تعیین دقیق ماکزیمم ساعات آفتابی برای آرایش های مختلف پنلهای خورشیدی به کمک یک آرایش خاص پنل

آزاده امامی، علی کریم پور، مصطفی کریم پور، فاطمه شکیبایی
دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق
دانشگاه فردوسی مشهد
مشهد، ایران

چکیده–تولید روزانه سلولهای خورشیدی از اهمیت ویژهای برخوردار است که بسته به شرایط جغرافیایی و فصول مختلف و آرایش آرایه این میزان متغیر است. محاسبه تولید سلولهای خورشیدی در شرایط مختلف جغرافیایی و زمانی از اهمیت ویژهای در احداث نیروگاههای خورشیدی برخوردار است و همانند آب پشت یک سد و سوخت در یک نیروگاه گازی که نقش کلیدی در تعیین تولید انرژی ایفا میکنند میزان ماکزیمم انرژی قابل حصول از خورشید در هر منطقه و زمان نیز جهت برآورد اقتصادی و سنجش میزان تولید اهمیت ویژهای دارد. بدین منظور تلاش های بسیاری جهت تعیین میزان این انرژی در مناطق مختلف ارائه گردیده است که از میزان دقتهای مختلفی برخوردار میباشند. به منظور طراحی و تجزیه و تحلیل سیستمهای خورشیدی، ما نیازمند اطلاع از میزان تابش در دسترس خورشید میباشیم. یکی از روشهای مستقیم استفاده از معادلاتی میباشد که این معادلات قادر به محاسبهی میزان تابش خورشید میباشند. هدف اصلی در این مقاله اصلاح ضرایب موجود در فرمولهای محاسبهی تابش با استفاده از یک نمونه عملی به منظور رسیدن به مقدار دقیقتری از ماکزیمم انرژی قابل حصول از خورشید(ماکزیمم ساعات آفتابی)برای یک آرایش خاص و همچنین استفاده از فرمولهای اصلاح شده و تعمیم این فرمولها به سایر آرایش های سلول خورشیدی میباشد.

واژههای کلیدی —ماکزیمم انرژی خورشیدی قابل حصول ؛ پنل خورشیدی؛آرایش آرایه خورشیدی

۱. مقدمه

امروزه اهمیت تولید انرژی از منابع انرژی تجدیدپذیر بر کسی پوشیده نیست. خورشید یکی از مهمترین منابع تجدید پذیر جهت تولید انرژی به حساب میآید. میزان انرژی خورشیدی که سالیانه به جو زمین برخورد می کند حتی با تمامی منابع انرژی تجدیدناپذیر روی کرهی زمین قابل مقایسه نمیباشد ولی در حال حاضر فقط مقدار کمی از این انرژی مورد بهرهبرداری واقع میشود [۱]. میزان تولید انرژی توسط سلول خورشیدی از اهمیت زیادی برخوردار است. این میزان به نحوهی قرارگرفتن آرایه در مقابل خورشید وابسته است، محاسبهی میزان تولید در یک مکان و زمان معین برای ساختارهای مختلف آرایه همواره مورد توجه است.

۱.۱. بخشهای مختلف تابش خورشید

تابش به طور کلی به سه دسته قسمت میشود [۲-۳]:

الف– پرتو (*Beam*): که به صورت مستقیم از جو به آرایه میرسد.

ب –انتشار(*Diffuse*):که تابش خورشیدی است که پس از برخورد با مولکولها ذرات گرد و غبار به آرایه میرسد.

ج– انعکاس (*Reflected*): تابشی است که پس از انعکاس از سطح زمین یا دیگر سطوح مقابل آرایه به سلول خورشیدی میرسد.

اندازهگیری دقیق تابشهای سه گانهی خورشید توسط دستگاههای اندازه گیری بسیار دقیقی انجام می شود، شکل ۱ یک نمونه از این دستگاه ها را نشان می دهد.

دستگاه های اندازهگیری مورد استفاده دارای هزینهی بالا بوده و احتیاج به کالیبراسیون داشته و تنها قادر به تعیین انواع تابش در محل نصب شده می باشند، لذا این دستگاهها رواج زیادی نیافتهاند و این امر لزوم استفاده از روشهای محاسباتی جهت تخمین میزان تابش را هرچه بیشتر آشکار می سازد.

شکل ۱: پیرانومتر وسیله ای جهت سنجش تابش کل خورشید

۲.۱. دنبالکنندهی خورشید (Tracker)

به منظور بهرهبرداری هر چه بیشتر از تابش خورشید و دستیابی به حداکثر انرژی الکتریکی از دنبالکننده استفاده می شود [۴]. استفاده یا عدم استفاده از دنبالکننده با توجه به صرفهی اقتصادی آن مورد بررسی قرار میگیرد. چنان چه میزان تولید با قراردادن دنبالکننده افزایش قابل ملاحظهای بیابد و از نظر اقتصادی به صرفه باشد دنبال کننده مورد استفاده قرار میگیرد. روشها و کنترل کنندههای بسیاری به منظور دریافت حداکثر انرژی از خورشید طراحی و پیاده سازی شدهاند[۵–۸] .

پنلهای خورشیدی بسته به شرایط ممکن است بدون دنبالکننده با زاویهی پنل با افق(تیلت [1]) ثابت، دارای دنبالکننده یک محوره در جهت شرق به غرب با تیلت ثابت، دارای دنبالکننده یک محوره با تیلت متغیر و یا دارای دنبالکننده دو محوره باشند.

از آنجا که بیشترین تولید زمانی است که سلول عمود بر تابش خورشید قرار داشته باشد. استفاده از دنبالکننده به منظور استفاده هر چه بیشتر از تابش خورشید و قراردادن پنل در شرایطی برای تولید هر چه بهتر میباشد که بسته به صرفه اقتصادی ممکن است از هر کدام از انواع دنبالکننده ها استفاده کنیم.

[1]Tilt

۳.۱. آرایشهای مختلف سلولهای خورشیدی

آرایهها ممکن است به هر یک از صورتهای زیر نصب و مورد استفاده قرار بگیرند:

۱ – آرایه افقی

۲ – آرایه با تیلت ثابت در عرض جغرافیایی

۳ – آرایه با تیلت ثابت(۱۵– معادل عرض جغرافیا) مناسب برای فصل تابستان در نیم کره ی شمالی

۴ – آرایه با تیلت ثابت(۱۵+ معادل عرض جغرافیا) مناسب برای فصل زمستان در نیم کره ی شمالی

۵ – آرایه با تیلت قابل تنظیم در ابتدای هر فصل

۶ – آرایه دارای دنبالکننده یک محوره در جهت شرق به غرب

۷ – آرایه دارای دنبالکننده دو محوره به منظور دنبال کردن خورشید در شبانه روز و تیلت قابل تنظیم

۲. محاسبهی میزان تابش خورشید

اولین گام به منظور محاسبه تابش خورشید در یک هوای صاف محاسبهی میزان تابشی از خورشید است که به صورت عمودی به یک سطح فرضی برخورد میکند. این تابش با نماد I_0 نشان داده میشود.

این تابش به فاصلهی بین زمین و خورشید بستگی دارد و با توجه به تغییر این فاصله در طول سال این تابش نیز در حال تغییر است و همچنین این تابش تابعی از شدت خورشید است که با یک روند قابل پیش بینی در حال بالا و پایین رفتن میباشد. میزان این تابش از رابطه ی ۱ قابل محاسبه است[1].

(۱)

$$I$$

که در آن SC ثابت خورشید نامیده میشود و n شماره روز به میلادی است. ثابت خورشید تخمینی از متوسط تابش سالانه ی خورشید در خارج از جو میباشد که مقدار آن تقریبا برابر با $1.377\ {kw}/{m^2}$ است. زمانی که تابش خورشید از جو عبور میکند بخش قابل توجهی از آن توسط گازهای مختلف در جو جذب میشود و یا در مولکول های هوا و یا ذرات ماده به

دام میافتد. در واقع در طول سال کمتر از نصف تابش خورشید که در پشت جو زمین قرار دارد به سطح زمین میرسد تضیف تابش خورشید که از جو به زمین میرسد تابع فاصلهای میباشد که این تابش در طول جو طی میکند و همچنین فاکتورهایی نظیر گرد و خاک، آلودگی هوا، ذرات بخار آب موجود در جو، ابر و مه که به سادگی قابل محاسبه نیستند.

به کمک رابطهی ۲ میتوان تابش رسیده به جو زمین را محاسبه نمود [۱]:

$$I_B = A\, e^{-km} \qquad (۲)$$

که در آن I_B آن بخش از تابش خورشید است که به زمین میرسد.

K: ضریبی بدون یکا است که عمق نوری نامیده میشود.

A: شار ظاهری خارج از محیط زمین

m: نیز ضریب جرم هوا *(air mass ratio)* نامیده میشود که به صورت رابطهی ۳ قابل بیان است:

(۳)

هریک از ضرایب K , Aبه کمک روابط ۴ و ۵ قابل محاسبه میباشند:

(۴)

(۵)

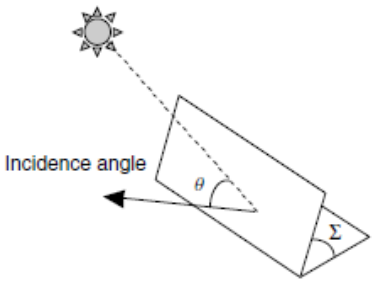
که در این رابطه n شماره روز (فاصله از اولین روز میلادی) میباشد.

۱.۲. محاسبه تابش پرتو (Beam)

محاسبهی بخش تابش پرتو از تابش کل خورشید از رابطهی ۶ حاصل می-شود:

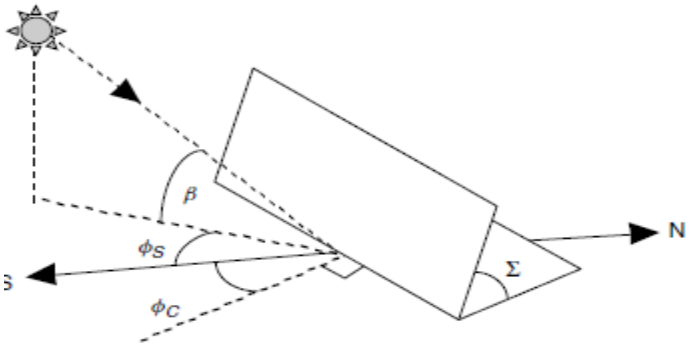
(۶)

همانطور که در شکل ۲ ملاحظه میگردد θ زاویه بین خط عمود بر سطح آرایه و تابش خورشید میباشد:



شکل۲: زاویه θ، زاویهی بین خط عمود بر آرایه و پرتو خورشید[۱].

زاویه θ تابعی است از جهت آرایه β و همچنین زاویههای ϕ_s ,ϕ_cخورشید در هر زمان خاص که این زوایا را در شکل ۳ نشان داده شده است:



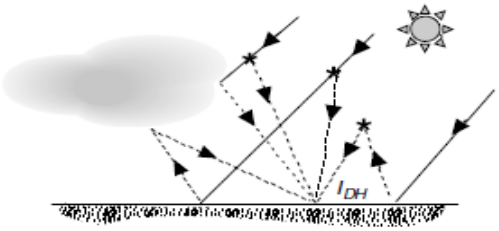
شکل۳ زوایای ϕ_c: زاویهی جهت آرایه با جنوب، ϕ_s: زاویه ی تصویر پرتو خورشید با جنوب، زاویه ی β: زاویه ی پرتو خورشید با افق و همچنین ∑ زاویه ی آرایه با افق[۱].

همانطور که در شکل ۳ مشخص است ϕ_c که همان *Azimuth angle* نام دارد زاویه ی جهت آرایه با جنوب است که دارای مقداری مثبت در جهت جنوب شرقی و مقداری منفی در جهت جنوب غربی است و همچنین زاویهی ϕ_s، *altitude angle* نام دارد و نشان دهندهی زاویهی تصویر پرتو خورشید با جنوب میباشد و ∑ زاویهی آرایه با افق است. ارتباط زاویه θ با زاوایای ϕ_c ،ϕ_s وβ با رابطهی۷ قابل بیان است.

(۷)

۲.۲. محاسبه تابش انتشار (Diffuse)

محاسبه دقیق بخش انتشار(*Diffuse*) از تابش خورشید بسیار دشوارتر از محاسبه بخش پرتو *(Beam)* آن میباشد. همانطور که در شکل ۴ ملاحظه میگردد تابش ورودی به جو ممکن است توسط ذرات جو و رطوبت و نم پراکنده شود و همچنین توسط ابرها باز تابیده شود که این همان بخش انتشار از تابش خورشید است.



شکل۴: تابش انتشار توسط ذرات و مولکولهای جو چراکنده شده و توسط ابرها باز تاب داده میشود [۱].

یکی از سادهترین روشها برای محاسبه تابش انتشار(*Diffuse*) این است که برای این تابش شدت معادلی را در همهی جهات متصور شویم، که در این مدل آسمان در همهی جهات دارای خواص فیزیکی مشابه فرض میشود. رابطهی ۸ به منظور محاسبه تابش انتشار (*Diffuse*)خورشید در یک هوای صاف به کار می-رود[1]:

(۸)

که در آن C ضریب انتشار آسمان نامیده میشود و به صورت رابطهی ۹ قابل محاسبه است:

(۹)

۳.۲ محاسبه تابش انعکاس (*Reflected*)

تابش انعکاس نتیجه تابشی است که از سطوح مقابل آرایه به سطح آرایه باز تابیده میشوند. این تابش ممکن است نقش زیادی را در تولید ایفا کند،به طور مثال در یک روز آفتابی چنان چه در جلوی آرایه برف یا آب وجود داشته باشد نقش این تابش قابل توجه خواهد بود و یا این تابش ممکن است به قدری کم باشد که قابل صرف نظر کردن باشد. یک فرض ساده برای مدل کردن این نوع تابش متصور شدن سطحی در زیر آرایه میباشد که با ضریب انتشار ρتابش انعکاس را به طور مساوی در همهی جهات منتشر میسازد. تخمین زده میشود که ضریب ρ بسته به سطح زیر آرایه مقداری متغیر بین ۰/۱ تا ۰/۸ را دارا باشد. و در نهایت تابش انعکاس به صورت رابطهی ۱۰ قابل محاسبه خواهد بود[1]:

(۱۰)

۳. آرایههایی همراه با سیستم رد یاب (*Tracker*)

در محاسبهی انواع تابش فرض بر این بود که آرایه با سطح افق دارای زاویه-ای است که این زاویه ثابت میباشد. در برخی از موارد وجود رد یابهایی که خورشید را دنبال مینمایند از نظر اقتصادی توجیهپذیر خواهند بود. رد یابها ممکن است به صورت دو محوره باشند که در این صورت هم زاویهی آرایه با افق متغیر است و هم سیستم ردیاب خورشید را در جهت شرق به غرب در طول روز دنبال میکند و یا به صورت تک محوره که در این صورت خورشید تنها در جهت شرق به غرب دنبال خواهد شد.

۱.۳ محاسبه تابش کل در یک آرایهی دارای ردیاب دو محوره

با وجود این نوع ردیاب آرایه همواره در جهت عمود بر خورشید واقع خواهد شد.

I_{I} (۱۱)

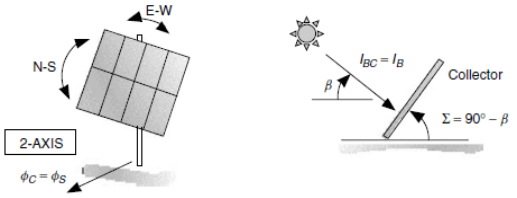
(۱۲)

I_{I}

(۱۳)

و در نهایت تابش کل:

(۱۴)



شکل۵: آرایه دارای ردیاب دو محوره و ارتباط بین زوایا

۲.۳ محاسبهی تابش کل در یک آرایه دارای ردیاب یک محوره با تیلت ثابت

سیستم ردیاب در جهت شرق–غرب قادر به چرخش بوده و خورشید را در طول شبانه روز دنبال مینماید. چنان چه فرض کنیم آرایه دارای زاویه ثابتی با افق معادل با عرض جغرافیایی باشد سیستم رد یاب باید چرخشی معادل چرخش زمین یعنی ۱۵ درجه در هر ساعت (15°/h) را دارا باشد.

$I_{BC} = \text{I}_\text{B}\cos\delta$ (۱۵)

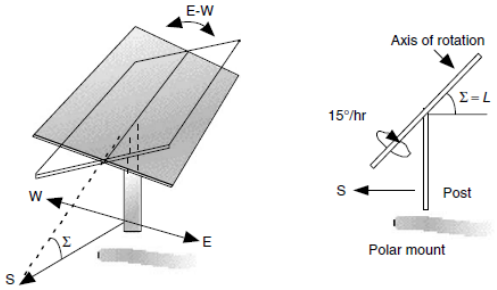
که در آن δ طبق رابطهی ۱۶ قابل محاسبه است[۱].

(۱۶)

(۱۷)

(۱۸)

(۱۹)



شکل۶: آرایه دارای ردیاب یک محوره[۱]

۳.۳. محاسبهی تابش کل در یک آرایه دارای ردیاب یک محوره با تیلت متغیر

در این نوع آرایه سیستم ردیاب وظیفهی تغییر زاویهی آرایه با افق را عهده - دار خواهد بود. این نوع ردیاب به دلیل افزایش اندکی که در میزان ساعات آفتابی ایجاد مینماید از نظر اقتصادی توجیهپذیر نبوده و کمتر مورد استفاده قرار میگیرد.

I_L (۲۰)

(۲۱)

I_L

(۲۲)

و در نهایت تابش کل:

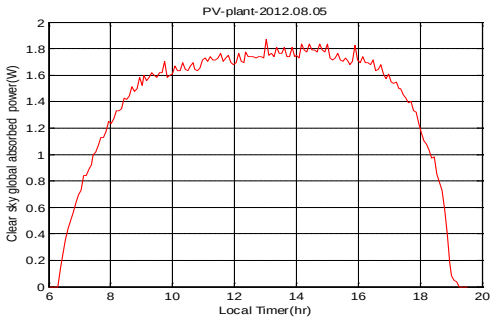
(۲۳)

۴. نمونهی آزمایشی

همانطور که در مقدمه بیان گردید هدف تعیین PSH[2] یک منطقه براساس اطلاعات دریافتی از یک آرایهی نصب شده و تعمیم آن به سایر آرایشها میباشد. در این بخش اطلاعات نیروگاه خورشیدی پژوهشکدهی هوا و خورشید مشهد که دارای ردیاب یک محوره میباشد برای یک روز خاص اخذ و براساس آن میزان PSH برای سایر آرایشها تخمین زده میشود. اطلاعات سیستم مورد استفاده به شرح زیر است:

Dimension: 1551*810*35 mm
Weight: 16kg
Rating power 200 W
Open circuit voltage: 45.7 V
Short circuit current: 5.42 A
Rating power voltage: 40.08 V
Rating power current: 4.99 A
Temperature coefficient factor: -0.46 (%/oC)

برای این نمونه عملی اطلاعات توان تولیدی سلول در فاصله زمانیهای ۵ دقیقهای از ابتدای طلوع تا غروب خورشید در تاریخ ۱۳۹۱/۰۵/۱۵ ثبت شده است. نمودار توان لحظهای بر حسب زمان برای این نمونه در شکل ۷ رسم شده است.



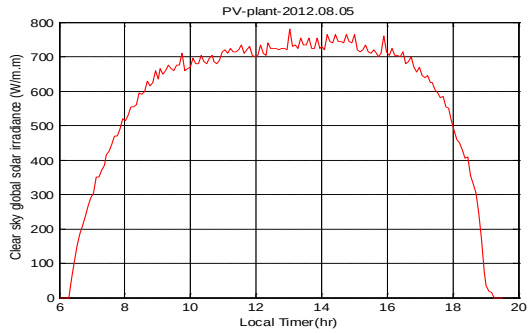
شکل ۷: نمودار توان لحظهای

۱.۴. محاسبهی نمودار تابش از روی نمودار توان

از آنجایی که ما برای محاسبه PSH نیازمند اطلاعاتی راجع به تابش میباشیم نمودار توان را به نمودار تابش تبدیل میکنیم که برای تبدیل نقطه به نقطه این نمودار از رابطهی۲۴ بهره میگیریم:

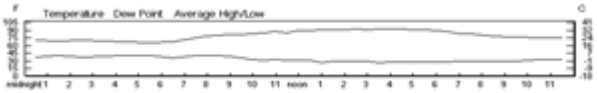
(۲۴)

[2] Peak Sun Hours

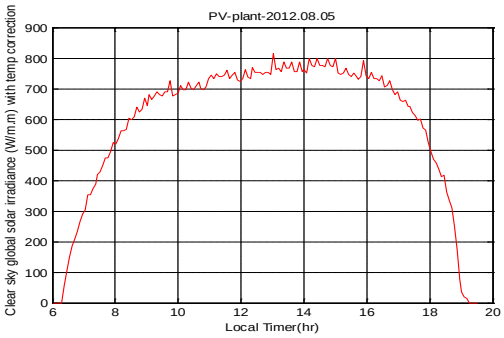


شل ۸: نمودار تابش رسم شده به کمک نمودار توان لحظهای

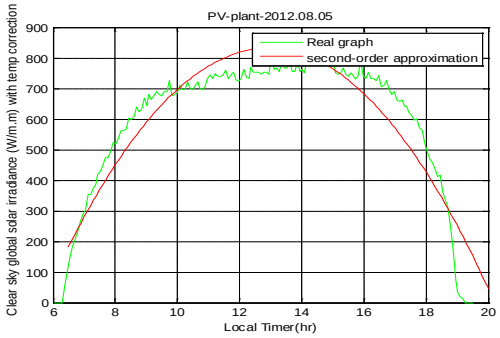
با محاسبه سطح زیر نمودار تابش و تقسیم آن بر ۱۰۰۰ میتوان میزان *PSH* را به دست آورد برای مقایسه نتایج حاصل از این نمودار با فرمولها و اصلاح آنها لازم است که این نمودار براساس شرایط استاندارد تنظیم گردد. با بررسی میزان تغییرات دما در تاریخ ۱۳۹۱/۰۵/۱۵و اصلاح نمودار شکل ۸ بر اساس تغییرات دمایی و تبدیل این نمودار به نمودار در شرایط استاندارد ۲۵ درجه این نمودار با نمودار حاصل از فرمولهای ۱۵ تا ۱۹ مربوط به آرایه دارای *Tracker* یک محوره در جهت شرق- غرب برای اصلاح ضرایب مقایسه پذیر خواهد بود، تغییرات دما، نمودار اصلاح شده در شرایط استاندارد و همچنین نمودار اصلاح شده به همراه تقریب درجهی دوم آن به ترتیب در شکل - های ۹، ۱۰ و ۱۱ رسم شده است.



شکل ۹: نمودار تغییرات دمایی مشهد در تاریخ ۱۳۹۱/۰۵/۱۵



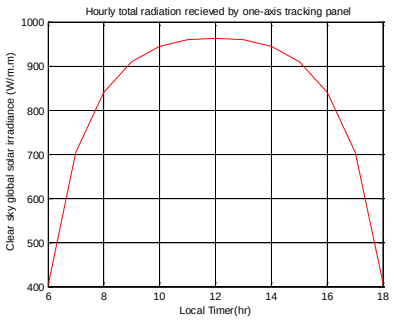
شکل ۱۰: نمودار تابش پس از اصلاح ضریب دمایی



شکل ۱۱: نمودار تابش پس از اصلاح ضریب دمایی به همراه نمودار تقریب درجه ۲

۲.۴. محاسبهی *PSH* با استفاده از فرمولهای تئوری برایس آرایه دارای ردیاب یک محوره با تیلت ثابت

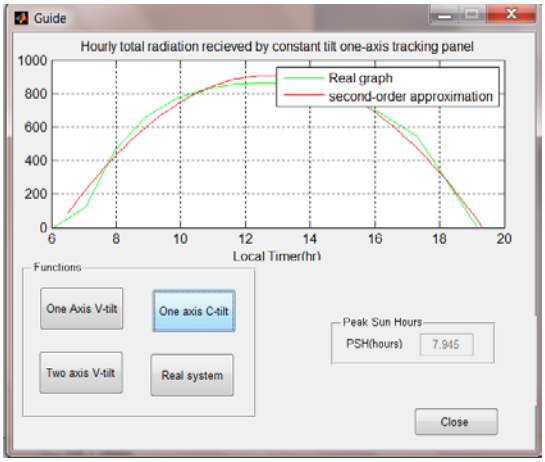
با قرار دادن اطلاعات پژوهشکده در فرمولهای ۱۵ تا ۱۹ میزان تابش در زمان ظهر خورشیدی حاصل میشود که با تغییر *h* به میزان ۱۵ درجه در هر ساعت قادر خواهیم بود نمودار را برای کل روز به کمک فرمولها رسم کنیم. نمودار حاصل از فرمولهای تابش در شکل ۱۲ ملاحظه میشود.



شکل۱۲: نمودار تابش حاصل از فرمول

با معادل کردن یک منحنی درجه ۲ برای هر دو نمودار تابش مشاهده میگردد که مقدار *PSH* در این دو نمودار دارای تفاوت نسبتا زیادی میباشند که هدف اصلی در این بخش اصلاح ضرایب در فرمولها برای نزدیک کردن میزان *PSH* در نمودار ناشی از

فرمولهای تئوری با نتایج عملی میباشد. بنابراین با استفاده از بهینهسازی و توجه به تابع هدف اصلاح ضرایب A,B,C و همچنین ρ در رنجهای قابل قبولی برای این ضرایب صورت می - پذیرد. نمودار ناشی از فرمولهای تئوری پس از اصلاح ضرایب در شکل ۱۳ قابل ملاحظه است که پس از معادل کردن یک تابع درجه دوم و محاسبه سطح زیر نمودار PSH با تقریب خوبی برابر نمونه واقعی خواهد شد. حال با به کارگیری فرمولهای اصلاح شده و محاسبهی PSH برای دیگر روزها و مقایسهی این نتایج با نتایج حاصل از نمونهی عملی این دو مقدار با تقریب خوبی معادل خواهند بود.



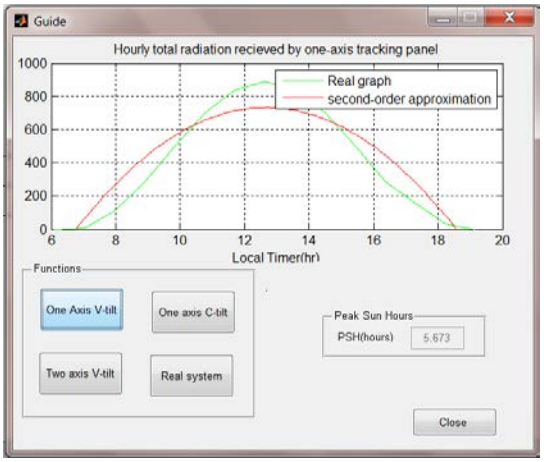
شکل۱۳: نمودار تابش ناشی از فرمولهای تئوری پس از اصلاح ضرایب

با محاسبه سطح زیر نمودار تابش میزان PSH ناشی از نمودار حاصل از دادههای عملی مقداری برابر ۸/۰۵۱، این میزان در نمودار حاصل از فرمولهای محاسبهی تابش پیش از اصلاح ضرایب برابر با ۹/۷۲ و پس از اصلاح ضرایب مقداری معادل با ۷/۹۴۵ خواهد داشت.

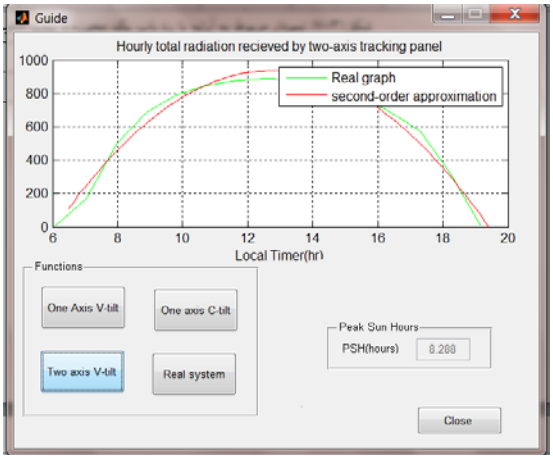
۳.۴. محاسبهی PSHبا استفاده از فرمولهای اصلاح شده در آرایههای دارای ردیاب دو محوره و یک محوره با تیلت متغیر

در این قسمت به نوآوری این مقاله که تعیین PSH برای آرایش - های متفاوت براساس اطلاعات یک آرایش خاص میباشد، پرداخته میشود. حال با به کارگیری ضرایب اصلاح شده در فرمولهای ۲۰ تا ۲۳ مربوط به آرایه با ردیابیک محوره با تیلت متغیر و فرمولهای ۱۱ تا ۱۴ مربوط به آرایه با ردیابدو محوره مقدار PSH را برای این ساختارها بدون داشتن نمونه آزمایشی محاسبه میکنیم که همانطور که ملاحظه میگردد میزان PSH در آرایهی دارای ردیاب دو محوره دارای بیشترین مقدار و بعد از آن آرایه دارای ردیاب یک محوره با تیلت ثابت و سپس آرایه دارای ردیاب یک محوره با تیلت متغیر به ترتیب در رده های بعدی خواهند بود.

در شکلهای ۱۴ و ۱۵ به ترتیب نمودارهای مربوط به آرایه با ردیاب یک محوره با تیلت متغیر و آرایه دارای رد یاب دو محوره به همراه نمودارهای درجه دوم تقریب زده شده روی آنها ملاحظه میشود:



شکل۱۴: نمودار مربوط به آرایه با رد یاب یک محوره با تیلت متغیر



شکل۱۵: نمودار مربوط به آرایه دارایردیاب دو محوره

آرایه با ردیاب یک محوره با تیلت متغیر دارای PSH ای برابر با ۵/۶۷۳ و آرایه با ردیاب دو محوره دارای PSH ای برابر با ۸/۲۸۸

خواهد بود.

۵. نتیجه‌گیری

به کمک نتایج این مقاله میتوان با استفاده از اطلاعات یک سلول با یک آرایش خاص در یک منطقه به محاسبهی ساعات آفتابی برای سایر آرایشهای سلول در همان منطقه پرداخت. این امر با اصلاح ضرایب فرمولهای موجود جهت محاسبهی تابش خورشید امکانپذیر است. در نتیجه پیش از نصب سلول خورشیدی در یک منطقهی خاص میتوان مناسبترین آرایش سلول از لحاظ ماکزیمم ساعات آفتابی و صرفهی اقتصادی را پیشبینی نمود. در روش ارائه شده در این مقاله بدون نیاز به نصب تجهیزات گران - قیمت و تنها با استفاده از اطلاعات یک ساختار خاص و انجام تصحیحات لازم بر روی روابط ریاضی به تعیین PSH در ساختارهای متفاوت پرداخته شده است.

منابع

[1] Roger A.Messenger, Jerry ventre,"photovoltaic system engineering", third edition, taylor and francis, 2010
[2] Gilbert M. Masters," Renewable and Efficient Electric Power Systems", A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2004
[3] A.A. El-Sebaii, F.S. Al-Hazmi, A.A. Al-Ghamdi, S.J. Yaghmour," Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia" Applied Energy vol 87 , 2010, pp 568–576
[4] Ying-Pin Chang," Optimal the tilt angles for photovoltaic modules in Taiwan" Electrical Power and Energy Systems vol 32 ,2010,pp 956–964
[5]HohmDP ,Ropp ME. "Comparative study of maximum power point tracking algorithms". Progress in Photovoltaics: Research andApplication; 2003
[6]Salas V, Olias E, Barrado A, Lazaro "A Review of th e maximum power point t racking algorithms for stand-alone photovoltaic systems". Solar Energy Materials & Solar Cells; 2006
[7]Houssamo I, Lo cment F, Sechilariu M. Maximum power tracking fo r photovoltaic power sy stem: "development and experimentalcomparison of two algorithms". Renewable Energy ; 2010
[8] A. Reisi, M.Moradi, S,Jamasb,"Classification and comparsion of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review" Elsevier Vol 19, 2013, pp 433-443