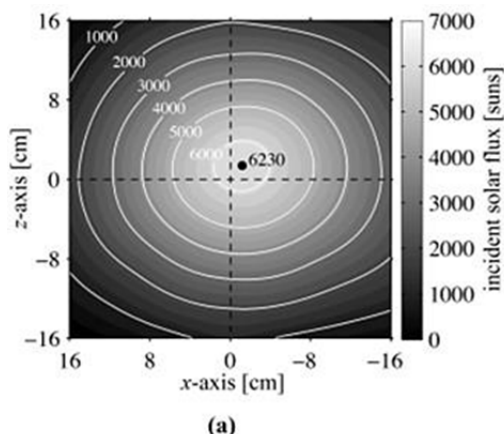
۵- نتایج

۵-۱- اعتبارسنجی نتایج

برای اطمینان از صحت مدل‌سازی، نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصل از آزمون‌هایی که توسط ویلاسملیل و همکاران^[29] روی این کوره خورشیدی صورت گرفته، مقایسه شده است. آنها شار گرمایی

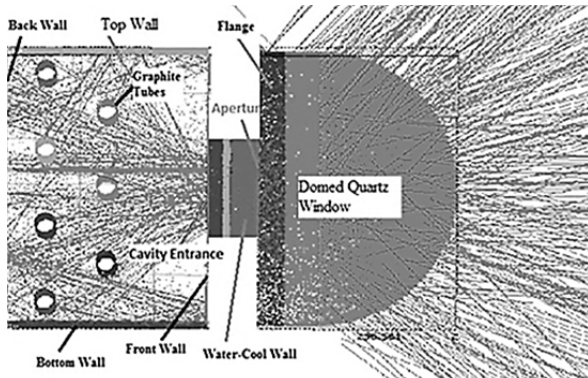


شکل ۵) توزیع شار خورشیدی ناشی از هلیوستات ۴۷ روی یک صفحه ۳۰×۳۰ سانتی‌متری واقع در مرکز کانونی متمرکزکننده سهموی؛ الف) نتایج اندازه‌گیری شده^[29]، ب) نتایج شبیه‌سازی شده



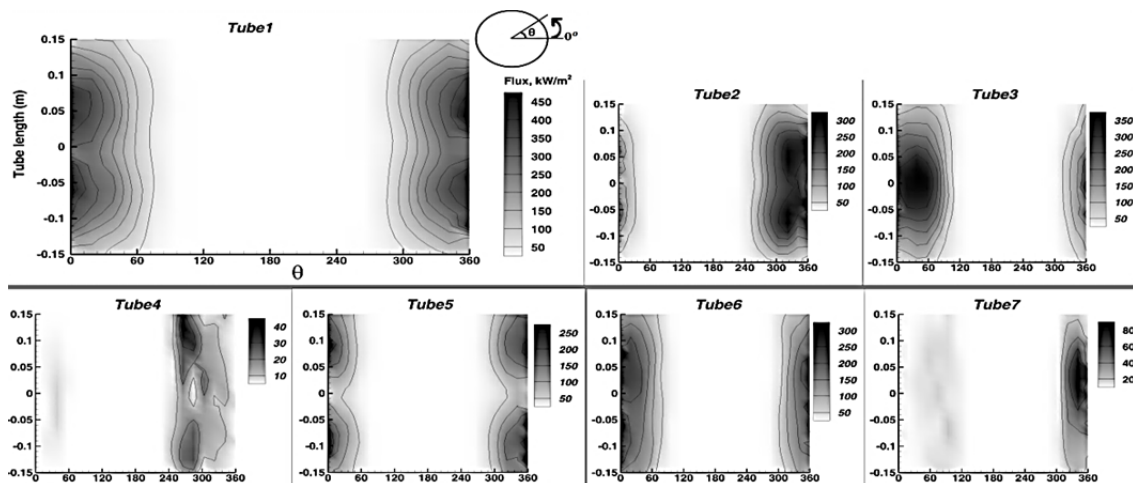
شکل ۶) توزیع شار خورشیدی حاصل از ۳۶ عدد از هلیوستات‌ها روی یک صفحه ۳۰×۳۰ سانتی‌متری واقع در مرکز کانونی متمرکزکننده سهموی؛ الف) نتایج اندازه‌گیری شده^[30]، ب) نتایج شبیه‌سازی شده

رسیده به روزنه راکتور (Aperture در شکل ۷) نیز ۴۰/۳۴ کیلووات بوده که بیانگر ۲۶٪ افت توان اپتیک راکتور است. شبیه‌سازی برای دو حالت مختلف، یکی قرارگرفتن روزنه (Aperture در شکل ۷) در مرکز کانونی و حالت دیگر قراردادن ورودی کاویتی (Cavity Entrance در شکل ۷) در مرکز کانونی متمرکزکننده صورت گرفته است که به‌علت فاصله کم بین این دو مجرا، تغییرات چندانی در شار خورشیدی رسیده به قسمت‌های مختلف راکتور مشاهده نشد.



شکل ۷) برخورد پرتوها به نقاط مختلف راکتور ۵۰ کیلوواتی

توزیع شار تابشی روی لوله‌های گرافیتی داخل راکتور در شکل ۸ نشان داده شده است. لوله ۱ که مستقیماً مقابل روزنه قرار دارد، بیشترین تابش خورشید و لوله‌های ۴ و ۷ کمترین تابش را جذب می‌کنند. این تابش کم به‌علت سایه ایجادشده توسط دیواره‌های راکتور و لوله‌های جلویی روی این لوله‌ها است که موجب می‌شوند اشعه‌های خورشید که از طریق روزنه وارد راکتور شدند، به این لوله‌ها نرسند. چنانچه قبلاً نیز اشاره شد، برای دستیابی به راندمان بیشینه و اطمینان از عملکرد مطمئن یک راکتور خورشیدی در مدت‌زمان طولانی لازم است که توزیع دمای یکنواخت روی قسمت‌های مختلف یک راکتور خورشیدی وجود داشته باشد. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که شار تابشی خورشید روی هیچ کدام از لوله‌ها به‌صورت یکنواخت توزیع نشده است و اختلاف زیادی در قسمت‌های جلو و عقب لوله دیده می‌شود که این امر علاوه بر ایجاد تنش حرارتی روی لوله‌ها به‌علت عدم توزیع یکنواخت دما، راندمان راکتور را نیز پایین می‌آورد. لازم به ذکر بوده که تابش صادرشده از دیواره‌های راکتور در این محاسبات لحاظ نشده است.



شکل ۸) شار تابشی ایجادشده روی لوله‌های داخل راکتور مکعبی کاملاً جاذب

۵-۲- راکتور مکعبی ۵۰ کیلوواتی با دیواره‌های جاذب

شبیه‌سازی مونت کارلو برای راکتور ۵۰ کیلوواتی مورد نظر در ساعت ۱۲ خورشیدی روز ۲۶ سپتامبر (سیصدمین روز سال)، یعنی همان زمانی که آزمایش‌ها روی این راکتور انجام شده، صورت گرفته است و میزان DNI برابر با 1 kW/m^2 در نظر گرفته شده است [29]. شکل ۷ محل برخورد تعدادی از پرتوهای بازتابیده از متمرکزکننده سهموی را به قسمت‌های مختلف راکتور نشان می‌دهد.

بعد از ورود پرتوها به داخل کاویتی، آنهایی که به لوله‌ها برخورد می‌کنند، جذب می‌شوند و مابقی که به دیواره‌ها برخورد می‌کنند، بسته به ضریب جذب دیواره‌ها، جذب دیواره‌ها می‌شوند یا بازتابیده می‌شوند. پرتوهای بازتابیده پس از برخوردهای پی‌درپی با دیواره‌ها در نهایت یا جذب لوله‌ها می‌شوند یا از طریق روزنه به خارج راکتور هدایت می‌شوند که در این صورت به‌عنوان تابش تلف‌شده در نظر گرفته می‌شوند. لازم به ذکر است که تعداد پرتوهای ساطع‌شده، ۲/۲ میلیون پرتو بوده که بیشترین تعداد پرتویی است که با افزایش آن، تغییرات در مقادیر شار تابشی کمتر از ۲٪ خواهیم داشت. توان خورشیدی رسیده به قسمت‌های مختلف راکتور در صورتی که دیواره‌های داخلی راکتور کاملاً جاذب باشند، در جدول ۱ آورده شده است.

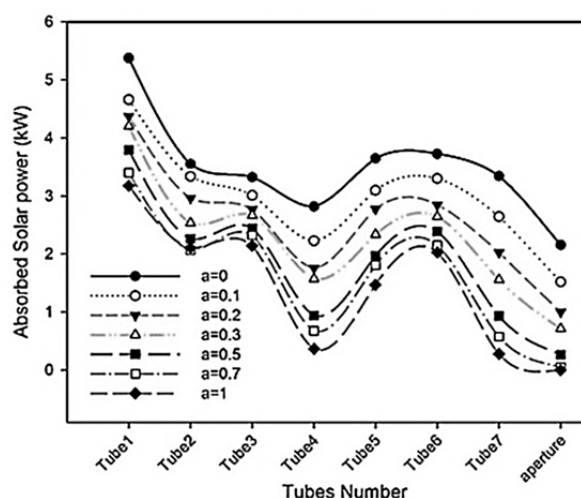
جدول ۱) توان خورشیدی رسیده به قسمت‌های مختلف راکتور (اجزای مورد نظر در شکل ۷ نشان داده شده است).

قسمت‌های داخلی راکتور	توان خورشیدی جذب‌شده (کیلووات)
شیشه کوارتز	۱۳۰/۵۰
دیواره خنک‌شونده با آب	۹۵/۶۴
روزنه ورودی	۴۰/۳۴
ورودی کاویتی	۲۸/۸۹
دیواره بالایی	۱/۴۸
دیواره پایینی	۲/۴۴
دیواره سمت چپ	۲/۹۲
دیواره سمت راست	۲/۷۹
دیواره پشت	۷/۶۱
دیواره جلویی	*

اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط رودت و همکاران [28] نشان می‌دهد که توان حرارتی رسیده به ورودی کاویتی (Cavity Entrance در شکل ۷) ۲۸/۴ کیلووات است. مدل شبیه‌سازی‌شده نیز توان را ۲۸/۸۹ کیلووات در مکان ذکرشده نشان می‌دهد. توان

۳-۵- تاثیر ضریب جذب دیواره‌های داخلی راکتور

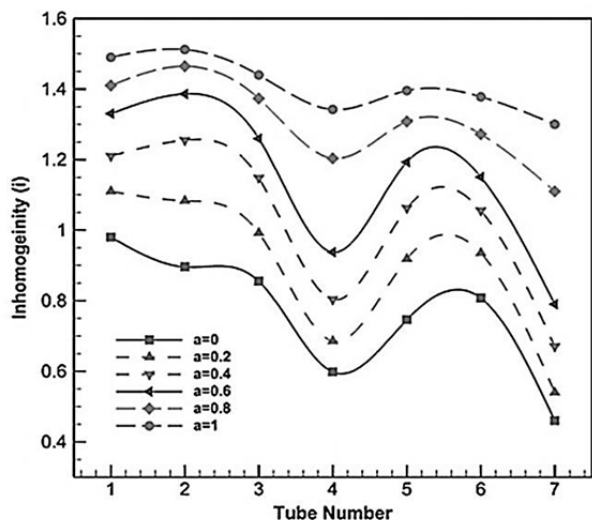
برای بهبود یکنواختی توزیع شار تابشی، دیواره‌های داخلی راکتور، منعکس‌کننده در نظر گرفته و تغییرات حاصل بررسی می‌شود. نمودار ۱، توان خورشیدی جذب‌شده توسط لوله‌ها را در ضریب جذب‌های مختلف دیواره‌های کاویتی نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با کاهش ضریب جذب دیواره‌های داخلی راکتور، توان خورشیدی رسیده به لوله‌ها نیز افزایش می‌یابد. مشکلی که در حالت دیواره‌های منعکس‌کننده وجود دارد، اتلاف مقداری از تابش خورشیدی توسط پرتوهای خارج‌شده از طریق روزنه ورودی راکتور است. در صورت جایگزینی دیواره‌های جذب‌کننده با دیواره‌های منعکس‌کننده، علاوه بر این که توان جذب‌شده توسط لوله‌ها، حدوداً دوبرابر می‌شود، اختلاف بین تابش رسیده به لوله‌ها نیز بسیار کم می‌شود.



نمودار ۱) توان جذب‌شده توسط لوله‌های گرافیتی و توان بازتابش‌شده از روزنه در ضرایب جذب مختلف دیواره‌های راکتور

لوله‌ها به سایر لوله‌ها نزدیک می‌شود.

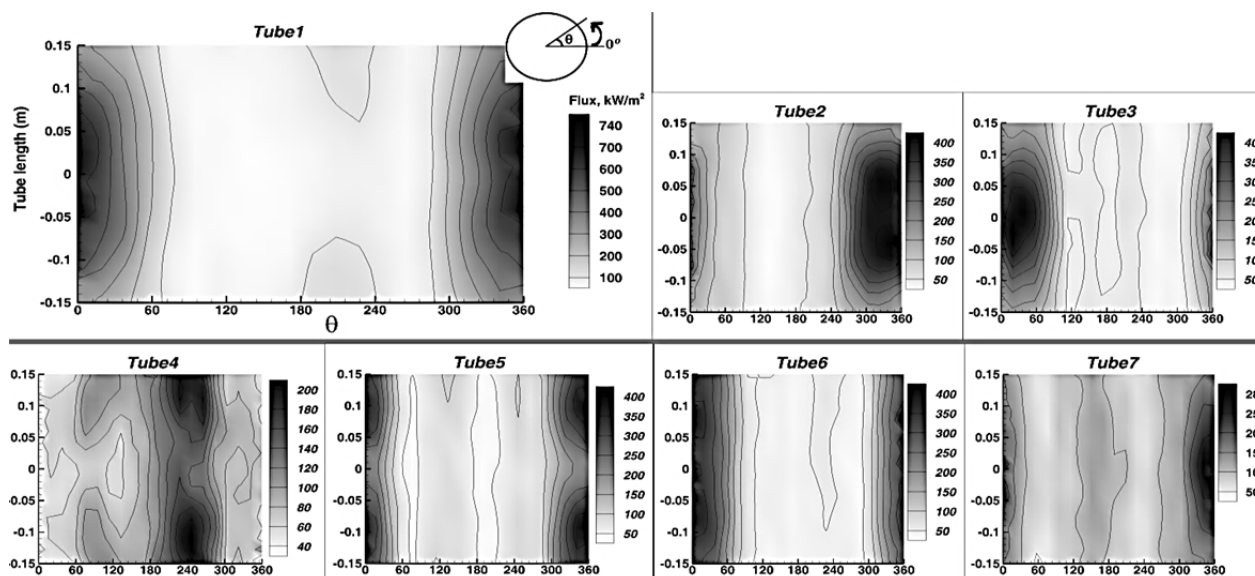
تاثیر ضریب جذب دیواره‌های راکتور روی ضریب یکنواختی توزیع شار لوله‌های گرافیتی در نمودار ۲ نشان داده شده است. با توجه به نمودار، افزایش ضریب انعکاس دیواره‌های راکتور منجر به یکنواختی توزیع شار روی لوله‌های داخل راکتور می‌شود. لوله‌های ۴ و ۷ دارای کمترین یکنواختی میان سایر لوله‌ها هستند.



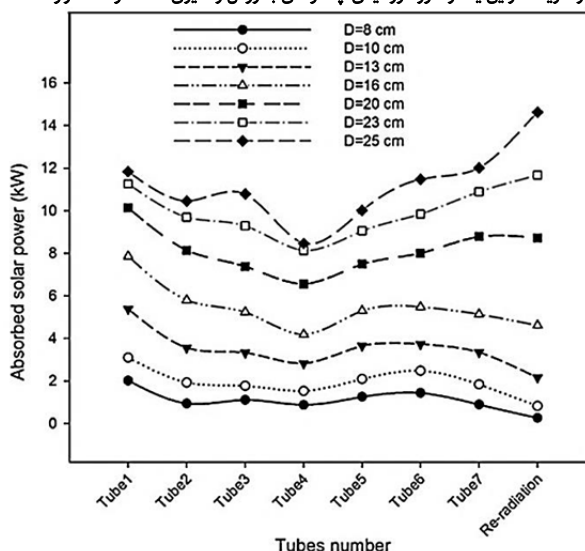
نمودار ۲) ضریب یکنواختی تابشی لوله‌های گرافیتی در ضرایب جذب مختلف دیواره‌های راکتور

۴-۵- سطوح داخلی کاملاً منعکس‌کننده

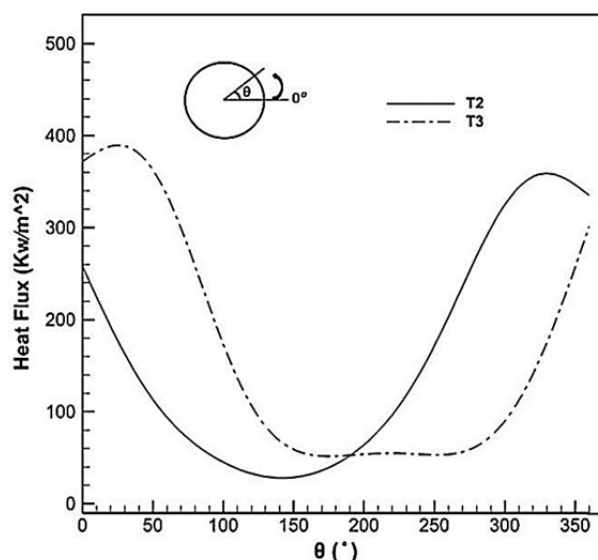
در شکل ۹، توزیع شار تابشی روی لوله‌ها برای دیواره‌های با ضریب جذب صفر آورده شده است. در این حالت توزیع شار کمی یکنواخت‌تر است، اما همچنان در قسمت‌های جلو و پشت لوله اختلاف شار مشاهده می‌شود. در نمودار ۳، توزیع تابش روی محیط و در قسمت وسط لوله‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. با توجه به این که این دو لوله به‌صورت قرینه در داخل راکتور قرار گرفته، شار تابشی روی آنها نیز به‌صورت متقارن توزیع شده که خود بیانگر صحت شبیه‌سازی است.



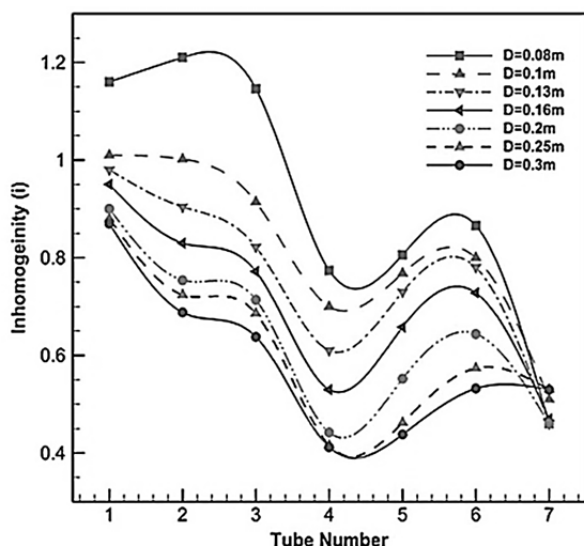
شکل ۹) شار تابشی ایجادشده روی لوله‌های داخل راکتور مکعبی کاملاً منعکس‌کننده



نمودار ۴) توان تابشی جذب‌شده توسط لوله‌ها و توان تلف‌شده در سایزهای مختلف روزنه ورودی



نمودار ۳) توزیع شار تابشی روی لوله‌های ۲ و ۳ در حالت راکتور مکعبی منعکس‌کننده



نمودار ۵) ضریب غیریکنواختی لوله‌های گرافیتی در سایزهای مختلف روزنه ورودی

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش رهگیری اشعه مونت کارلو برای شبیه‌سازی یک کوره خورشیدی یک‌مگاواتی و یک راکتور خورشیدی ۵۰ کیلوواتی که برای تجزیه متان مورد آزمایش قرار گرفته است، با موفقیت توسعه داده شد. این شبیه‌سازی با توجه به آزمایش‌های انجام‌گرفته که در تاریخچه ذکر شد، اعتبارسنجی شد. در این مطالعه مشخص شد با جایگزین کردن دیواره‌های منعکس‌کننده به جای دیواره‌های جاذب، توان بیشتری توسط لوله‌ها جذب و منجر به توزیع شار بهتری می‌شود. همچنین با افزایش قطر روزنه ورودی، توان ورودی راکتور و نیز اتلاف توان بازتابش از روزنه افزایش می‌یابد و این امر در قطرهای بیشتر از ۱۶ سانتی‌متر شدت می‌گیرد. بزرگ‌تر کردن قطر روزنه ورودی منجر به یکنواختی بهتر توزیع شار خورشیدی در اطراف لوله‌های گرافیتی می‌شود.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تأییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

۵- تاثیر قطر روزنه ورودی

برای بررسی تاثیر سایز روزنه ورودی راکتور روی توان جذب‌شده توسط لوله‌ها و توان تلف‌شده از طریق روزنه ورودی، شبیه‌سازی برای قطرهای مختلف از ۸ تا ۲۵ سانتی‌متر، انجام و نتایج آن برای دیواره‌های کاملاً منعکس‌کننده در نمودار ۴ آورده شده است.

برای سایزهای کوچک‌تر روزنه، اگر چه تعداد پرتوهای کمتری وارد راکتور می‌شود و توان کمتری جذب لوله‌ها می‌شود، ولی افت ناشی از بازتابش نیز کم است و اغلب پرتوهای واردشده به داخل راکتور پس از بازتابش‌های مکرر در داخل راکتور، در نهایت جذب لوله‌ها می‌شوند. با افزایش روزنه ورودی، توان ورودی راکتور و نیز اتلاف توان بازتابش از روزنه افزایش می‌یابد و این امر در قطرهای بیشتر از ۱۶ سانتی‌متر شدت پیدا می‌کند.

توان جذب‌شده توسط لوله‌های گرافیتی برای سایزهای روزنه ورودی کوچک‌تر از ۱۶ سانتی‌متر دارای الگوی یکسانی است. لوله ۱ بیشترین تابش خورشید را دریافت و لوله ۷ کمترین میزان تابش را جذب می‌کند. با افزایش سایز روزنه ورودی از ۱۶ سانتی‌متر، لوله‌های واقع در قسمت پایینی راکتور (لوله‌های ۶ و ۷) تابش بیشتری نسبت به لوله‌های فوقانی جذب می‌نمایند. چنانچه مشاهده می‌شود تابش جذب‌شده توسط لوله ۷ حتی از لوله ۱ نیز بیشتر شده است.

نمودار ۵، میزان غیریکنواختی تابش لوله‌های گرافیتی را در سایزهای مختلف روزنه ورودی نشان می‌دهد. به‌طور کلی سایزهای بزرگ‌تر روزنه ورودی منجر به بهبود یکنواختی توزیع تابش خورشیدی روی لوله‌های گرافیتی می‌شود. این نمودار رفتار مشابهی را برای غیریکنواختی تابش روی لوله‌ها در سایزهای مختلف روزنه ورودی نشان می‌دهد. لوله ۱ دارای بیشترین غیریکنواختی و لوله‌های ۴ و ۷ کمترین غیریکنواختی را برای تمامی سایزهای روزنه ورودی دارند. یکنواختی توزیع شار خورشیدی روی لوله ۷ تقریباً به سایز روزنه ورودی بستگی ندارد و همان‌طور که در نمودار ۵ دیده می‌شود، ضریب غیریکنواختی آن برای تمامی سایزهای روزنه در حدود ۰/۴۵ ثابت مانده است.

- collector concentrator. Renewable Energy. 2011;36(1):90-96.
- 11- Qiu Y, He YL, Wu M, Zheng ZJ. A comprehensive model for optical and thermal characterization of a linear Fresnel solar reflector with a trapezoidal cavity receiver. Renewable Energy. 2016;97:129-144.
- 12- Bellos E, Mathioulakis E, Tzivanidis Ch, Belessiotis V, Antonopoulos KA. Experimental and numerical investigation of a linear Fresnel solar collector with flat plate receiver. Energy Conversion and Management. 2016;130:44-59.
- 13- Mills DR, Morrison GL. Compact linear Fresnel reflector solar thermal powerplants. Solar Energy. 2000;68(3):263-283.
- 14- Lin M, Sumathy K, Dai YJ, Wang RZ, Chen Y. Experimental and theoretical analysis on a linear Fresnel reflector solar collector prototype with V-shaped cavity receiver. Applied Thermal Engineering. 2013;51(1-2):963-972.
- 15- Pye JD, Morrison GL, Behnia M, Mills D. Modelling of cavity receiver heat transfer for the compact linear fresnel reflector. ANZSES Annual Conference Melbourne, January 2003. Göteborg: Sweden; 2003. p. 69.
- 16- Abbas R, Valdés M, Montes MJ, Martínez-Val JM. Design of an innovative linear Fresnel collector by means of optical performance optimization: A comparison with parabolic trough collectors for different latitudes. Solar Energy. 2017;153:459-470.
- 17- Abanades S, Flamant G. Solar hydrogen production from the thermal splitting of methane in a high temperature solar chemical reactor. Solar Energy. 2006;80(10):1321-1332.
- 18- Hirsch D, Steinfeld A. Solar hydrogen production by thermal decomposition of natural gas using a vortex-flow reactor. International Journal of Hydrogen Energy. 2004;29(1):47-55.
- 19- Z'graggen A, Haueter P, Maag G, Vidal A, Romero M, Steinfeld A. Hydrogen production by steam-gasification of petroleum coke using concentrated solar power-III. Reactor experimentation with slurry feeding. International Journal of Hydrogen Energy. 2007;32(8):992-996.
- 20- Von Zedtwitz P, Lipiński W, Steinfeld A. Numerical and experimental study of gas-particle radiative heat exchange in a fluidized-bed reactor for steam-gasification of coal. Chemical Engineering Science. 2007;62(1-2):599-607.
- 21- Maag G, Zanganeh G, Steinfeld A. Solar thermal cracking of methane in a particle-flow reactor for the co-production of hydrogen and carbon. International Journal of Hydrogen Energy. 2009;34(18):7676-7685.
- 22- Villasmil W, Brkic M, Wuillemin D, Meier A, Steinfeld A. Pilot scale demonstration of a 100-kWth solar thermochemical plant for the thermal dissociation of ZnO. Journal of Solar Energy Engineering. 2014;136(1):011016.
- 23- Martinek J, Weimer AW. Design considerations for a multiple tube solar reactor. Solar Energy. 2013;90:68-83.
- 24- Dahl JK, Buechler KJ, Finley R, Stanislaus T, Weimer AW, Lewandowski A, et al. Rapid solar-thermal dissociation of natural gas in an aerosol flow reactor. Energy. 2004;29(5-6):715-725.
- 25- Rodat S, Abanades S, Flamant G. Co-production of hydrogen and carbon black from solar thermal methane splitting in a tubular reactor prototype. Solar Energy. 2011;85(4):645-652.
- 26- Trombe F, Le Phat Vinh A. Thousand kW solar

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: عبدالله ریاحی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ کاظم آتشکاری (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ جواد محمودی مهر (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

۷- پی نوشت

علام

شماره روز سال (میلادی)	Day
میزان تابش مستقیم خورشید	DNI
ساعت، زمان خورشیدی	Hr
ضریب غیریکنواختی	i
ارتفاع	L
بردار نرمال هلیوستات	$\vec{n}$
بردار نرمال اشعه بازتابیده از هلیوستات	$\vec{r}$
مقدار متوسط تابش	R_{avg}
مقدار تابش بیشینه	R_{max}
مقدار تابش کمینه	R_{min}
بردار نرمال اشعه خورشید	$\vec{s}$
بردار نرمال اشعه خورشید به سمت شمال	$\hat{x}$
بردار نرمال اشعه خورشید به طرف سمت الراس	$\hat{y}$
بردار نرمال اشعه خورشید به سمت غرب	$\hat{z}$

علام یونانی

زاویه ساعت	ω
زاویه انحراف خورشید	δ
زاویه ارتفاع خورشید (در افق این زاویه صفر است)	α_s
زاویه سمت (بعد از ظهر +، صبح - و رو به جنوب صفر)	γ_s

منابع

- 1- Bjorndalen N. High temperature solar furnace: Current applications and future potential. Energy Sources. 2003;25(2):153-159.
- 2- Shuai Y, Xia XL, Tan HP. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems. Solar Energy. 2008;82(1):13-21.
- 3- Xie WT, Dai YJ, Wang RZ. Numerical and experimental analysis of a point focus solar collector using high concentration imaging PMMA Fresnel lens. Energy Conversion and Management. 2011;52(6):2417-2426.
- 4- Mao Q, Shuai Y, Yuan Y. Study on radiation flux of the receiver with a parabolic solar concentrator system. Energy Conversion and Management. 2014;84:1-6.
- 5- Larrourou F, Caliot C, Flamant G. Effect of directional dependency of wall reflectivity and incident concentrated solar flux on the efficiency of a cavity solar receiver. Solar Energy. 2014;109:153-164.
- 6- Li S, Xu G, Luo X, Quan Y, Ge Y. Optical performance of a solar dish concentrator/receiver system: Influence of geometrical and surface properties of cavity receiver. Energy. 2016;113:95-107.
- 7- Daabo AM, Mahmoud S, Al-Dadah RK. The optical efficiency of three different geometries of a small scale cavity receiver for concentrated solar applications. Applied Energy. 2016;179:1081-1096.
- 8- Abbas R, Muñoz-Antón J, Valdés M, Martínez-Val JM. High concentration linear Fresnel reflectors. Energy Conversion and Management. 2013;72:60-68.
- 9- Moghimi MA, Craig KJ, Meyer JP. A novel computational approach to combine the optical and thermal modelling of Linear Fresnel Collectors using the finite volume method. Solar Energy. 2015;116:407-427.
- 10- Facão J, Oliveira AC. Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar

Comparison of 3 heat flux gauges and a water calorimeter for concentrated solar irradiance measurement. *Energy Procedia*. 2014;49:2090-2099.

31- Polyanin AD, Manzhirov AV. *Handbook of mathematics for engineers and scientists*. 1th Edition. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC; 2006.

32- Howell JR, Menguc MP, Siegel R. *Thermal radiation heat transfer*. 5th Edition. Boca Raton: CRC press; 2010.

33- Wendelin T. SolTRACE: A new optical modeling tool for concentrating solar optics. ASME 2003 International Solar Energy Conference, 15-18 March, 2003, Kohala Coast, Hawaii, USA. New York: American Society of Mechanical Engineers; 2003. p. 253-260.

34- Reis F. *Development of photovoltaic systems with concentration* [Dissertation]. Lisbon: University of Lisbon; 2013.

furnace, built by the National Center of Scientific Research, in Odeillo (France). *Solar Energy*. 1973;15(1):57-61.

27- Rodat S, Abanades S, Sans JL, Flamant G. Hydrogen production from solar thermal dissociation of natural gas: Development of a 10 kW solar chemical reactor prototype. *Solar Energy*. 2009;83(9):1599-1610.

28- Rodat S, Abanades S, Sans JL, Flamant G. A pilot-scale solar reactor for the production of hydrogen and carbon black from methane splitting. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010;35(15):7748-7758.

29- Villasmil W. *Dynamic modeling and experimental demonstration of a 100-kWth solar thermochemical reactor for ZnO dissociation* [Dissertation]. Zurich: ETH Zurich; 2013.

30- Guillot E, Alxneit I, Ballestrin J, Sans JL, Willsh Ch.