



طراحی میدان هلیوستات برای یک نیروگاه توربین گاز خورشیدی با توان ثابت ۳ مگاوات

چکیده: به کارگیری انرژی های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی می تواند جایگزین مناسبی برای کاهش مصرف سوخت های فسیلی باشد. در این پژوهش به بررسی ترکیب توربین گاز و مزرعه خورشیدی دارای دریافت کننده مرکزی، پرداخته شده است. هدف از این پژوهش استفاده از انرژی خورشید برای پیش گرم کردن هوای خروجی از کمپرسور است که بدین ترتیب می توان سوخت کمتری در محفظه احتراق مصرف نمود. ابتدا طراحی میدان هلیوستات انجام شده است. بدین منظور با یک حدس اولیه برای ماکزیمم شعاع قرارگیری هلیوستات ها، محل قرارگیری هر یک از هلیوستات ها در اطراف برج مرکزی تعیین شده است. همچنین برای ردیابی خورشید توسط هر یک از هلیوستات ها، زوایای قرارگیری آن ها در ساعات مختلف روز محاسبه شده است. از نوآوری های این پژوهش محاسبه تغییرات زاویه قرارگیری هلیوستات ها در طول روز است. به منظور طراحی میدان هلیوستات، یک GUI طراحی شده است که چیدمان هلیوستات ها در مزرعه خورشیدی را تعیین می کند و سپس زوایای هلیوستات ها را به صورت تابعی از مکان آن ها و موقعیت جغرافیایی منطقه برای ساعات مختلف و در هر یک از روزهای سال محاسبه می نماید. در مقاله حاضر با در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایی چند شهر مختلف و با فرض توان ثابت ۱ مگاوات برای مزرعه خورشیدی، طراحی میدان هلیوستات انجام شده است. طبق نتایج حاصل شده شهر یزد پتانسیل خوبی از لحاظ تابش دارد و به تعداد هلیوستات های کمتری در مزرعه خورشیدی نیاز است. در این جا با ترکیب مزرعه خورشیدی طراحی شده در شهر یزد و توربین گاز ۳ مگاواتی CENTAUR-40 نشان داده شده است که می توان دمای هوای خروجی از کمپرسور را قبل از ورود به محفظه احتراق حدود ۲۰٪ افزایش داد و تا ۱۴٪ در مصرف سوخت صرفه جویی نمود.

واژه های راهنما: انرژی خورشیدی، نیروگاه دریافت کننده مرکزی، میدان هلیوستات، زوایای هلیوستات، توربین گاز، مصرف سوخت

زهرا سادات

میرآقای جعفری

دانشجوی دکتری

رضا ابراهیمی*

استاد،

دانشکده مهندسی هوافضا،

دانشگاه صنعتی

خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۸

Design of heliostat field for a 3 MW solar-gas turbine power plant

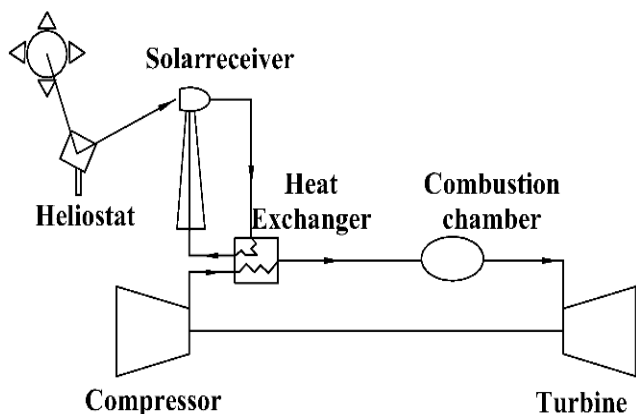
Zahra Sadat
Miraghaei Jafari,
PhD Student

Reza Ebrahimi,
Professor,
Faculty of Aerospace
Engineering,
K. N. Toosi University of
Technology, Tehran

Abstract: The use of renewable energies, including solar energy, can be a suitable alternative to reduce the consumption of fossil fuels. In this research, the combination of a gas turbine and a solar farm is investigated. The objective of this study is to utilize solar energy to preheat the air at the exit of the compressor, thereby reducing fuel consumption in the combustion chamber. First, the heliostat field was designed. For this purpose, an initial estimate of the maximum radius for heliostat placement was made, and the position of each heliostat around the central tower was determined. Additionally, the angles of the heliostats were calculated for different times of the day to ensure solar tracking. That's the innovations of this research. To design the heliostat field, a MATLAB GUI was developed that determines the layout of the heliostats in the solar farm and then calculates their angles. In the present study, the heliostat field was designed for several different cities, assuming a constant solar farm capacity of 1 MW. According to the results, the city of Yazd has strong solar irradiation potential, requiring fewer heliostats in the solar farm. By integrating the designed solar farm in Yazd with a 3 MW CENTAUR-40 gas turbine, the temperature of the air exiting the compressor can be increased by approximately 20% before entering the combustion chamber, leading to a 14% reduction in fuel consumption.

Keywords: Solar energy, Central tower power plant, Heliostat field, Heliostat angles, Gas turbine, Fuel consumption

۱- مقدمه



شکل ۱ سیکل توربین گاز و انرژی خورشیدی

استفاده از سوخت‌های فسیلی باعث آلودگی هوا و افزایش گازهای مضر از جمله دی‌اکسیدکربن و افزایش اثر گازهای گلخانه‌ای می‌شود. گرمایش حاصل از چنین سیستم‌هایی باعث افزایش گرمای محیط زیست و ایجاد خطراتی برای موجودات زنده می‌گردد. افزایش تقاضای مصرف سوخت‌های فسیلی باعث گرایش به سمت سوخت‌های جایگزین و به‌کارگیری انرژی‌های نو و تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی می‌شود. نرخ انرژی دریافتی کره زمین از خورشید حدود $10^{11} \times 1/8$ MW است. در حقیقت تابش یک ساعته خورشید می‌تواند انرژی مورد نیاز یک سال کره زمین را تأمین نماید [۱].

تولید الکتریسیته توسط انرژی خورشیدی از دو طریق صورت می‌گیرد: حرارتی و فتوولتائیک. در سیستم حرارتی از انرژی گرمایی خورشید برای کمک به راندن یک توربین گاز و ژنراتور متصل به آن برای تولید الکتریسیته استفاده می‌شود و در سیستم فتوولتائیک فوتون‌های تابش خورشیدی مستقیماً به جریان الکتریسیته تبدیل می‌شود. سیستم حرارتی معمولاً به شکل سیستم خورشیدی متمرکز به کار می‌رود که انعکاس اشعه‌های خورشید از یک سطح وسیع به سطحی کوچکتر، دمای بالایی ایجاد می‌نماید [۲]. سیستم‌های حرارتی در مقایسه با فتوولتائیک از بازده بالاتری برخوردار بوده و هزینه ساخت کمتری دارند. در پژوهش حاضر سیستمی متشکل از نیروگاه حرارتی خورشیدی-توربین گاز در نظر گرفته شده است. در این سیستم از انرژی حاصل از خورشید به منظور پیش‌گرم کردن هوای خروجی از کمپرسور قبل از ورود به محفظه احتراق در توربین گاز استفاده می‌شود و طراحی مزرعه خورشیدی به همین منظور انجام می‌گردد. شماتیکی از سیکل مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که هوای فشرده خروجی از کمپرسور در یک مبدل حرارتی از طریق سیال داغ خروجی از دریافت‌کننده خورشیدی پیش‌گرم شده و سپس در محفظه احتراق به دمای مطلوب ورودی توربین می‌رسد. در این‌جا طراحی میدان هلیوستات برای یک توربین گاز با توان مشخص ۳ MW، شامل چیدمان آینه‌ها و زوایای قرارگیری آن‌ها با در نظرگیری شیب زمین و طول و عرض جغرافیایی شهر محل نصب نیروگاه خورشیدی مورد مطالعه قرار می‌گیرد و میزان دمای سیال خروجی از دریافت‌کننده خورشیدی و میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت به ازای تولید توان حرارتی ثابت، محاسبه می‌شود.

مزرعه خورشیدی مورد بررسی از نوع دریافت‌کننده مرکزی و شامل صدها آینه است که در اطراف یک برج قرار گرفته‌اند و تابش خورشید را به سمت برج منعکس می‌کنند. عملکرد مزرعه خورشیدی وابسته به موقعیت قرارگیری هر یک آینه‌ها است. نحوه قرار گرفتن هر یک از آینه‌ها نسبت به یکدیگر و نیز موقعیت آن‌ها نسبت به برج مرکزی در عملکرد مزرعه خورشیدی تأثیرگذار می‌باشد. تابش منعکس شده از آینه‌هایی که در فاصله دور از برج مرکزی قرار می‌گیرند، به علت اثرات اتمسفر تضعیف می‌شود. در مورد آینه‌های مجاور برج نیز ممکن است به علت قرار گرفتن در سایه برج یا سایه دیگر آینه‌ها، بخشی از تابش از دست برود [۳] و [۴].

کُدی در نرم‌افزار متلب توسعه داده شده است که چیدمان هلیوستات را در یک نیروگاه دریافت‌کننده مرکزی تعیین می‌کند و سپس زوایای هر هلیوستات با توجه به موقعیت آن در ساعات مختلف روز برای هر یک از روزهای مورد نظر در سال محاسبه می‌شود. با محاسبه تابش دریافتی از خورشید در برج مرکزی نیز میزان افزایش دمای هوای خروجی از کمپرسور توسط انرژی خورشیدی محاسبه شده است. در ادامه مدل ریاضی محاسبات چیدمان هلیوستات و توان حاصل از آن ارائه می‌گردد.

۲- مروری بر کارهای گذشته

آغاز طرح استفاده از دریافت‌کننده مرکزی خورشیدی مربوط به لابراتوار سندیا در نیومکزیکو است [۵]. اولین مزرعه خورشیدی به نام سولار ۱ در شهر بارستو^۲ کالیفرنیا با ۱۸۱۸ هلیوستات ساخته شد که بخاری با درجه حرارت 516°C و توانی برابر ۱۰ MW را تولید می‌نمود [۶].

² Barstow¹ Solar one

در سال ۲۰۲۳ سامرتی و همکارانش نیروگاهی متشکل از یک توربین گاز ۳۰ کیلوواتی و یک مزرعه خورشیدی را در نظر گرفتند. این سیستم با سوخت هیدروژن تغذیه شده و به تزریق بخار آب مجهز بود تا آلاینده‌گی ناشی از اکسیدهای نیتروژن را کاهش دهد. آن‌ها فرآیند احتراق سوخت هیدروژن را با استفاده از محاسبات دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) سه‌بعدی مورد مطالعه قرار دادند و تأثیر تزریق بخار در کاهش تولید ناکس را (Nox) بررسی و تایید نمودند. این نیروگاه، بهبودهای قابل توجهی در توان خروجی و بازده داشته است [۱۳].

در سال ۲۰۲۵ بدری و سعیدی برای تولید توان ثابت در شبانه روز، سیستمی را شامل یک میکروتوربین گاز، برج خورشیدی مرکزی و پیل سوختی^۲ در نظر گرفتند. PEM انرژی خورشیدی مازاد را به سوخت هیدروژنی تبدیل و ذخیره می‌نماید. میکرو توربین گاز، در زمان‌هایی که نور خورشید کم است یا وجود ندارد، هیدروژن تولید و ذخیره شده را می‌سوزاند تا توان مورد نیاز را تأمین کند. آن‌ها نشان دادند که بازدهی تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریکی در ساعات ابتدایی روز حدود ۴۸٪ بوده و بیشترین بازدهی را دارد و این بازدهی در ساعات پایانی روز تا ۰/۳٪ کاهش می‌یابد [۱۴].

علی‌رغم کارهایی که تاکنون انجام شده است کارهای کمی در زمینه تغییرات گذرای سیستم‌های خورشیدی انجام شده است. در این مقاله تغییرات زاویه قرارگیری هلیوستات‌ها در مزرعه خورشیدی، در ساعات مختلف روز بررسی می‌شود. در کارهای گذشته اغلب زوایای هلیوستات‌ها به صورت میانگین ماهانه یا میانگین فصلی تعیین شده‌اند. در این‌جا زوایای هلیوستات‌ها در هر ساعت از روز تعیین می‌شوند. تغییر زاویه قرارگیری هلیوستات‌ها در طول روز تایید می‌کند که آن‌ها همواره به سمت خورشید می‌چرخند و بدین ترتیب بازدهی میدان هلیوستات بهبود می‌یابد. از دست‌آوردهای این پژوهش محاسبه زوایای قرارگیری هلیوستات‌ها در ساعات مختلف روز است. همچنین در این پژوهش، با ترکیب یک مزرعه خورشیدی و یک توربین گاز، سعی شده است که اثرات استفاده از انرژی خورشیدی در کاهش سوخت مصرفی در توربین گاز بررسی گردد.

۳- اصول چیدمان هلیوستات

آینه‌ها (هلیوستات‌ها) در مزرعه خورشیدی روی کمان‌های دایروی در اطراف برج مرکزی قرار می‌گیرند. برای تعیین چیدمان

در سال ۲۰۱۲ هلیما و همکارانش نیروگاه سیکل ترکیبی خورشیدی در الجزیره را مطالعه کردند. آن‌ها در مدل‌سازی خود از اثرات دمای محیط بر عملکرد سیکل ترکیبی و تلفات حرارتی صرف‌نظر کردند و تنها اثر تغییرات انرژی خورشیدی در طول شبانه‌روز را لحاظ نمودند. همچنین به منظور شبیه‌سازی دینامیکی این سیستم از نرم‌افزار TRANSYS استفاده نمودند [۷].

در سال ۲۰۱۳ آبرگر و همکارش مدل‌سازی دریافت‌کننده خورشیدی را با در نظر گرفتن توزیع گذرای شار خورشیدی انجام دادند. آن‌ها در بررسی‌های خود اثر عبور ابرها در تغییرات حرارت دریافتی از خورشید را بررسی نمودند. تغییرات شدت تابش باعث ایجاد تنش‌های حرارتی در ساختار دریافت‌کننده شده و روی طول عمر و هزینه‌های مربوط به دریافت‌کننده اثر داشته است. بر اساس مطالعه آبرگر ماکزیمم گرادیان شدت تابش و ماکزیمم توان گذرای سیستم روی عملکرد دریافت‌کننده و موقعیت قرارگیری هلیوست‌ها مؤثر است [۸].

لی روکس و همکارانش در سال ۲۰۱۴ عملکرد یک دریافت‌کننده خورشیدی را برای یک میکروتوربین گاز ۱۰۰ - ۱ kW شبیه‌سازی نمودند. بر اساس یافته‌های آنان، برای سیستم‌هایی با ظرفیت مشخص شده، قطر لوله‌های دریافت‌کننده خورشیدی نقش مهمی را در بازده کلکتور ایفا می‌کند [۹].

در سال ۲۰۲۰ بلقسیم و همکارانش، طراحی و عملکرد یک توربین گاز خورشیدی را انجام دادند. آن‌ها اثر پارامترهای هندسی و ابعاد هلیوستات‌ها و برج مرکزی را برای ارزیابی عملکرد میدان هلیوستات مورد بررسی قرار دادند. سیکل ترکیبی را برای یک توربین گاز ۱۶۰ مگاواتی با نرم‌افزار TRANSYS شبیه‌سازی نموده و دریافتند سهم توان تولیدی از انرژی خورشیدی حدوداً ۳۰٪ و بازده نوری سالانه میدان هلیوستات ۶۵٪ است [۱۰].

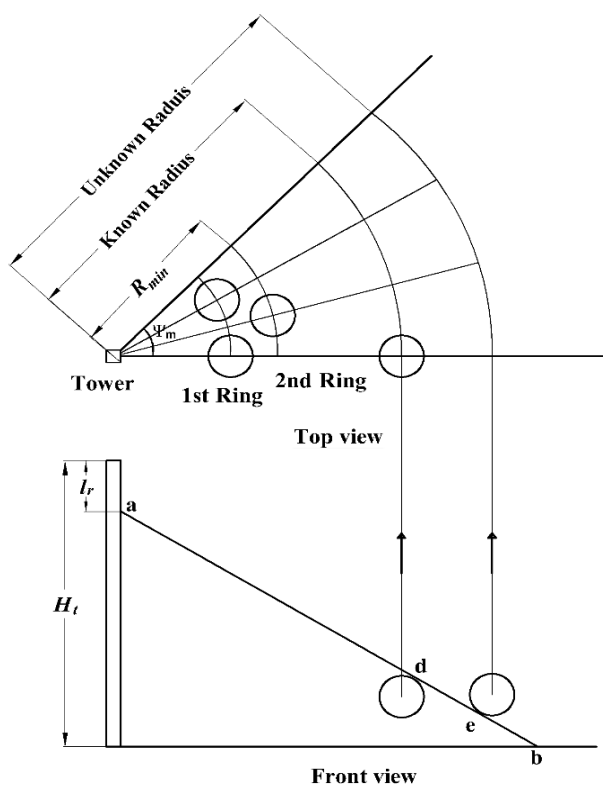
در سال ۲۰۲۱ علوی و همکارانش نیروگاهی شامل کلکتورهای خورشیدی تخت را در نظر گرفتند. آن‌ها از نانو سیالات به‌عنوان سیال انتقال حرارت^۱ استفاده کردند و نشان دادند که این روش باعث افزایش بازده کلکتورها می‌شود. همچنین نشان دادند نوع، اندازه و غلظت نانو سیالات در بازده کلکتورها مؤثر است [۱۱].

در سال ۲۰۲۳ آلومی آنی سیکل ترکیبی یک توربین گاز و نیروگاه خورشیدی شامل دریافت‌کننده مرکزی را در شرایط آب و هوایی استرالیا بررسی نمود. بر اساس شبیه‌سازی او سیکل ترکیبی، بازدهی بیشتری نسبت به توربین گاز معمولی دارد و آلاینده کمتری تولید می‌کند [۱۲].

² Proton Exchange Membrane (PEM)

¹ Heat Transfer Fluid (HTF)

است. در صورتی که تراکم آینه‌ها در ردیف‌های بعدی کم شود تعدادی آینه با توجه به رعایت فاصله شعاعی به چیدمان اضافه می‌شود به طوری که این آینه‌ها نیز در سایه یکدیگر قرار نگیرند.



شکل ۳ چیدمان بدون انسداد آینه‌ها

۴- محاسبات چیدمان هلیوستات

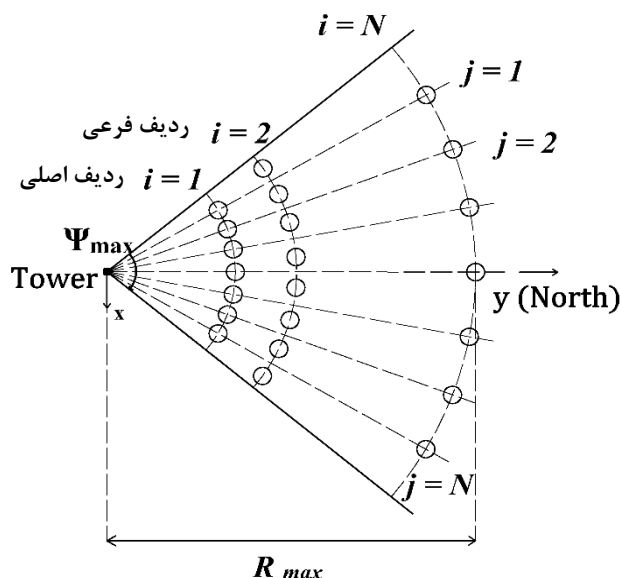
به منظور محاسبه محل قرارگیری آینه‌ها، ابتدا تعاریفی ارائه می‌شود [۱۵]:

- ردیف اصلی: ردیفی که در آن آینه‌ای روی خطی که راستای شمال را نشان می‌دهد (محور y در شکل (۲))، قرار دارد.
- ردیف فرعی: ردیفی که روی خط راستای شمال، آینه‌ای ندارد. ردیف‌های اصلی و فرعی در شکل (۲) نشان داده شده است.
- قطر مشخصه (DM): این مقدار بر اساس مجموع قطر آینه و مقداری که به عنوان فاصله بین آینه و دایره محیطی فرضی (dS) در نظر گرفته شده است (شکل (۴))، محاسبه می‌شود.

$$DM = l_m(\sqrt{1 + f^2} + dS) \quad (1)$$

مقادیر l_m و f به ترتیب طول و نسبت طول به عرض آینه‌ها هستند. مینیمم مقدار dS که توسط کولادو و تارگانو [۱۶] ارائه شده است و از رابطه (۲) به دست می‌آید و بر اساس آن مقدار قطر مشخصه مینیمم نیز محاسبه می‌شود. در روابط زیر w_m عرض آینه‌ها است.

آینه‌ها مطابق شکل (۲) ماکزیمم فاصله از برج (R_{max}) و ماکزیمم زاویه قرارگیری آینه‌ها نسبت به برج (Ψ_{max}) مشخص می‌شود.



شکل ۲ تصویر دو بعدی مزرعه خورشیدی در صفحه X-Y

در چیدمان آینه‌ها در مزرعه خورشیدی موارد زیر در نظر گرفته می‌شود [۱۵]:

- به منظور دریافت تابش بیشتر همواره سعی می‌شود تا برج مرکزی در راستای شمال-جنوب قرار گیرد.
- در چیدمان آینه‌ها، کمترین شعاع قرارگیری ردیف آینه‌ها برابر ارتفاع برج است.
- آینه‌ها به صورت مستطیل هستند ولی برای محاسبات هندسی چیدمان به صورت شماتیک به شکل دایره‌ای محیطی که قطری برابر قطر آینه دارد، نشان داده می‌شوند. این فرض برای سهولت در محاسبه فواصل بین آینه‌ها در نظر گرفته می‌شود ولی در محاسبات مربوط به سطح تابش ابعاد واقعی آینه استفاده می‌شود.

- در ردیف اول آینه‌ها، فاصله آینه‌ها به اندازه دو برابر عرض آینه در نظر گرفته می‌شود و فاصله دو ردیف متوالی نیز طوری تعیین می‌شود که آینه‌ها با هم برخورد نکنند.
- در ردیف‌های بعدی فاصله بین آینه‌ها و فاصله بین ردیف آینه‌ها مطابق شکل (۳) تعیین می‌شود. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، از ضلع پایینی دریافت کننده (نقطه a) خطی مماس بر آینه ردیف قبلی (نقطه d) رسم می‌شود که امتداد این خط، محل قرارگیری آینه برای ردیف‌های بعدی را مشخص می‌کند (نقطه e) و بدین ترتیب آینه‌ها بدون انسداد چیده شده و در سایه یکدیگر قرار نخواهند گرفت. آینه ردیف بعدی نیز بر خط رسم شده از برج مماس خواهد بود. در این شکل H_t ارتفاع برج مرکزی، l_r طول دریافت کننده، زاویه قرارگیری هر ستون از آینه‌ها و R_{min} مینیم شعاع ردیف آینه‌ها

فاصله جانبی اولین ردیف از هر ستون آینه‌ها برابر کمترین مقدار مجاز یعنی DM_{min} است. این فاصله در ردیف‌های بعدی با توجه به واگرایی ستون‌های قرارگیری آینه‌ها محاسبه می‌شود. شکل (۵) تعیین فواصل بین آینه‌ها را نشان می‌دهد.

۴-۲- فاصله شعاعی آینه‌ها

شعاع اولین ردیف آینه‌ها تقریباً برابر ارتفاع برج (H_t) در نظر گرفته می‌شود. این مقدار در شکل (۵) نشان داده شده است.

$$R_{0,j} = R_{min} = H_t \quad (۶)$$

شعاع قرارگیری ردیف دوم آینه‌ها با توجه به شکل (۶) بر اساس شیب زمین β_L ، مطابق رابطه (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند.

$$R'_{1,j} = R'_{0,j} \cos \gamma_j + \sqrt{DM^2 - (R'_{0,j} \sin \gamma_j)^2} \quad (۷)$$

$$\begin{aligned} R_{1,j} &= R'_{1,j} \cos \beta_L \\ &= R'_{0,j} \cos \gamma_j \\ &+ \sqrt{(DM \cos \beta_L)^2 - (R_{0,j} \sin \gamma_j)^2} \end{aligned} \quad (۸)$$

شعاع قرارگیری آینه‌های ردیف‌های بعدی مطابق آنچه در شکل (۳) توضیح داده شد و بر اساس خطوط مماس بر آینه‌های ردیف جلویی به دست می‌آیند. شکل (۷) خطوط مماس رسم شده برای تعیین شعاع قرارگیری آینه‌ها را در این ردیف‌ها نشان می‌دهد. شعاع قرارگیری آینه‌های ردیف سوم به بعد مطابق روابط (۹) تا (۱۶) محاسبه می‌شوند [۱۷]. متغیرهای به کار رفته در این روابط در شکل (۷) نشان داده شده است.

$$R_{1,j} = y_{m2} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (۹)$$

$$A = -[(2z_1 y_r + \tan \beta_L) \tan \beta_L + (z_1 y_r)^2] \quad (۱۰)$$

$$B = [2(z_1 - z_0)(z_1 y_r + \tan \beta_L)] \quad (۱۱)$$

$$C = (r_{m2})^2 (1 + (z_1 y_r)^2) - (z_1 - z_0)^2 \quad (۱۲)$$

که متغیرهای روابط (۱۰) تا (۱۲) به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$y_r = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (۱۳)$$

$$dS_{min} = 2f - (\sqrt{1 + f^2}) \quad (۲)$$

$$DM_{min} = 2w_m \quad (۳)$$

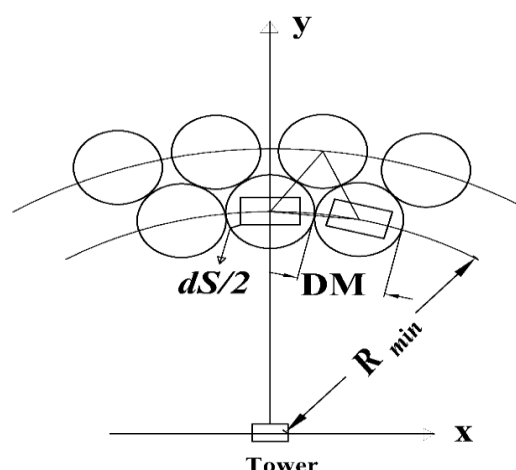
• زاویه واحد: فاصله زاویه‌ای بین محورهای (ستون‌های) قرارگیری آینه‌ها که عبات است از:

$$\gamma_j = \frac{DM/2}{R_{0,j}} \quad (۴)$$

• موقعیت زاویه‌ای: زاویه مابین محور شمالی و محور قرارگیری هر آینه، موقعیت زاویه‌ای آن آینه را بیان می‌کند که مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

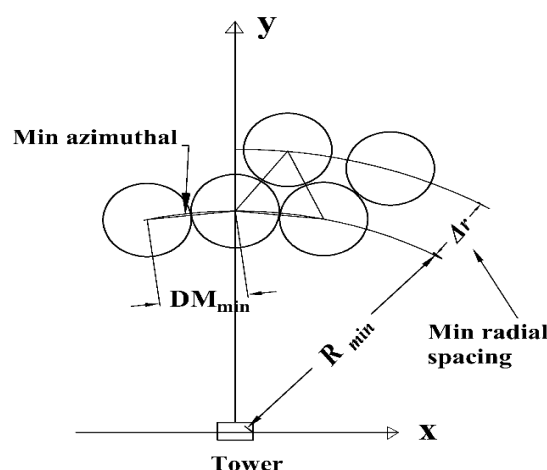
$$\Psi_m = \pm n\gamma_j \quad (۵)$$

مقادیر زوج n ردیف‌های اصلی و مقادیر فرد n ردیف‌های فرعی را نشان می‌دهد و همچنین مقادیر مثبت مربوط به نیمه شرقی و منفی مربوط به نیمه غربی میدان هلیوستات است.



شکل ۴ نمایش دواير محیطی آینه‌ها

۴-۱- فاصله جانبی آینه‌ها



شکل ۵ فاصله جانبی و شعاعی آینه‌ها

۴-۴- تراکم چیدمان آینه‌ها

در مزرعه خورشیدی آینه‌هایی را که دارای موقعیت زاویه‌ای یکسانی هستند، گروه می‌نامند. با ایجاد ردیف جدید در هر گروه به دلیل واگرایی ستون‌های قرارگیری آینه‌ها، فاصله جانبی بین آن‌ها افزایش می‌یابد؛ بنابراین در ردیف‌های جدید می‌توان علاوه بر گروه قبلی، آینه‌هایی را در فواصل مابین آینه‌های قبلی قرار داد و گروه‌های جدید ایجاد نمود. بدین ترتیب مساحت تحت پوشش آینه‌ها افزایش یافته و میزان تابش خورشیدی بیشتری دریافت می‌شود. τ کمیت تراکم آینه‌ها است و مطابق رابطه (۲۰) تعریف می‌شود.

$$\tau = \frac{\text{net reflecting surface area}}{\text{land covered area}} = \frac{N_m A_m}{A_f} \quad (20)$$

در رابطه (۲۰) مقدار کمیت N_m برای ردیف اصلی و فرعی به ترتیب از روابط (۲۱) و (۲۲) به دست می‌آید. A_m مساحت خالص بازتاب تابش از آینه‌ها و A_f مساحت کل زمین موردنظر است که مطابق روابط (۲۳) و (۲۴) به دست می‌آیند [۱۷].

$$N_m = 2 \times \text{integer} \left(\frac{\Psi_{\max}}{2\gamma} \right) + 1 \quad (21)$$

$$N_m = 2 \times \text{integer} \left(\frac{\Psi_{\max} - \gamma}{2\gamma} \right) + 2 \quad (22)$$

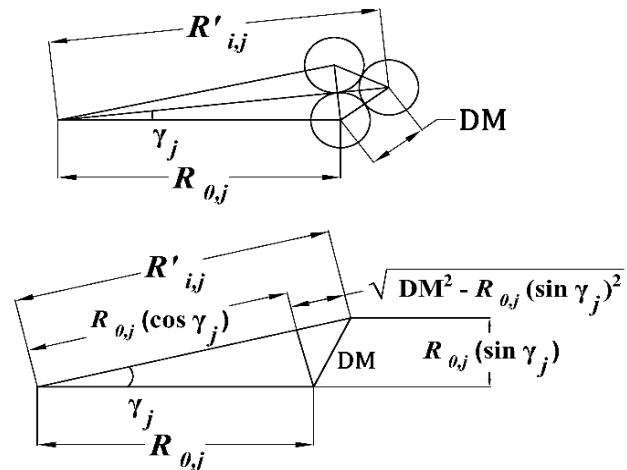
$$A_m = f l_m^2 f_a \quad (23)$$

$$A_f = \Psi_{\max} \left[(R + 0.5 \text{ DM})^2 - (R_{i,j} + 0.5 \text{ DM})^2 \right] \quad (24)$$

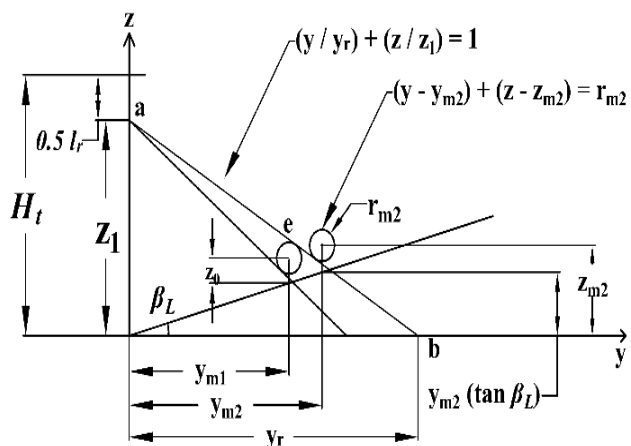
$$a = z_1^2 (r_{m1}^2 - y_{m1}^2) \quad (14)$$

$$b = 2 z_1 y_{m1} (z_1 - z_{m1}) \quad (15)$$

$$c = (r_{m1})^2 - (z_{m1} - z_1)^2 \quad (16)$$



شکل ۶ محاسبه شعاع ردیف دوم آینه‌ها



شکل ۷ محاسبه شعاع ردیف آینه‌ها بر اساس خطوط مماس بر ردیف قبلی

۴-۳- محل قرارگیری آینه‌ها

مختصات قرارگیری آینه‌ها در هر ردیف با توجه به موقعیت زاویه-ای (Ψ_m) و شعاع قرارگیری آن‌ها مطابق روابط (۱۷) تا (۱۹) به دست می‌آید. این مختصات، محل قرارگیری مرکز آینه است.

$$x_m = R_{i,j} \sin \Psi_m \quad (17)$$

$$y_m = R_{i,j} \cos \Psi_m \quad (18)$$

$$z_m = z_0 + R_{i,j} \tan \beta_L \quad (19)$$

۵- هندسه خورشیدی^۱

مطابق شکل (۸)، جهت و موقعیت هر آینه خورشیدی توسط زوایای هلیوستات که شامل زاویه شیب β و سمت الرأس γ_H می‌باشد، به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۸].

• زاویه شیب β : عبارت است از زاویه بین صفحه موردنظر و سطح افق که تغییرات آن $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ است.

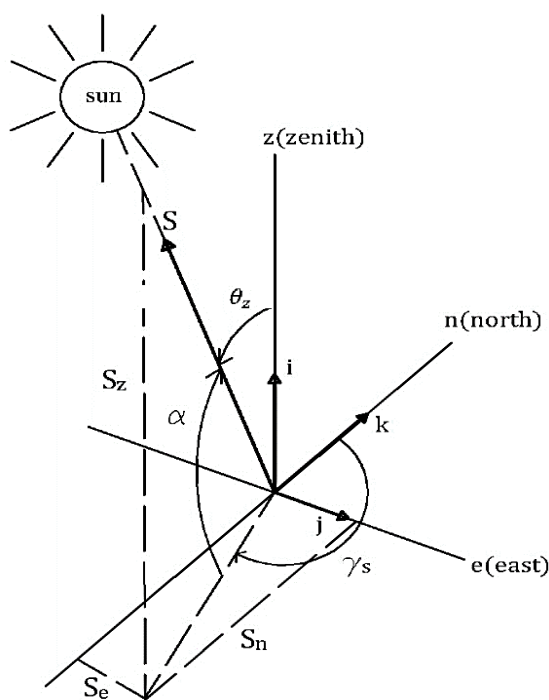
• زاویه سمت الرأس صفحه γ_H : اگر راستای عمود بر صفحه مورد نظر را بر صفحه افق تصویر نصف النهار کنیم، راستای این تصویر با راستای نصف النهار محلی زاویه‌ای می‌سازد که همان

³ Surface azimuth angle

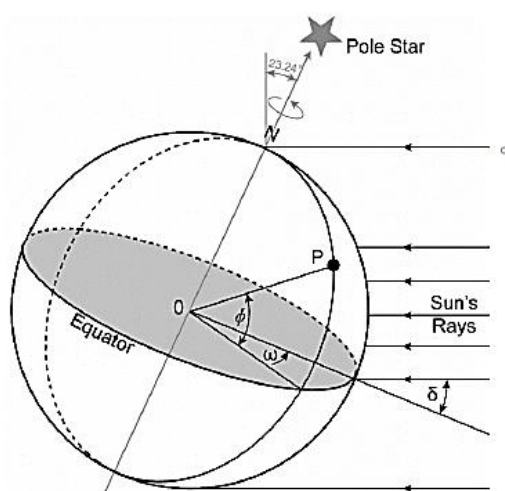
¹ Solar geometry

² Slop angle

- زاویه ساعت ω ^۵: خط واصل مرکز زمین و مرکز خورشید و نیز خط متصل کننده مرکز زمین به مکان موردنظر روی سطح زمین را در نظر بگیرید، زاویه ساعت عبارت است از زاویه بین تصویر این دو خط در صفحه استوا. زاویه ساعت در صبح منفی و بعدازظهر مثبت در نظر گرفته می‌شود. زاویه ساعت به دلیل چرخش زمین حول محور خود در هر ساعت ۱۵ درجه تغییر می‌کند.
- زاویه میل δ ^۶: خطی که مرکز زمین و مرکز خورشید را به هم متصل می‌کند با تصویرش در صفحه استوا زاویه‌ای می‌سازد که همان زاویه میل می‌باشد [۲۰].

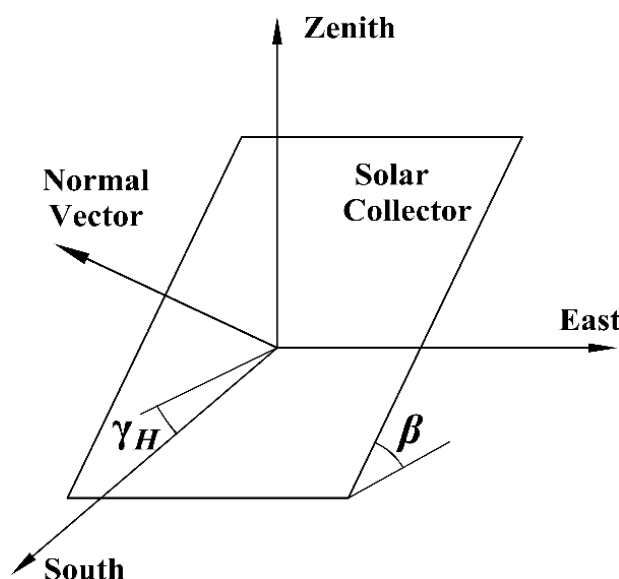


شکل ۹ زوایای تعیین کننده موقعیت خورشید



شکل ۱۰ زوایای اصلی عرض جغرافیایی [۲۰]

زاویه سمت الرأس صفحه می‌باشد. اگر راستای تصویر در امتداد شمال به جنوب باشد، γ_H صفر خواهد بود. تغییرات آن به صورت $-180^\circ \leq \gamma_H \leq 180^\circ$ است.



شکل ۸ زوایای آینه خورشیدی

زوایای مشخص کننده موقعیت خورشید نسبت به محل موردنظر γ_s ، α_s ، θ_z می‌باشند که به ترتیب عبارتند از [۱۹]:

- زاویه سمت الرأس خورشید θ_z : راستایی که مکان موردنظر را به خورشید متصل می‌کند با راستای قائم زاویه‌ای می‌سازد که همان زاویه سمت الرأس خورشید است.
- زاویه ارتفاع خورشید α_s : زاویه‌ای است که خط واصل خورشید و مکان موردنظر با افق می‌سازد. در واقع زاویه ارتفاع خورشید متمم زاویه سمت الرأس است ($\alpha_s + \theta_z = 90^\circ$).
- زاویه سمت خورشید γ_s : زاویه‌ای است که تصویر راستای تابش خورشید بر سطح افق با راستای شمال به جنوب می‌سازد ($-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$).

شکل (۹) زوایای معرفی شده را نشان می‌دهد. در این شکل، i و k به ترتیب معرف جهت آسمان، شرق و شمال هستند. شکل (۱۰) زوایای اصلی ω ، ϕ و δ را نشان می‌دهد که با استفاده از آن‌ها می‌توان جهت تابش خورشید را محاسبه کرد. این زوایا به ترتیب عبارتند از:

- زاویه عرض جغرافیایی ϕ ^۴: اگر مرکز زمین را به مکان موردنظر روی سطح زمین متصل کنیم، خط واصل با صفحه استوا زاویه‌ای می‌سازد که همان عرض جغرافیایی می‌باشد که در نیم‌کره شمالی مثبت و در نیم‌کره جنوبی منفی در نظر گرفته می‌شود.

^۴ Latitude angle^۵ Hour angle^۶ Declination angle^۱ Zenith angle^۲ Solar altitude angle^۳ Solar azimuth angle

۶- محاسبه زوایای هلیوستات

$$LST_{corr} = LST + \text{Offset}. \quad (30)$$

در ادامه محاسبه زوایای موقعیت خورشید (شکل ۹) ارائه می-شود که به کمک آن‌ها زوایای شیب و سمت‌الرأس هلیوستات به‌دست می‌آیند. زاویه سمت‌الرأس خورشید از رابطه (۳۱) محاسبه می‌شود.

$$\cos(\theta_z) = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta). \quad (31)$$

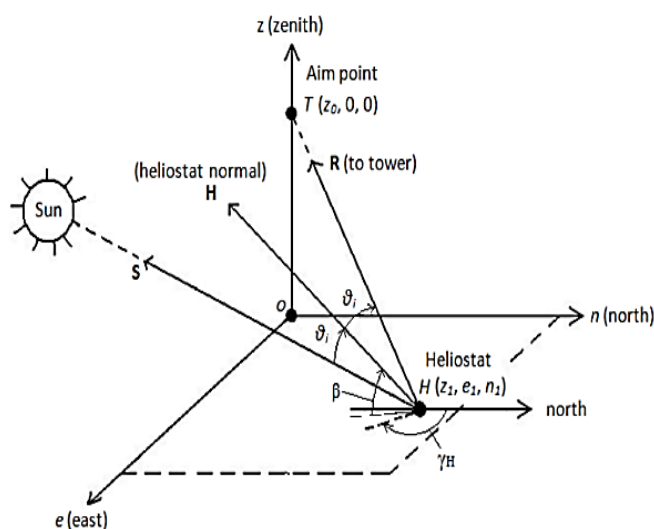
محاسبه زاویه سمت خورشید نیز مطابق رابطه (۳۲) انجام می-شود:

$$\gamma_s = \begin{cases} 180 - \arccos\left(\frac{\sin\alpha_s \sin\varphi - \sin\delta}{\cos\alpha_s \cos\varphi}\right) & \text{for } TLT \leq 12 \\ 180 + \arccos\left(\frac{\sin\alpha_s \sin\varphi - \sin\delta}{\cos\alpha_s \cos\varphi}\right) & \text{for } TLT > 12 \end{cases} \quad (32)$$

که در آن

$$TLT = \frac{\omega}{15} + 12 \quad (33)$$

بعد از انجام محاسبات زوایای اصلی و زوایای موقعیت خورشید مطابق با آن‌چه گفته شد، حال می‌توان زوایای هلیوستات را محاسبه نمود. به منظور محاسبه زاویه برخورد پرتو نور با یک هلیوستات (آینه مورد نظر) و یافتن جهت مناسب برای هر یک از آینه‌ها بردارهای یک‌ه S، H و R مطابق شکل (۱۱) تعیین می‌شوند. S بردار یک‌ه‌ای است که از هلیوستات به سمت خورشید اشاره دارد. H بردار یک‌ه نرمال بر سطح هلیوستات است و R بردار یک‌ه از هلیوستات به سمت دریافت‌کننده بالای برج است.



شکل ۱۱ موقعیت برج و هلیوستات‌ها [۲]

ابتدا زوایای اصلی معرفی‌شده در شکل (۱۰) محاسبه می‌شود. مقدار زاویه عرض جغرافیایی با توجه به موقعیت هر شهر به‌دست می‌آید. زاویه میل که انحراف از محور استوا را بیان می‌کند، مطابق رابطه (۲۵) حاصل می‌شود [۲۱].

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (25)$$

در رابطه فوق، n شماره روز سال میلادی است که از ۱ تا ۳۶۵ تغییر می‌کند. در ادامه نیز محاسبه زاویه ساعت ارائه شده است. اگر LST^۱ ساعت محلی به فرمت ۲۴ ساعت باشد. زاویه ساعت از رابطه (۲۶) به‌دست می‌آید.

$$\omega = 15^\circ (LST - 12) \quad (26)$$

برای رابطه فوق می‌توان تصحیحی در نظر گرفت که شیب محور زمین و مدار گردش آن را دربر گیرد. این امر با اصلاح مقدار LST صورت می‌گیرد. ابتدا مقدار تصحیح زمان (EoT) از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} EoT = 229.18 [& 0.000075 \\ & + 0.001868 \cos(\gamma) \\ & - 0.32077 \sin(\gamma) \\ & - 0.014615 \cos(2\gamma)] \end{aligned} \quad (27)$$

که در آن

$$\gamma = \frac{2\pi}{365} \left(\text{days} - 1 + \frac{\text{hours} - 12}{24} \right) \quad (28)$$

در رابطه (۲۸)، days روز مورد نظر محاسبات نسبت به روز اول سال میلادی و hours، ساعت مورد مطالعه است. تصحیح دیگری نیز تغییرات طول جغرافیایی را در برمی‌گیرد و با توجه به اختلاف ساعت منطقه مورد نظر از ساعت گرینویچ مطابق رابطه (۲۹) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Offset} &= EoT + \text{LongV} \\ &= EoT \\ &+ 4(\text{Longitude} \\ &- 15 \Delta TZ) \end{aligned} \quad (29)$$

که در این رابطه، LongV میزان اصلاح خطای محاسبه زمان است. مقدار این کمیت طبق رابطه (۲۹) معادل ۴ برابر تفاضل طول جغرافیایی و ۱۵ برابر مقدار میزان انحراف ساعت از گرینویچ (ΔTZ) می‌باشد. در نهایت مقدار LST که در رابطه (۲۶) آمده است به صورت رابطه (۳۰) تصحیح شده و سپس برای محاسبه زاویه ساعت در رابطه (۲۶) قرار داده می‌شود [۲۱].

^۱ Local Standard Time

اربز^۲ و همکارانش مدلی را برای محاسبه نسبت تابش کل دریافتی به تابش دیفیوز هلیوستات به صورت زیر ارائه داده‌اند [۲۲]. در این مدل ابتدا تابش دیفیوز هلیوستات از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$I_d = (1 - 0.09 M_t) I_{total} \quad \text{for } 0 < M_t \leq 0.22 \quad (42)$$

$$I_d = (0.9511 - 0.1604 M_t + 4.388 M_t^2 - 16.638 M_t^3 + 12.336 M_t^4) I_{total} \quad \text{for } 0.22 < M_t \leq 0.8 \quad (43)$$

$$I_d = 0.165 I_{total} \quad \text{for } 0.8 < M_t \leq 0.1 \quad (44)$$

در این روابط M_t شاخص شفافیت^۳ است که کمیتی تصادفی بوده و مقدار آن با توجه به زمان مورد نظر سال، فصل، شرایط آب و هوا و موقعیت جغرافیایی به صورت زیر تعیین می‌شود [۲۳].

$$M_t = \frac{I_{total}}{I_o} \quad (45)$$

در رابطه (۴۵)، I_o تابش ساعتی فرازمینی^۴ است که به صورت تابش خورشید در خارج از جو زمین تعریف شده و از رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۱].

$$I_o = \frac{12 * 3.6}{\pi} I_{sc} E_0 \left((\sin \varphi \sin \delta)(\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} (\sin \varphi \sin \delta) \right) \quad (46)$$

و در آن

$$E_0 = 1 + 0.0033 \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \quad (47)$$

در روابط (۴۶)، I_{sc} ثابت خورشیدی و برابر 1367 W/m^2 ، E_0 ضریب تصحیح انحراف^۵ [۲۴]، δ زاویه میل، φ عرض جغرافیایی، ω_1 و ω_2 زاویه ساعت در ابتدا و انتهای بازه زمانی مورد نظر و n شماره روز سال است که از ۱ تا ۳۶۵ تغییر می‌کند. در نهایت تابش مستقیم خورشیدی به هلیوستات مطابق رابطه (۴۸) از تفاضل تابش کلی دریافتی و تابش انعکاسی دیفیوز آن حاصل می‌شود. توان تابشی مزرعه خورشیدی نیز از رابطه (۴۹) حاصل می‌شود که در این رابطه A_m مساحت خالص بازتاب تابش از آینه‌ها است و از رابطه (۲۳) به دست می‌آید.

بر اساس قانون بازتاب آینه‌ای، زاویه تابش و بازتاب با هم برابر است بنابراین بردار H باید نیمساز بردارهای S و R باشد. این بردارها به صورت روابط (۳۴) تا (۳۶) نشان داده می‌شوند.

$$S = S_z i + S_e j + S_n k \quad (34)$$

$$R = R_z i + R_e j + R_n k \quad (35)$$

$$H = H_z i + H_e j + H_n k \quad (36)$$

سپس با توجه به شکل (۱۱) و استفاده از زوایای موقعیت خورشیدی که محاسبات آن ارائه شد، بردارهای S ، R و H مطابق روابط (۳۷) تا (۳۹) محاسبه می‌شوند.

$$S = \sin(\alpha) i + \cos(\alpha) \sin(\gamma_s) j + \cos(\alpha) \sin(\gamma_s) k \quad (37)$$

$$R = \frac{(z_0 - z_1)i - e_1 j - n_1 k}{\sqrt{(z_0 - z_1)^2 + e_1^2 + n_1^2}} \quad (38)$$

$$H = \frac{(R_z + S_z)i + (R_e + S_e)j + (R_n + S_n)k}{2\cos(\theta_i)} \quad (39)$$

نهایتاً زوایای جهت هلیوستات با توجه به قانون بازتاب آینه‌ای مطابق روابط (۴۰) و (۴۱) به دست می‌آید [۲].

$$\sin(\beta) = \frac{R_z + \sin(\alpha)}{2 \cos(\theta_i)} = \frac{(z_0 - z_1) + \sin(\alpha)}{2 \cos(\theta_i)} \quad (40)$$

$$\sin(\gamma_H) = \frac{R_e + \cos(\alpha) \sin(\gamma_s)}{2 \cos(\theta_i)} = \frac{-e_1 + \cos(\alpha) \sin(\gamma_s)}{2 \cos(\theta_i) \cos(\beta)} \quad (41)$$

۷- تابش مستقیم روزانه

مدل‌های مختلفی برای محاسبه تابش مستقیم خورشیدی به هلیوستات (DNI) وجود دارد. این کمیت از تفاضل تابش کلی دریافتی (I_{total}) و تابش انعکاسی دیفیوز هلیوستات (I_b) حاصل می‌شود.

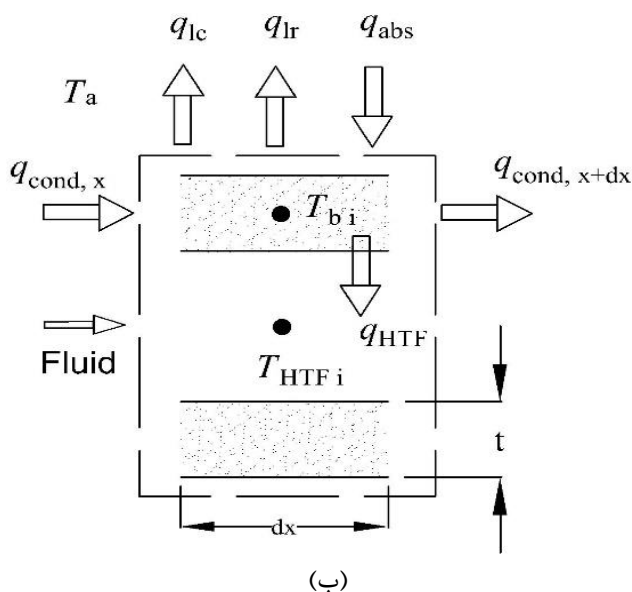
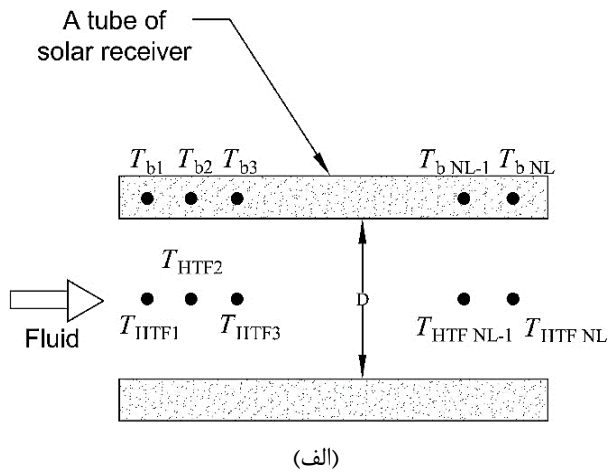
⁴ Hourly extraterrestrial radiation

⁵ Eccentricity correction factor

¹ Direct Normal Irradiant (DNI)

² Erbs

³ Clearness index



شکل ۱۳ الف- مدل سازی یکی از لوله های دریافت کننده خورشیدی،
ب- انتقال حرارت در یک حجم کنترل بدنه لوله

مطابق شکل (۱۳ب) برای هر یک از گره های درون ضخامت دیواره لوله از ۱ تا NL دمای محلی کلی T_b ^۳ در نظر گرفته شده است. این گره ها در راستای طول لوله هستند. T_{HTF} نیز دمای محلی کلی سیال انتقال حرارت در داخل لوله است که در ابتدای ورود به لوله مقدار آن مشخص بوده و برای نقاط ۲ تا NL نیاز به محاسبه دارد. انتقال حرارت در لوله ها به چهار شکل صورت می گیرد که در شکل (۱۳ب) در یک حجم کنترل نشان داده شده است. در این شکل q_{cond} رسانش حرارتی در جهت محوری لوله، q_{lc} اتلاف حرارت از طریق جابه جایی، q_{lr} اتلاف حرارت از طریق تشعشع و q_{HTF} انتقال حرارت از جداره لوله به سیال داخل آن است. برای هر یک از گره ها حجم کنترلی در نظر گرفته شده و رابطه (۴۹) برای همه گره ها از ۱ تا NL نوشته می شود.

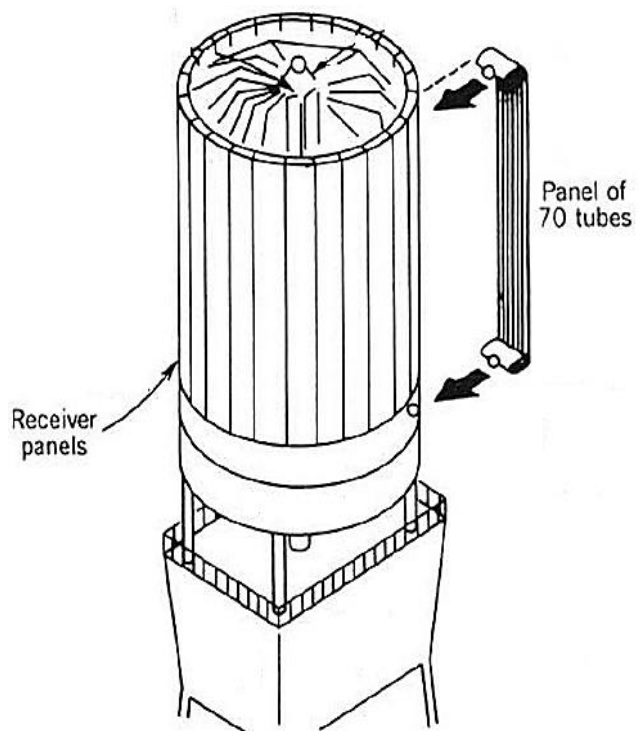
$$DNI = I_{total} - I_d \quad (48)$$

$$P = DNI \times A_m \quad (49)$$

۸- مدل سازی دریافت کننده خورشیدی

دریافت کننده، انرژی حاصل از تابش خورشیدی را به سیالی که سیال انتقال حرارت نام دارد، منتقل می کند. دریافت کننده خورشیدی لوله ای^۱ به صورت یک برج مرکزی در نظر گرفته شده که داخل آن شامل پنل هایی از مجموعه لوله ها می باشد که سیال انتقال حرارت از آن عبور می کند. شکل (۱۲) یک دریافت کننده خورشیدی لوله ای را نشان می دهد.

به منظور مدل سازی یک بعدی دریافت کننده، همانطور که شکل (۱۳الف) نشان می دهد، دو دسته از نقاطی که اصطلاحاً گره^۲ نامیده می شوند، در راستای محور جداره لوله ها و همچنین سیال انتقال حرارت درون آن در نظر گرفته می شوند و با توجه به میزان تشعشع خورشید و جابجایی حرارتی در سطح مجموعه لوله ها، معادله انتقال حرارت در این نقاط نوشته شده و دستگاهی از معادلات در راستای محور لوله حاصل می گردد. با حل این دستگاه معادلات دمای سیال انتقال حرارت خروجی از دریافت کننده و نیز دمای جداره لوله های دریافت کننده به دست می آید.



شکل ۱۲ نمونه ای از دریافت کننده خورشیدی لوله ای [۲]

³ Lumped local temperature

¹ Tubular solar receiver

² Node

$$q_{\text{cond}} = \frac{\lambda_{i-1} A_{an} (T_{b,i-1} - T_{b,i})}{\Delta L} + \frac{\lambda_i A_{an} (T_{b,i+1} - T_{b,i})}{\Delta L} \quad (55)$$

(ج) برای گره NL

$$q_{\text{cond}} = \frac{\lambda_{NL-1} A_{an} (T_{b,NL-1} - T_{b,NL})}{\Delta L} \quad (56)$$

از رابطه (۵۴) تا (۵۶) انتقال حرارت از طریق رسانش در امتداد لوله محاسبه می‌شود. در این روابط λ_i رسانش گرمایی بین گره i و $i+1$ است (i از ۱ تا NL تغییر می‌کند) که با توجه به میانگین دمایی دو گره به‌دست می‌آید. ΔL فاصله دو گره و A_{an} مساحت سطح مقطع لوله است. بین جداره لوله و سیال انتقال حرارت درون آن نیز انتقال حرارتی صورت می‌گیرد و حرارت منتقل شده از جداره لوله به سیال نیز مطابق رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$q_{\text{HTF}} = h_{\text{HTF}} A_{in} (T_b - T_{\text{HTF}}) \quad (57)$$

در رابطه (۵۷)، h_{HTF} ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین سیال انتقال حرارت و دیواره داخلی لوله، A_{in} مساحت داخلی لوله‌های عبور سیال و T_{HTF} دمای سیال انتقال حرارت است؛ دمای سیال انتقال حرارت در راستای محور لوله متغیر است؛ بنابراین لازم است با به کارگیری معادله انرژی رابطه دیگری بین دمای جداره لوله‌های دریافت‌کننده و سیال انتقال حرارت نوشته تا معادلات کامل گردد. دمای سیال در گره اول مشخص فرض می‌شود و برای گره‌های ۲ تا NL معادله انرژی مطابق رابطه (۵۸) است که بیان می‌دارد، گرمای انتقالی از هر گره به گره بعدی در سیال انتقال حرارت برابر گرمایی است که سیال از جداره لوله دریافت کرده است. با مرتب کردن این رابطه، معادله (۵۹) برای دمای سیال در گره $i+1$ به‌دست می‌آید [۲۵].

$$c_{\text{HTF},i} \dot{m} \frac{(T_{\text{HTF},i+1} - T_{\text{HTF},i})}{\Delta L} = \pi d h_{\text{HTF},i} (T_{b,i} - T_{\text{HTF},i}) \quad (58)$$

$$T_{\text{HTF},i+1} = T_{\text{HTF},i} + \frac{\pi d \Delta L h_{\text{HTF},i}}{c_{\text{HTF},i} \dot{m}} (T_{b,i} - T_{\text{HTF},i}) \quad (59)$$

معادلات (۵۰) و (۵۹) به صورت دو دستگاه معادلات یکی بر حسب دمای T_b و دیگری بر حسب T_{HTF} و به صورت کوپل با

$$q_{lc} + q_{lr} + \rho_b c_b V_b \frac{dT_b}{dt} + q_{\text{HTF}} = q_{\text{abs}} + q_{\text{cond}} \quad (50)$$

که در آن

$$q_{\text{abs}} = \alpha_b q_{\text{sol}} \quad (51)$$

در ادامه عبارات مختلف در رابطه (۵۰) بیان شده و نحوه محاسبه آن‌ها ارائه می‌شود. در رابطه (۵۰)، عبارت سوم $\rho_b c_b V_b \frac{dT_b}{dt}$ نرخ انرژی ذخیره شده در حجم V_b جدار لوله درون حجم کنترل است. q_{abs} مقدار گرمایی است که از تابش خورشیدی توسط دریافت‌کننده جذب شده است و از رابطه (۵۱) به‌دست می‌آید. در رابطه (۵۱)، q_{sol} گرمای تابیده شده از هلیوستات به روی سطح لوله (معادل کمیت DNI در بخش قبل) و α_b ضریب جذب لوله است. اتلاف حرارت به طریق جابه‌جایی و تشعشع از لوله نیز از روابط (۵۲) و (۵۳)، تعیین می‌شوند.

$$q_{lc} = h_{lc} A_{ou} (T_b - T_a) \quad (52)$$

$$q_{lr} = \varepsilon \sigma F_{b-a} A_{lr} (T_b^4 - T_a^4) \quad (53)$$

در رابطه (۵۲)، h_{lc} ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در اطراف لوله‌های عمودی دریافت‌کننده است، A_{ou} سطح خارجی حجم کنترل در نظر گرفته شده برای لوله و T_a دمای هوای محیط است. رابطه (۵۳)، بیانگر اتلاف حرارت تشعشعی است و F_{b-a} ضریب شکل از سطح خارجی دریافت‌کننده به محیط است. A_{lr} سطحی از دریافت‌کننده است که با محیط تماس دارد. σ ثابت بولتزمن^۱ و ε ضریب صدور^۲ می‌باشند.

برای محاسبه هدایت حرارتی در جداره لوله باید توجه داشت که کمیت q_{cond} در رابطه (۵۰)، مجموع هر دو عبارت هدایت حرارتی شکل (۱۳ب) است. همچنین بر حسب آن که گره محاسباتی در جداره لوله (حجم کنترل نشان داده شده در این شکل) در ابتدا، میانه یا انتها باشد، مقادیر کمیت q_{cond} متفاوت بوده و به شرح زیر است:

(الف) برای گره اول بدنه لوله

$$q_{\text{cond}} = \frac{\lambda_1 A_{an} (T_{b,2} - T_{b,1})}{\Delta L} \quad (54)$$

(ب) برای گره دوم تا گره $NL - 1$ ² Emissivity¹ Stefan- Boltzmann constant

جدول ۱ محاسبه عدد ناسلت

زبری سطح $\frac{D_t}{(2D_r)}$	$Nu_{Dr} = C Re_{Dr}^m$		Re_{low} ($Re_{low} < Re_{Dr}$ $< 4 \times 10^6$)
	C	m	
۰	9.02×10^{-4}	۱.۰۱	1.5×10^6
7.5×10^{-4}	2.57×10^{-3}	۰.۹۸	1×10^6
3×10^{-3}	1.35×10^{-4}	۰.۸۹	3×10^5
9×10^{-3}	4.55×10^{-2}	۰.۸۱	3×10^5

جابه‌جایی طبیعی:

به علت ابعاد بزرگ و دمای بسیار بالای دریافت‌کننده خورشیدی، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی معمولاً به صورت توربولانس خواهد بود. بنابراین عدد ناسلت در این حالت تابعی از عدد گراشف و دمای لوله‌های دریافت‌کننده می‌باشد و مطابق رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$Nu_{lr} = 0.049 \pi Gr_{lr}^{1/3} \left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{0.14} \quad (61)$$

که Gr_{lr} عدد گراشف بر مبنای ارتفاع دریافت‌کننده مرکزی (l_r) است و از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$Gr_{lr} = \frac{g \beta_r (T_b - T_a) l_r^3}{\nu_a^2} \quad (62)$$

در رابطه فوق β_r ضریب انبساط حجمی و ν_a لزجت سینماتیکی دریافت‌کننده T_a محیط و T_b دمای جداره لوله‌ها می‌باشند [۲۵]. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای دو حالت اجباری و طبیعی به ترتیب از روابط (۶۳) و (۶۴) به‌دست می‌آیند. h_{fc} ضریب جابه‌جایی اجباری و h_{nc} ضریب جابه‌جایی طبیعی است.

$$h_{fc} = \frac{\lambda_{a,b} Nu_{Dr}}{D_r} \quad (63)$$

$$h_{nc} = \frac{\lambda_a Nu_{lr}}{l_r} \quad (64)$$

در روابط فوق، $\lambda_{a,b}$ رسانش گرمایی هوا برای جابه‌جایی اجباری است که با توجه به میانگین دمای المان جداره لوله و محیط حاصل می‌شود و λ_a نیز رسانش گرمایی برای جابه‌جایی طبیعی است که با توجه به دمای محیط به‌دست می‌آید. قطر دریافت‌کننده خورشیدی D_r و l_r ارتفاع دریافت‌کننده است. فرض می‌شود جابه‌جایی اجباری در امتداد افقی و موازی سطح

یکدیگر حل می‌شود. از الگوریتم نیوتن-رفسون برای حل عددی این معادلات استفاده شده است.

معادله (۵۰) برای تعداد کل گره‌ها (NL) نوشته می‌شود و یک دستگاه معادلات دیفرانسیلی شامل تعداد NL معادله برای محاسبه دمای جدار لوله حاصل می‌گردد. عبارت دیفرانسیلی در این دسته معادلات را به روش گسسته‌سازی به عبارت جبری تبدیل کرده تا حل معادلات ممکن گردد. همچنین معادله انرژی نیز مطابق رابطه (۵۹) برای محاسبه دمای سیال انتقال حرارت داخل لوله برای گره‌های دوم تا گره NL نوشته می‌شود و دستگاه معادلاتی شامل تعداد $NL - 1$ معادله تشکیل می‌شود که دمای سیال انتقال حرارت در گره‌های ۲ تا NL را محاسبه می‌کند. دمای سیال انتقال حرارت در گره اول نیز مشخص است. با حل این دو دستگاه معادلات به روش عددی نیوتن-رفسون توزیع دما در جداره لوله و سیال درون آن حاصل می‌شود. خطای حل معادلات ۰/۰۱ فرض شده است.

۸-۱- محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی لوله

انتقال حرارت جابه‌جایی مطابق رابطه (۵۲) محاسبه می‌شود و این انتقال حرارت ترکیب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری^۱ ناشی از حرکت باد به سمت دریافت‌کننده و جابه‌جایی طبیعی^۲ ناشی از اختلاف چگالی در اطراف دریافت‌کننده می‌باشد. در این رابطه h_{lc} ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است این ضریب وابسته به عدد ناسلت (Nu)، عدد رینولدز (Re) و عدد گراشف (Gr) است. در ادامه نحوه محاسبه عدد ناسلت برای جابه‌جایی اجباری و طبیعی ارائه شده است.

جابه‌جایی اجباری:

با توجه به زبری سطح که وابسته به نسبت قطر لوله به قطر دریافت‌کننده می‌باشد، عدد ناسلت جابه‌جایی اجباری از طریق داده‌های جدول (۱) به‌دست می‌آید. مقدار عدد ناسلت همچنین وابسته به عدد رینولدز بوده و در محدوده معینی از عدد رینولدز از رابطه (۶۰) محاسبه می‌شود.

اعداد بی‌بعد با توجه به میانگین دمای لوله‌ها و دمای محیط حاصل می‌شوند. طول معیار در محاسبه اعداد ناسلت و رینولدز، قطر دریافت‌کننده خورشیدی D_r است و Re_{low} حد پایین عدد رینولدز برای پارامتر زبری سطح است.

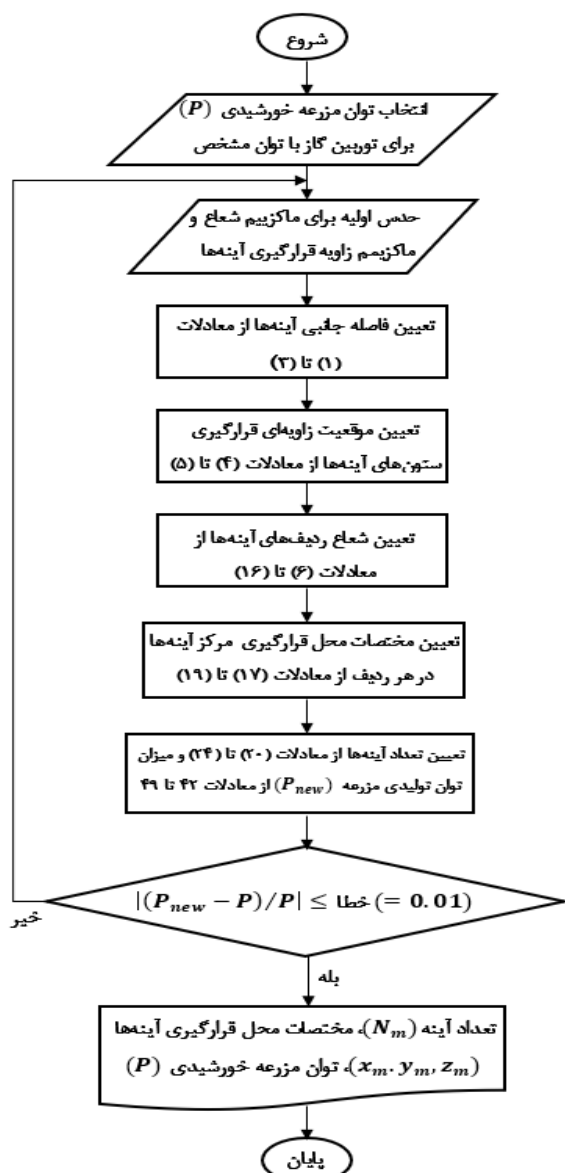
$$Nu_{Dr} = 0.18 Re_{Dr}^{0.63} \quad (60)$$

(when $1E4 < Re_{Dr} \leq Re_{low}$)

² Natural convection

¹ Forced convection

شکل ۱۴ پنجره GUI در متلب



شکل ۱۵ تعیین چیدمان مزرعه خورشیدی به روش سعی و خطا

دریافت‌کننده و جابه‌جایی طبیعی در جهت عمود صورت می‌گیرند و نهایتاً ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای دریافت‌کننده خورشیدی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۶].

$$h_{lc} = (h_{fc}^{3.2} + h_{nc}^{3.2})^{\frac{1}{3.2}} \quad (۶۵)$$

۹- نتایج پژوهش

در ادامه با توجه به تئوری بیان شده در قسمت‌های قبل، چیدمانی برای میدان هلیوستات محاسبه شده است. محاسبات زوایای هلیوستات‌ها، زوایای موقعیت خورشید و شدت تابش متناسب با موقعیت جغرافیایی شهرهای مختلف مورد مطالعه، انجام شده است. همچنین با انجام محاسبات مربوط به انتقال حرارت در دریافت‌کننده خورشیدی، دمای سیال انتقال حرارت خروجی از دریافت‌کننده به دست آمده است. تمامی نتایج برای یک روز از سال ارائه شده؛ ولیکن می‌توان به همین ترتیب برای روزهای دیگر سال نیز محاسبات را انجام داد.

۹-۱- سیکل خورشیدی

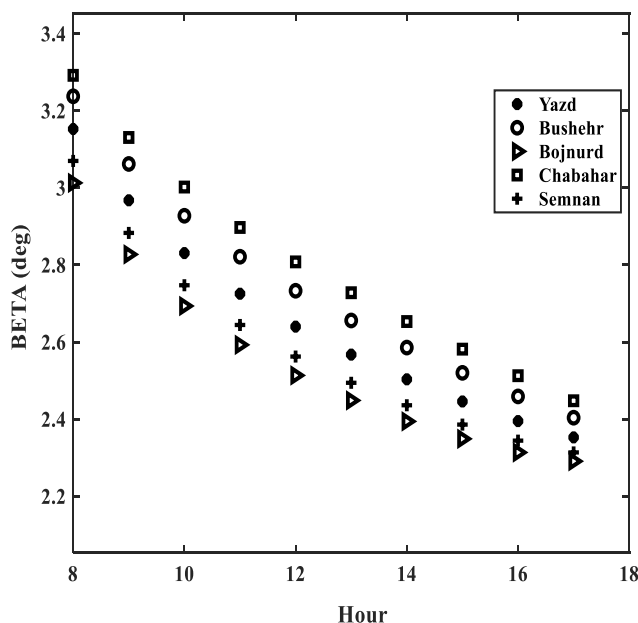
مطابق شکل (۱۴) با استفاده از نرم‌افزار متلب برای انجام محاسبات، یک GUI طراحی شده است که در آن توان مزرعه خورشیدی، شماره روز سال، عرض جغرافیایی شهر مورد نظر، شیب زمین، ارتفاع برج مرکزی به عنوان داده‌های ورودی و ماکزیمم شعاع و ماکزیمم زاویه قرارگیری آینه‌ها نسبت به برج مرکزی به صورت حدس اولیه وارد می‌شود. مقادیر ماکزیمم شعاع و ماکزیمم زاویه قرارگیری آینه‌ها، میزان بزرگی و کوچکی مزرعه خورشیدی را نشان می‌دهد و بر اساس توان تولیدی مزرعه مورد نیاز با سعی و خطا مقادیر آنها تعیین می‌شوند. در این پژوهش مقدار توان تولیدی مزرعه خورشیدی برابر ۱ MW موردنظر است. روندنمای شکل (۱۵) معادلات به کار رفته و روش سعی و خطا را نشان می‌دهد. بدین ترتیب مشخصات چیدمان میدان هلیوستات تعیین می‌گردد.

در این جا مطابق با جدول (۲) عرض جغرافیای پنج شهر مختلف بوشهر، بجنورد، چابهار، سمنان و یزد در نظر گرفته شده است. محاسبات مربوط به چیدمان مزرعه خورشیدی و موقعیت و زاویه قرارگیری هلیوستات‌ها برای شهرهای موردنظر از طریق GUI نشان داده شده در شکل (۱۴) انجام شده است. علاوه بر عرض جغرافیایی هر شهر باقی متغیرهای ورودی کد متلب، مطابق جدول (۳) است.

جدول ۴ ویژگی‌های میدان هلیوستات برای شهرهای مورد مطالعه با فرض توان ۱ MW

ردیف	نام شهر	شدت تابش (W/m ²)	تعداد هلیوستات
۱	بوشهر	۹۰۰	۵۵۲
۲	بجنورد	۶۸۰	۷۵۲
۳	چابهار	۸۰۰	۶۲۳
۴	سمنان	۶۰۰	۸۶۱
۵	یزد	۱۰۰۰	۵۱۹

زوایای شیب و سمت‌الرأس هلیوستات‌ها با توجه به موقعیت پنج شهر یزد، بوشهر، بجنورد، چابهار و سمنان محاسبه شده و در شکل (۱۷) و شکل (۱۸) نشان داده شده است. این شکل‌ها تغییرات زوایای شیب و سمت‌الرأس هلیوستات را برای یک روز از سال و برای یک هلیوستات نشان می‌دهد. به همین ترتیب می‌توان محاسبات را برای دیگر روزهای سال و نیز برای بقیه هلیوستات‌ها انجام داد. مطابق شکل (۱۶) زاویه شیب β برای هلیوستات مورد نظر در طول یک روز حدوداً بین ۲ تا ۴ درجه تغییر می‌کند. شکل (۱۸) نیز تغییرات زاویه سمت‌الرأس γ_H هلیوستات را در طول یک روز نشان می‌دهد. محدوده تغییرات این زاویه حدوداً بین ۶ الی ۱۱ درجه در یک روز است. با داشتن مختصات محل قرارگیری هلیوستات‌ها در مزرعه خورشیدی، زوایای شیب و سمت‌الرأس برای هر یک از آن‌ها قابل محاسبه است.



شکل ۱۷ تغییرات زاویه شیب هلیوستات در طول روز اول سپتامبر

چیدمان مزرعه خورشیدی با فرض ارتفاع برج ۱۰ متر انجام می‌شود. این مقدار با مطالعه مزرعه‌های خورشیدی ساخته شده موجود در کشورهای مختلف و با توجه توان تولیدی آن‌ها تعیین شده است.

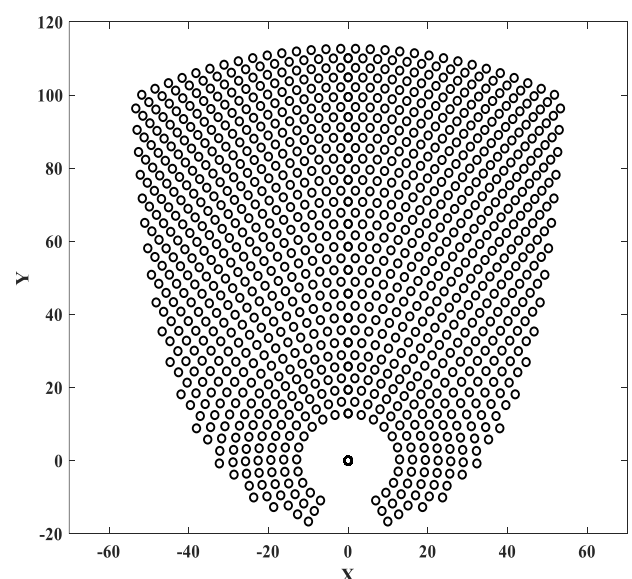
نتایج حاصل از محاسبات برای یک روز از سال ارائه شده است. برای نمونه شکل (۱۶) چیدمان مزرعه خورشیدی محاسبه شده را برای شهر یزد نشان می‌دهد. ویژگی‌های میدان هلیوستات برای دیگر شهرهای مورد مطالعه در جدول (۴) ارائه شده است. این جدول تعداد هلیوستات‌های مورد نیاز در مزرعه خورشیدی را برای تولید توان یک مگاوات در هر یک از شهرهای مورد مطالعه نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود که در شهر یزد به نسبت بقیه شهرها برای تولید توان یک مگاوات، تعداد هلیوستات کمتری مورد نیاز است.

جدول ۲ عرض جغرافیایی شهرهای مورد مطالعه

ردیف	نام شهر	عرض جغرافیایی
۱	بوشهر	۲۸/۹۱
۲	بجنورد	۳۷/۴۷
۳	چابهار	۲۵/۳۶
۴	سمنان	۳۵/۵۷
۵	یزد	۳۰/۸۱

جدول ۳ پارامترهای ورودی کد MATLAB

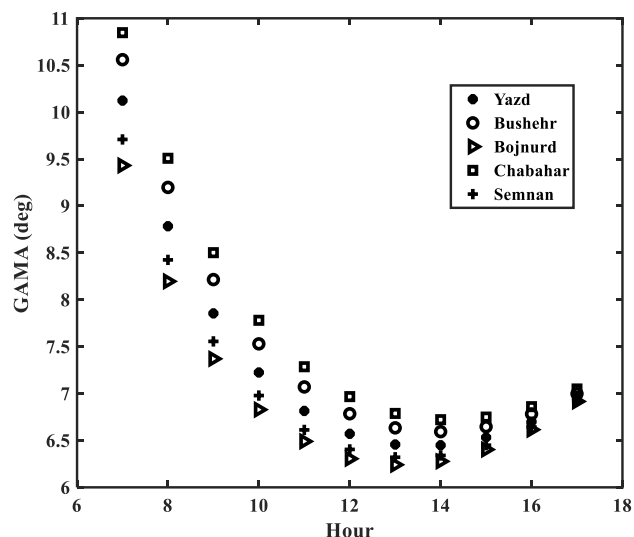
داده‌های ورودی کد		داده‌های حاصل از سعی و خطا	
ارتفاع برج مرکزی	شیب زمین	روز سال	ماکزیمم زاویه مزرعه (Ψ _{max})
۱۰ متر	صفر درجه	اول سپتامبر	۳۰۰ درجه



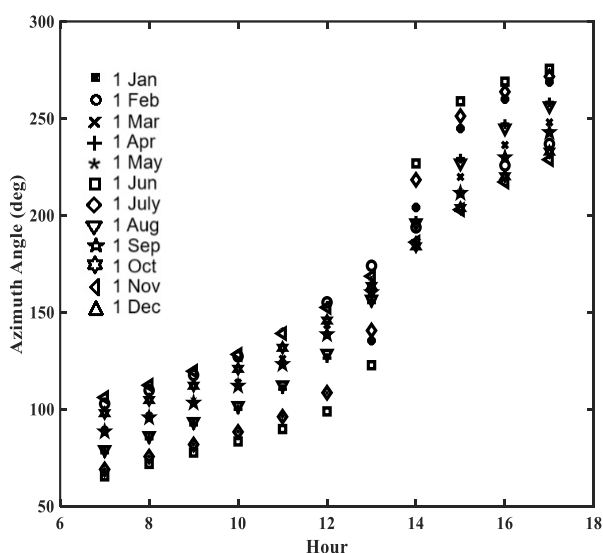
شکل ۱۶ نمونه‌ای مزرعه خورشیدی برای شهر یزد

موقعیت قرارگیری خورشید در شهرهای مختلف یکسان نمی‌باشد و این مسئله در میزان تابش دریافتی در هر شهر مؤثر است. از شکل (۱۹) تا شکل (۲۲) تغییرات زاویه سمت و ارتفاع خورشید با تغییر عرض جغرافیایی و نیز تغییر در روزهای مختلف سال نشان داده شده است. شکل‌های (۱۹) و (۲۰) تغییرات زاویه سمت و ارتفاع خورشید را برای روز اول سپتامبر در شهرهای مختلف نشان می‌دهند. تعیین موقعیت خورشید برای تعیین تغییرات زوایای شیب و سمت‌الرأس هلیوستات‌ها در طول یک روز ضروری است.

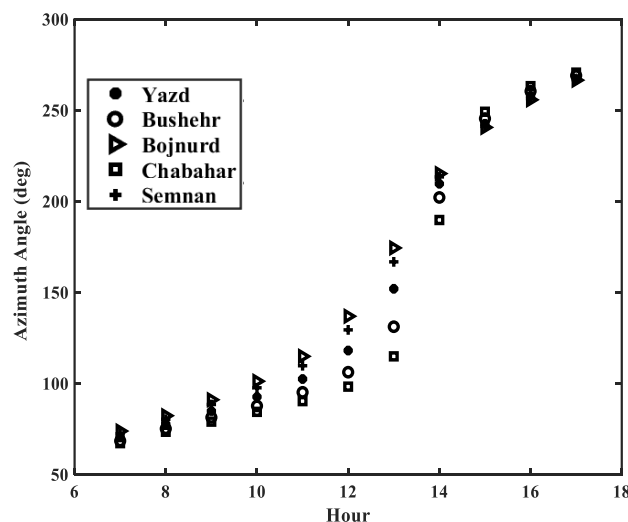
در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) تغییرات زاویه سمت و ارتفاع خورشید برای روز اول هر ماه، در طول یک سال برای شهر یزد نشان داده شده است.



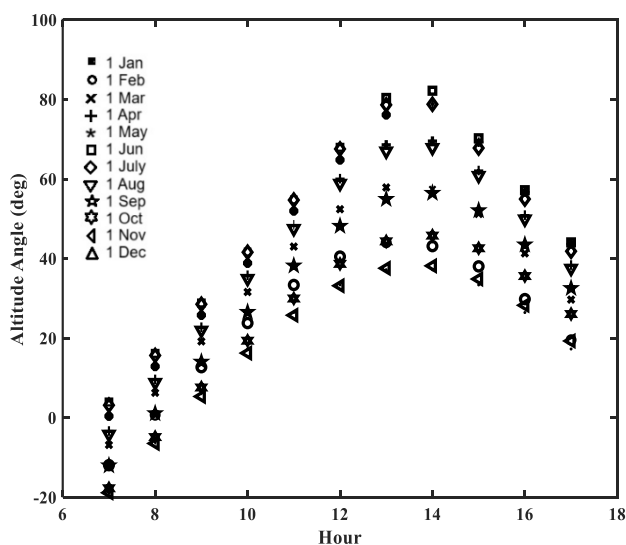
شکل ۱۸ تغییرات زاویه سمت الرأس یک هلیوستات در طول روز اول سپتامبر



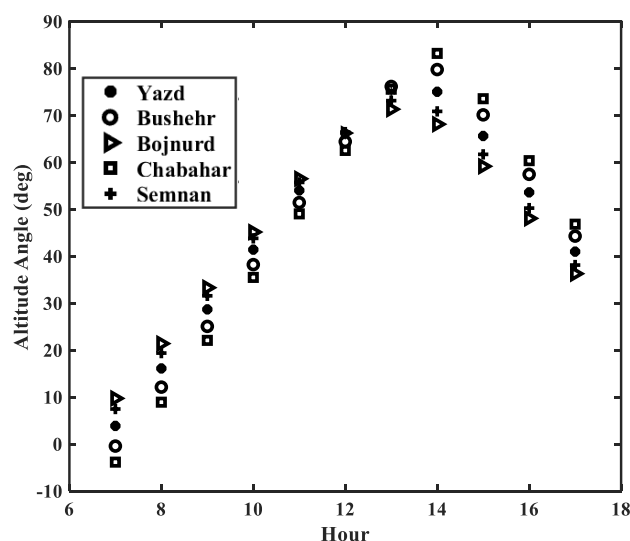
شکل ۲۱ تغییرات زاویه سمت خورشید در طول سال در یزد



شکل ۱۹ زاویه سمت خورشید در روز اول سپتامبر



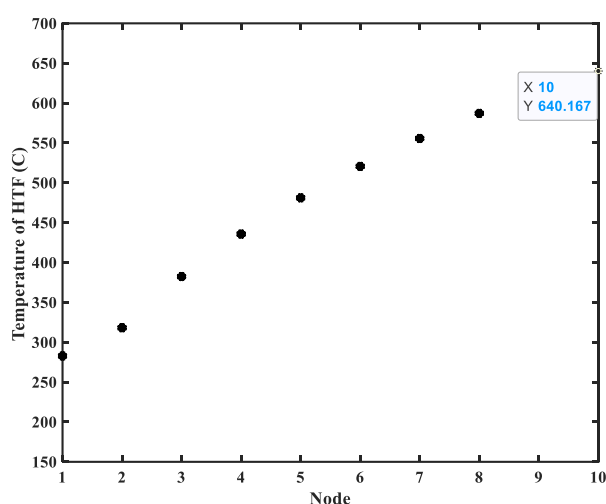
شکل ۲۲ تغییرات زاویه ارتفاع خورشید در طول سال در یزد



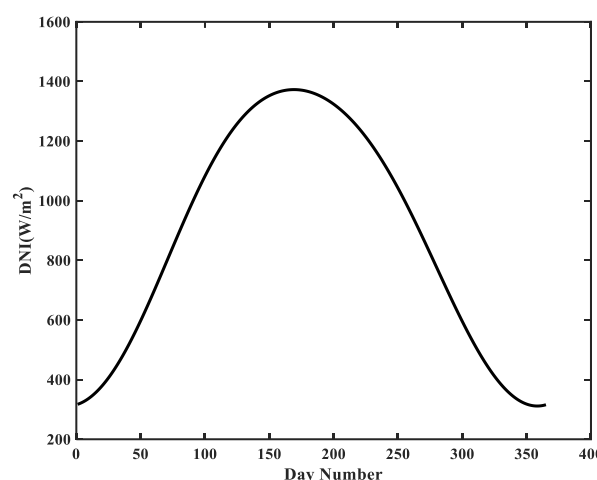
شکل ۲۰ زاویه ارتفاع خورشید در روز اول سپتامبر

۹-۲- سیکل توربین گاز

با توجه به موقعیت متفاوت خورشید در شهرهای مختلف تابش دریافتی در هر منطقه متغیر است. با توجه به میزان تابش در شهرهای مختلف، مطابق نتایج ارائه شده در جدول (۴) شهر یزد پتانسیل قابل توجهی از لحاظ تابش داراست. شکل (۲۳) شدت تابش را در شهر یزد برای روزهای مختلف سال نشان می‌دهد. در ادامه محاسبات مربوط به سیکل ترکیبی توربین گاز و دریافت کننده خورشیدی برای شهر یزد ارائه شده است. شرایط طراحی سیکل ترکیبی در جدول (۵) ارائه شده است.



شکل ۲۴ افزایش دمای سیال انتقال حرارت حاصل در طول لوله دریافت کننده خورشیدی



شکل ۲۳ شدت تابش روزانه در شهر یزد

توربین گاز CENTAUR-40 با توان تولیدی ۳ مگاوات متناسب با توان مزرعه خورشیدی انتخاب شده است. با مطالعه مزرعه‌های خورشیدی که تاکنون به بهره‌برداری رسیده‌اند، نتیجه می‌شود که اغلب توان تولیدی مزرعه خورشیدی حدوداً ۳۰ درصد توان توربین گاز در نظر گرفته می‌شود و این مطلب معیار انتخاب توربین گاز در این پژوهش است. مشخصات توربین گاز در نظر گرفته شده مطابق با جدول (۶) است.

جدول ۵ شرایط طراحی سیکل ترکیبی توربین گاز خورشیدی

عرض جغرافیایی	روز طراحی	دمای محیط	شدت تابش
۳۰/۸۱	اول سپتامبر	۳۵°C	۱۰۰۰ W/m²

جدول ۶ مشخصات توربین گاز CENTAUR-40 [۲۷]

توان خروجی	نرخ حرارت	راندمان	نسبت فشار	سرعت دورانی	دبی گاز
۳ MW	۱۲۹۱۰ kJ/kWh	٪۲۷/۹	۱۰/۳	۱۵۵۰۰ rpm	۱۸/۷ kg/s

شکل (۲۴) تغییرات دمای سیال در دریافت کننده خورشیدی را نشان می‌دهد. دمای سیال انتقال حرارت در خروجی از دریافت کننده برابر ۶۴۰°C است. بنابراین می‌توان هوای خروجی از کمپرسور را در یک مبدل حرارتی در تماس با سیال انتقال حرارت قرار داده تا دمای آن افزایش یابد و سپس در محفظه احتراق با مصرف سوخت کمتری دمای هوا به ماکزیمم دمای مجاز ورودی توربین می‌رسد.

دمای هوای خروجی از کمپرسور در حالت عادی برابر ۳۲۰°C است که در مبدل حرارتی و در تماس با سیال انتقال حرارت و با فرض تعادل گرمایی به حدود ۴۰۰°C می‌رسد. میزان افزایش دمای هوای خروجی از کمپرسور حدود ۸۰°C که طبق رابطه (۶۶) معادل مصرف سوخت ۰/۰۳ kg/s است که نسبت به کل سوخت مصرفی، حدود ۱۴٪ در مصرف سوخت صرفه‌جویی خواهد شد.

$$\dot{m}_{fuel}LHV = \dot{m}_{air}C_{air}(T_f - T_{air}) \quad (66)$$

A_f	مساحت کل مزرعه هلیوستات (m^2)
A_{in}	مساحت داخل لوله دریافت کننده (m^2)
A_m	مساحت خالص تابش از هلیوستات ها (m^2)
A_{ir}	سطح تماس لوله دریافت کننده با محیط (m^2)
A_{ou}	سطح خارجی حجم کنترل لوله (m^2)
C	ظرفیت گرمایی سیال ($kJ/kg \cdot K$)
dS	فاصله آینه با دایره محیطی
DM	قطر مشخصه هلیوستات (m)
DNI	تابش مستقیم خورشید به هلیوستات (W/m^2)
D_r	قطر دریافت کننده (m)
EOt	ضریب تصحیح زاویه ساعت
f	نسبت طول به عرض هلیوستات
f_a	نسبت مساحت بازتاب به مساحت کل هلیوستات
Gr	عدد گراش
F_{b-a}	ضریب شکل
H_t	ارتفاع برج مرکزی (m)
h	ضریب انتقال حرارت جابه جایی ($W/m^2 \cdot K$)
I	شدت تابش (W/m^2)
I_0	تابش فرازمینی (W/m^2)
l_m	طول هلیوستات (m)
l_r	ارتفاع دریافت کننده (m)
LHV	ارزش حرارتی سوخت (kJ/kg)
LST	ساعت محلی
ΔL	فاصله دو گره جداره لوله دریافت کننده (m)
$\dot{m}$	دبی جرمی سیال (kg/s)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg/s)
M_t	شاخص شفافیت
n	شماره روز سال
NL	تعداد گره
N_m	تعداد آینه ها در ردیف های مختلف
Nu	عدد ناسلت
P	توان تابشی (W/m^2)
q_{abs}	حرارت جذب شده از خورشید (W)
q_{HTF}	انتقال حرارت از لوله به سیال (W)
q_{lc}	اتلاف حرارت جابه جایی (W)
q_{lr}	اتلاف حرارت تشعشع (W)
q_{sol}	تابش از هلیوستات به سطح لوله (W)
q_{cond}	انتقال حرارت رسانش (W)
R	شعاع قرارگیری هلیوستات (m)
Re	عدد رینولدز
ΔTZ	اختلاف ساعت با گرینویچ
T	دما (K)
V_b	حجم جداره لوله دریافت کننده (m^3)
w_m	عرض هلیوستات (m)
x_m	مختصات قرارگیری هلیوستات در راستای x (m)
y_m	مختصات قرارگیری هلیوستات در راستای y (m)
z_m	مختصات قرارگیری هلیوستات در راستای z (m)

علائم یونانی

α_b	ضریب جذب
α_s	زاویه ارتفاع خورشید

در رابطه (۶۶) $\dot{m}_{fuel}$ دبی جرمی سوخت، LHV مقدار ارزش حرارتی سوخت، $\dot{m}_{air}$ دبی هوای ورودی کمپرسور، C_{air} ظرفیت گرمایی هوا، T_f دمای هوا بعد از خروج از مبدل حرارتی و T_{air} دمای هوای در خروجی کمپرسور است.

۱۰- نتیجه گیری

در این مقاله سیکل ترکیبی یک نیروگاه خورشیدی متشکل از دریافت کننده خورشیدی از نوع برج مرکزی و یک توربین گاز مورد بررسی قرار گرفت. بررسی چیدمان هلیوستات ها اطراف برج مرکزی و زاویه قرارگیری آن ها در اطراف برج انجام شد. بر این اساس مشاهده شد که زوایای شیب و سمت الرأس هلیوستات ها در ساعات مختلف روز تغییر می کنند. بدین ترتیب با در نظر گرفتن تغییرات زاویه قرارگیری هلیوستات می توان اطمینان حاصل نمود که هلیوستات ها در طول روز همواره خورشید را دنبال کرده و به سمت آن قرار دارند که باعث استفاده بهینه از میدان هلیوستات می شود. بررسی ها برای ۵ شهر مختلف صورت گرفت و مشخص شد که شهر یزد پتانسیل خوبی به لحاظ تابش دارد و با تعداد ۵۱۹ هلیوستات قادر است توان مورد نظر (MW) (۱) را تولید کند و نسبت به بقیه شهرهای مورد مطالعه تعداد هلیوستات کمتری نیاز دارد.

با ترکیب مزرعه خورشیدی یک مگاواتی طراحی شده در شهر یزد و توربین گاز CENTAUR-40 تأثیر استفاده از انرژی خورشیدی در کاهش مصرف سوخت بررسی شد. در دریافت کننده خورشیدی که در بالای برج مرکزی قرار دارد، سیال انتقال حرارت با عبور از لوله های دریافت کننده و توسط تابش خورشیدی داغ می شود. در این پژوهش محاسبات انجام شده برای تعیین دمای سیال انتقال حرارت نشان می دهند که دمای این سیال به $640^\circ C$ می رسد. از گرمای این سیال در یک مبدل حرارتی، برای گرم کردن هوای خروجی از کمپرسور تا $400^\circ C$ استفاده می شود. این در حالی است که در شرایط سیکل عادی دمای هوای خروجی از کمپرسور $320^\circ C$ است. با توجه به ماکزیمم دمای مجاز ورودی توربین که معادل $900^\circ C$ است، به این ترتیب با کاهش اختلاف دمای خروجی و ورودی محفظه احتراق، سیستم ترکیبی توربین گاز و انرژی خورشیدی فوق، طبق محاسبات صورت گرفته در این پژوهش، مصرف سوخت در محفظه احتراق را ۱۴ درصد کاهش می دهد.

۱۱- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

A_{an}	مساحت مقطع لوله دریافت کننده (m^2)
----------	--

- [2] D. J. Murray, "Small-scale solar central receiver system design and analysis," California Polytechnic State University, 2012, doi: <https://doi.org/10.15368/theses.2012.110>
- [3] K. Lovegrove and W. Stein, "Concentrating solar power technology: principles, developments and applications," 2012, doi: <https://doi.org/10.1533/9780857096173>.
- [4] M. Schmitz, P. Schwarzbözl, R. Buck, and R. Pitz-Paal, "Assessment of the potential improvement due to multiple apertures in central receiver systems with secondary concentrators," *Solar Energy*, vol. 80, no. 1, pp. 111-120, 2006/01/01/ 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.02.012>.
- [5] M. M. Gilbert, *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons, 2004, doi: <https://doi.org/10.1002/0471668826>
- [6] G. J. Kolb, D. J. Alpert, and C. W. Lopez, "Insights from the operation of Solar One and their implications for future central receiver plants," *Solar Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 39-47, 1991/01/01/ 1991, doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(91\)90061-Z](https://doi.org/10.1016/0038-092X(91)90061-Z).
- [7] H. Derbal-Mokrane, S. Bouaichaoui, N. E. Gharbi, M. Belhamel, and A. Benzaoui, "Modeling and numerical simulation of an Integrated Solar Combined Cycle System in Algeria," *Procedia Engineering*, vol. 33, pp. 199-208, 2012/01/01/ 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1194>.
- [8] G. Augsburger and D. Favrat, "Modelling of the receiver transient flux distribution due to cloud passages on a solar tower thermal power plant," *Solar Energy*, vol. 87, pp. 42-52, 2013/01/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.10.010>.
- [9] W. G. Le Roux, T. Bello-Ochende, and J. P. Meyer, "The efficiency of an open-cavity tubular solar receiver for a small-scale solar thermal Brayton cycle," *Energy Conversion and Management*, vol. 84, pp. 457-470, 2014/08/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.048>.
- [10] B. Belgasim, O. Behar, M. Abdunnabi, and F. Mohamed, "Modeling and simulation of a large-scale hybrid solar gas turbine with pressurized air receiver," in *2020 11th International Renewable Energy Congress (IREC)*, 29-31 Oct. 2020 2020, pp. 1-5, doi: [10.1109/IREC48820.2020.9310395](https://doi.org/10.1109/IREC48820.2020.9310395).
- [11] O. A. Alawi et al., "Nanofluids for flat plate solar collectors: Fundamentals and applications," *Journal of Cleaner Production*, vol. 291, p. 125725, 2021/04/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125725>.
- [12] A. A. Ani, "Hybrid Solar Gas Turbine Plant for the Conditions of Australia," in *2023 International Ural*

β_L	شیب زمین
β	زاویه شیب هلیوستات
β_r	ضریب انبساط حجمی
γ_H	زاویه سمت الرأس هلیوستات
γ_j	زاویه محورهای قرارگیری هلیوستات
γ_s	زاویه سمت خورشید (ازیموت)
δ	زاویه میل منطقه
ε	ضریب صدور
η	بازده
θ_z	زاویه سمت الرأس خورشید (زنیت)
λ_1	ضریب رسانش (W/m·K)
$\lambda_{a,b}$	ضریب رسانش در جابه‌جایی اجباری (W/m·K)
λ_a	ضریب رسانش در جابه‌جایی طبیعی (W/m·K)
ν_a	لزجت سینماتیکی
σ	ثابت استفن-بولتزمن (W/m ² ·K ⁴)
τ	تراکم چیدمان هلیوستات
φ	عرض جغرافیایی
Ψ	زاویه قرارگیری ستون آینه‌ها
ω	زاویه ساعت
زیرنویس‌ها	
a	محیط (amb)
abs	حرارت جذب شده
air	هوا
b	جدار لوله دریافت‌کننده
d	تابش دیفیوز
D_r	قطر دریافت‌کننده
H	هلیوستات
i	شماره گره دریافت‌کننده
f	نهایی (Final)
fc	جابه‌جایی اجباری
$fuel$	سوخت
lc	جابه‌جایی کل
l_r	طول دریافت‌کننده
low	حد پایینی
m	مرکز یک هلیوستات
min	مینیمم
max	ماکزیمم
nc	جابه‌جایی طبیعی
HTF	سیال انتقال حرارت
r	دریافت‌کننده خورشیدی
$total$	تابش کل

۱۲- مراجع

- [1] P. Sharma, R. Sarma, L. Chandra, R. Shekhar, and P. S. Ghoshdastidar, "Solar tower based aluminum heat treatment system: Part I. Design and evaluation of an open volumetric air receiver," *Solar Energy*, vol. 111, pp. 135-150, 2015/01/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.035>.

<https://elmnet.ir/doc/10763648-15911>

- [20] S. A. Mousavi Maleki, H. Hizam, and C. Gomes, "Estimation of hourly, daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: Models re-visited," *Energies*, vol. 10, no. 1, p. 134, 2017, doi: <https://doi.org/10.3390/en10010134>.
- [21] K. E. Holbert and D. Srinivasan, "Solar energy calculations," in *Handbook of Renewable Energy Technology & Systems*: World Scientific, 2022, pp. 181-200, doi: https://doi.org/10.1142/9789814289078_0008
- [22] D. G. Erbs, S. A. Klein, and J. A. Duffie, "Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation," *Solar Energy*, vol. 28, no. 4, pp. 293-302, 1982/01/01/ 1982, doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90302-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90302-4).
- [23] T. R. Ayodele and A. S. O. Ogunjuyigbe, "Prediction of monthly average global solar radiation based on statistical distribution of clearness index," *Energy*, vol. 90, pp. 1733-1742, 2015/10/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.137>.
- [24] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, 2013, doi: <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
- [25] L. Xu, W. Stein, J.-S. Kim, Y. C. S. Too, M. Guo, and Z. Wang, "Transient numerical model for the thermal performance of the solar receiver," *Applied Thermal Engineering*, vol. 141, pp. 1035-1047, 2018/08/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.112>.
- [26] C.-J. Winter, R. L. Sizmann, and L. L. Vant-Hull, *Solar power plants: fundamentals, technology, systems, economics*. Springer Science & Business Media, 2012, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61245-9>
- [27] "CENTAUR 40, Gas Turbine Product." <https://etn.global/gas-turbine-products/centaur-40> (accessed).
- Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 29 Sept.-1 Oct. 2023 2023, pp. 39-43, doi: [10.1109/UralCon59258.2023.10291070](https://doi.org/10.1109/UralCon59258.2023.10291070).
- [13] M. C. Cameretti, A. Cappiello, R. De Robbio, and R. Tuccillo, "Solar-assisted micro gas turbine with humid air or steam-injected option," *Energy*, vol. 270, p. 126783, 2023/05/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126783>.
- [14] M. Badri and M. H. Saidi, "Transient simulation of an integrated solar gas turbine equipped with hydrogen energy storage and hydrogen-fueled combustion chamber for continuous power supply," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 103, pp. 349-364, 2025/02/17/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.133>.
- [15] F. M. F. Siala and M. E. Elayeb, "Mathematical formulation of a graphical method for a no-blocking heliostat field layout," *Renewable Energy*, vol. 23, no. 1, pp. 77-92, 2001/05/01/ 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00159-2](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00159-2).
- [16] F. J. Collado and J. A. Turégano, "Calculation of the annual thermal energy supplied by a defined heliostat field," *Solar Energy*, vol. 42, no. 2, pp. 149-165, 1989/01/01/ 1989, doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(89\)90142-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(89)90142-4).
- [17] Y. Zhou and Y. Zhao, "Heliostat Field Layout Design for Solar Tower Power Plant Based on GPU," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 3, pp. 4953-4958, 2014/01/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01581>.
- [18] S. A. Klein, "Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces," *Solar Energy*, vol. 19, no. 4, pp. 325-329, 1977/01/01/ 1977, doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(77\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(77)90001-9).
- [19] P. Talebizade, "Design and control of heliostat fields of a central receiver power plant and it's genetic algorithm optimization," Master, Mechanical Department, Shahid bahonar university, Kerman, Iran, 2001, url: