طراحی متمرکزکننده خورشیدی به منظور افزایش شدت تابش بر صفحه فتوولتائیک

یاسمن امانلو[۱]*، تیمور توکلی هشجین[۱]، برات قبادیان[۳]، غلامحسن نجفی[۴]

۱- دانشجوی دکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی، گروه بیوسیستم دانشگاه تربیت مدرس y.amanlou@yahoo.ie
۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم،دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس
۴- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم،دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

برای افزایش بازده الکتریکی صفحات فتوولتائیک باید شدت تابش خورشید را به صورت یکنواخت بر روی آن‌ها افزایش داد. تا کنون تحقیقات متعددی بر روی متمرکزکننده‌های خورشیدی برای متمرکز نمودن نور خورشید در یک نقطه یا خط صورت گرفته است؛ با این وجود متمرکز نمودن نور خورشید به صورت یکنواخت بر روی یک صفحه موضوعی است که کمتر به آن پرداخته شده است. در مطالعه حاضر متمرکزکننده‌های گوناگون برای متمرکز نمودن نور بر روی یک صفحه طراحی شده و با شبیه‌سازی اپتیکی مورد ارزیابی قرارگرفتند. متمرکزکننده‌های مورد بررسی عبارتند از: منعکس‌کننده تخت، سهموی، استوانه‌ای و فرسنل خطی. نتایج حاکی از آن است که یکنواخت‌ترین الگوی تابش مربوط به آینه تخت می‌باشد اما شدت تابش را به صورت محدود افزایش می‌دهند. متمرکزکننده سهموی گزینه مناسبی برای متمرکز کردن نور بر صفحه نمی‌باشد. با توجه به پارامترهای طراحی، متمرکزکننده‌های استوانه‌ای و فرسنل خطی، یکنواختی و شدت تابش مناسبی را فراهم می‌نمایند.

واژگان کلیدی: طراحی اپتیکی،شبیه‌سازی، ضریب تمرکز هندسی،منعکس‌کننده فرسنل خطی.

مقدمه

نیمه‌رساناها ظرفیت جذب نور خورشید و تبدیل بخشی از انرژی فوتون‌های جذب شده را به جریان الکتریکی دارند. سلول خورشیدی یک دیود نیمه رسانای ساده است که به دقت طراحی و ساخته شده است تا انرژی نور خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل نماید (Luque and Hegedus, 2003). سلول‌های خورشیدی علاوه بر داشتن مزایایی چون تامین انرژی پاک، عمر کاری بالا، سازگاری با اقلیم‌های مختلف و عدم نیاز به نگهداری و شبکه توزیع برق، متاسفانه هزینه‌ی بالایی دارند. بالا بودن هزینه اولیه سلول-های خورشیدی موجب عدم تمایل کشاورزان در استفاده از این فناوری گشته است(GargandPrakash, 2000).

برای افزایش صرفه اقتصادی سامانه‌های فتوولتائیک باید به دنبال راه‌کارهایی برای کاهش قیمت به ازای توان الکتریکی دریافتی از آن‌ها بود. یکی از موثرترین قدم‌ها در این زمینه افزایش شدت تابش خورشید بر سطح مشخصی از سلول‌های خورشیدی می‌باشد تا به این طریق بازده الکتریکی سامانه افزایش یابد. ترکیب سلول‌های فتوولتائیک و متمرکزکننده‌های خورشیدی باعث افزایش بهره‌وری در تولید الکتریسیته می‌شود. محققان افزایش بازده به این روش را تا ۴۱ درصد (در نوع خاصی از سلول‌های خورشیدی) گزارش نمودند (Green, *et al.*2009). توانایی بالقوه سیستم‌های ترکیبی در افزایش بهره‌وری می‌تواند باعث کاهش قیمت ژنراتورهای خورشیدی در آینده شود (Kerzmann and Schaefer, 2012).متاسفانه با افزایش نسبت تمرکز، روند کاهش بازده به دلیل افزایش گرمای سلول‌های فتوولتائیک بیشتر می‌شود بنابراین بهره‌وری و بازده بیشتر با به کارگیری سیستم‌های خنک کننده امکان‌پذیر است.

متمرکز کردن نور خورشید بر روی سلول‌های فتوولتائیک و استفاده از لنزها و آینه‌های نسبتا ارزان به جای گسترش سطح سلول‌های فتوولتائیک، روشی است که با استفاده از آن می‌توان برق خورشیدی ارزان‌تری تهیه کرد به شرطی که گرمای ایجاد شده در سلول خورشیدی به روش مناسب از آن دفع شود.

برای متمرکز نمودن نور خورشید در تحقیقات گذشته از روش‌های متعددی بهره گرفته شده است. از مهم‌ترین انواع متمرکزکننده می‌توان به متمرکزکننده‌های تخت، سهموی، استوانه‌ای و فرسنل[1] اشاره نمود. متمرکزکننده‌های متداول برای متمرکز نمودن نور خورشید بر یک نقطه (نقطه کانونی) و یا یک خط (محور کانونی) به کار گرفته می‌شوند اما در تحقیق حاضر به متمرکز کننده‌ای نیاز است که بتواند سطح پانل خورشیدی را به صورت یکنواخت مورد تابش قرار بدهد. عدم تابش یکنواخت نور خورشید بر پانل فتوولتائیک موجب اختلاف دما در سلول‌های مختلف در قسمت‌های مختلف پانل می‌گردد. از آنجا که ولتاژ تولید شده در هر سلول وابسته به دمای آن سلول می‌باشد از این رو سلول‌ها ولتاژهای متفاوت خواهند داشت. ولتاژ کل پانل خورشیدی به کمترین ولتاژ سلولی محدود می‌گردد بنابراین عدم یکنواختی تابش نور بر قسمت‌های مختلف پانل موجب کاهش بازده الکتریکی می‌شود (Royne et al. 2007).

با توجه به مقدمه ذکر شده مشخص می‌گردد که برای متمرکز نمودن نور خورشید بر پانل فتوولتائیک به طرح خاصی از متمرکزکننده نیاز است که بر خلاف متمرکزکننده‌های متداول که نور را بر یک نقطه یا یک خط متمرکز می‌کنند، قادر به متمرکز نمودن نور خورشید به صورت یکنواخت بر یک صفحه (سطح پانل فتوولتائیک) باشد. به منظور نیل به این هدف تغییراتی در طراحی متمرکزکننده‌های متداول (تخت، سهموی، استوانه‌ای و فرسنل) ایجاد شده و نتایج این تغییرات بر شدت تابش و توزیع تابش مورد بررسی قرار گرفته است.

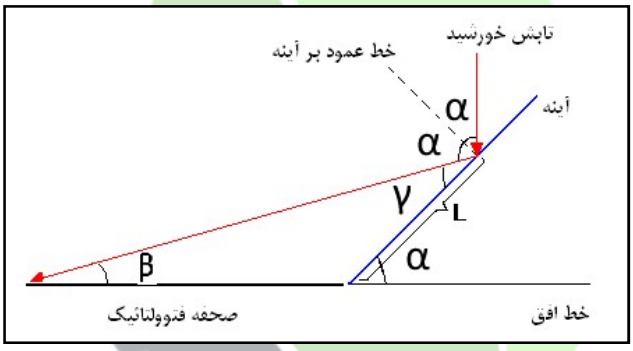
[1] Fresnel

تئوری تحقیق

متمرکزکننده تخت

استفاده از متمرکزکننده تخت ساده‌ترین روش برای متمرکز نمودن نور خورشید می‌باشد(Daffie& Beckman; 1991). در این روش از یک آینه تخت برای منعکس کردن نور خورشید بر یک صفحه استفاده می‌شود. طرح ساده‌ای از این نوع متمرکزکننده در شکل ۱ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱ زاویه آینه با افق (α) است. طول آینه بستگی به زاویه α دارد. طول مفید آینه (L) برابر با طولی از آینه است که قادر است آخرین باریکه نور را به منتها الیه صفحه فتوولتائیک بتاباند. در شکل ۱ آخرین باریکه نور و طول مفید L نشان داده شده است. با استفاده از روابط مثلثاتی زیر می‌توان طول مفید آینه را بدست آورد:



شکل ۱. متمرکزکننده تخت.

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \alpha \qquad (۱)$$

$$\beta = \pi - (\pi - \alpha) - \gamma = \alpha - \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = 2\alpha - \frac{\pi}{2} \qquad (۲)$$

$$\frac{\sin\beta}{L} = \frac{\sin\gamma}{A} \qquad (۳)$$

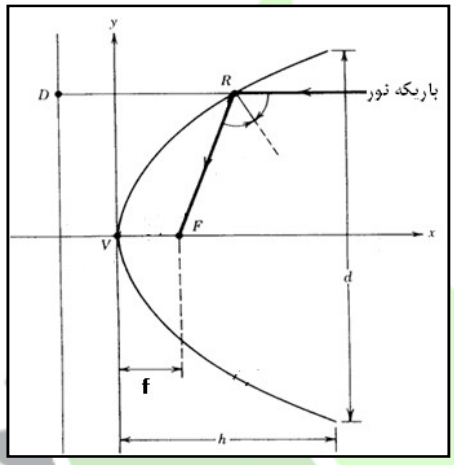
$$L = A\frac{\sin\beta}{\sin\gamma} = A\frac{\sin(2\alpha - \frac{\pi}{2})}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha)} \qquad (۴)$$

A در معادله ۳ و ۴ نشان دهنده عرض صفحه فتوولتائیک است که در تحقیق حاضر برابر با ۸۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

ضریب تمرکز هندسی برای تمام متمرکزکننده از تقسیم مساحت دهانه متمرکز کننده به مساحت جمع‌کننده بدست می‌آید.

متمرکزکننده سهموی

متمرکزکننده‌های سهموی ساده و مرکب یکی از پرکاربرد ترین انواع متمرکزکننده‌ها در طراحی گرمایش خورشیدی می‌باشند. شکل ۲ نشان دهنده این نوع متمرکزکننده می‌باشد.



شکل ۲.متمرکزکننده سهموی.

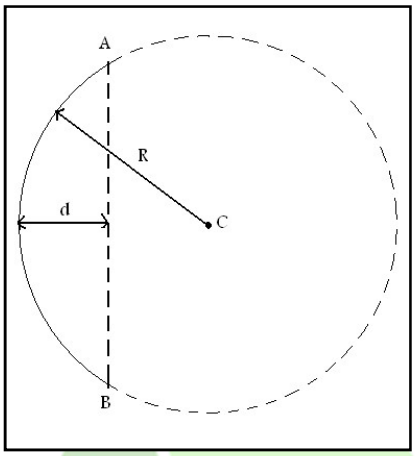
در شکل ۲ ،F وV به ترتیب نشان دهنده کانون و راس سهمی می‌باشد. فاصله کانونی و عمق سهمی با حروف f و h مشخص شده‌اند. منحنی سهمی از رابطه ۵ بدست می‌آید.

$$y^2 = 4fx \qquad (۵)$$

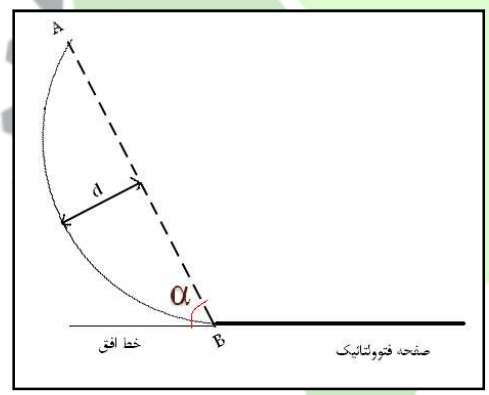
همانطور که معادله ۵ نشان می‌دهد تنها عاملی که در طراحی منحنی سهمی دخیل است، فاصله کانونی می‌باشد.

متمرکزکننده استوانه‌ای

این متمرکزکننده بخشی از یک استوانه است که از به صورت طولی برش خورده به نحوی که سطح مقطع آن قطاعی از دایره مولد استوانه است. مقطع عرضی متمرکزکننده استوانه‌ای در شکل ۳ نشان داده شده است. عواملی که در طراحی متمرکزکننده استوانه-



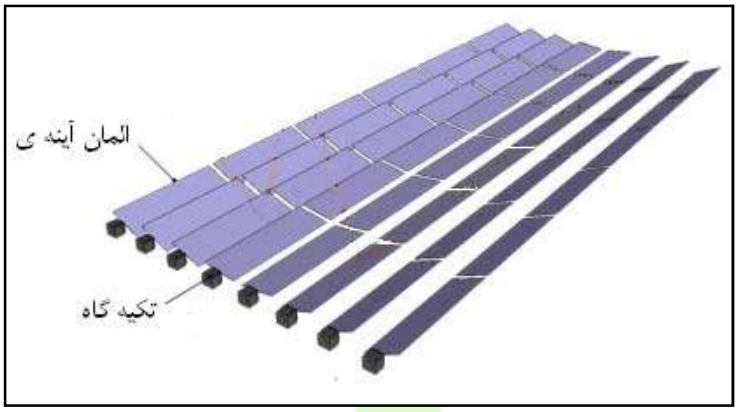
شکل۲. متمرکزکننده استوانه‌ای



شکل۳. تعریف زاویه متمرکز کننده استوانه‌ای

متمرکزکننده فرسنل خطی

منعکس‌کننده فرسنل خطی به مجموعه‌ای از المان‌های آینه‌ای باریک با محور موازی اتلاق می‌شود که زاویه هرکام به صورت جداگاه قابل تنظیم است (شکل ۵).



شکل۴. متمرکزکننده فرسنل خطی

مزیت عمده متمرکزکننده‌های فرسنل این است که دارای ساختار ساده‌ای هستند بنابراین ساخت و اجرای آن‌ها آسان‌تر از انواع دیگر متمرکزکننده‌های انعکاسی است. محاسبات مربوط به زاویه هر آینه مشابه معادلات ۱ تا ۴ می‌باشد با این تفاوت که در این روش طول آینه‌ها مشخص است و باید زاویه درست قرار گیری آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

در مطالعه حاضر از نرم‌افزار TracePro برای شبیه‌سازی اپتیکی متمرکزکننده‌ها بهره گرفته شد. در مقالات متعددی به این نرم-افزار به عنوان یک نرم افزار کارآمد اشاره شده است. این نرم‌افزار قادر است گذردهی، شکست و انعکاس نور را در محیط‌ها و مواد گوناگون شبیه‌سازی نماید و همچنین امکان مدل‌سازی قطعات و اجزای مختلف در آن تعبیه شده است. در شبیه‌سازی تمامی حالت‌ها، نور خورشید با شار ۱۱۰۰(W/m^2) به صورت عمود بر صفحه فتوولتائیک به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است.

نتایج

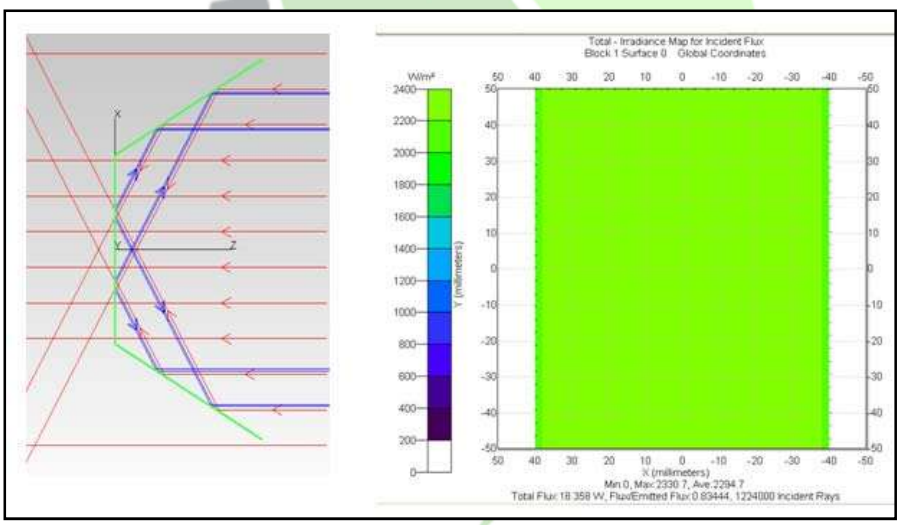
متمرکزکننده تخت

با استفاده از رابطه ۴، طول مفید آینه و همچنین ضریب تمرکز برای زوایای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه حساب شده (با فرض عمود بودن تابش خورشید بر سطح پانل) در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

جدول۱. طول مفید آینه و ضریب تمرکز برای زوایای مختلف در متمرکز کننده تخت

زاویه α (درجه)	طول مفید آینه (cm)	ضریب تمرکز
۵۰	۲۲	۱/۳۵
۶۰	۸۰	۲
۷۰	۱۸۰	۲/۵۳
۸۰	۴۳۳	۲/۸۹

جدول ۱ نشان می‌دهد که با افزایش زاویه آینه‌ی تخت با خط افق، ضریب تمرکز افزایش می‌یابد هر چند که ضریب تمرکز با استفاده به بیش از ۳ نخواهد رسید. طول مفید آینه با افزایش زاویه افزایش می‌یابد که این بدان معنا است که برای بدست آوردن ضریب تمرکز ۲/۸ بر روی صفحه‌ی با عرض ۸۰ سانتی‌متر به آینه‌ی با عرض ۴ متر نیاز داریم. این عامل افزایش هزینه ساخت در قبال افزایش ضریب تمرکز جزئی را نشان می‌دهد. به دلیل کم بودن ضریب تمرکز (کمتر از ۱۰) استفاده از سیستم رد یاب خورشیدی در این نوع از متمرکزکننده توجیه‌پذیر نیست (Duffie andBecman, 1991).

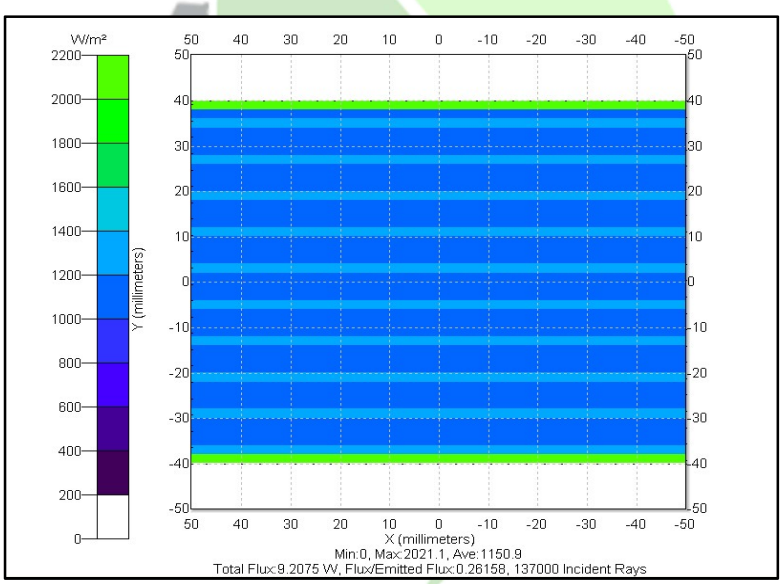


شکل۵. شبیه‌سازی اپتیکی متمرکزکننده تخت در زاویه ۶۰ درجه

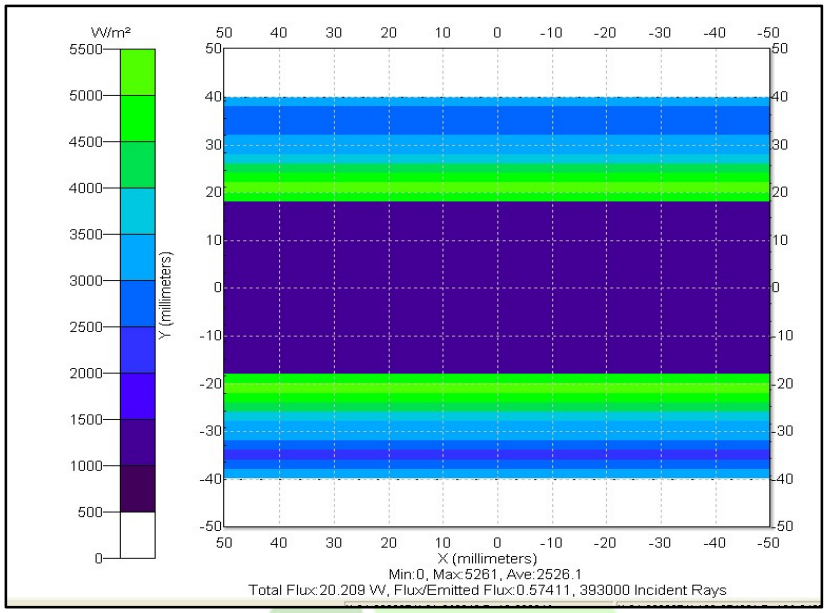
نتایج شبیه سازی اپتیکی حاکی از آن بود که یکنواخت‌ترین الگوی تابش مربوط به زاویه ۶۰ درجه می‌باشد که در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است. در سایر زوایا به دلیل انکسار نور در هنگام عبور از لایه شیشه‌ای محفظ صفحه فتوولتائیک از یکنواختی کمتری برخوردار بوده است.

متمرکزکننده سهموی

همانطور که از معادله ۵ مشخص می‌گردد، مهم‌ترین و موثرترین پارامتر در شکل هندسی متمرکزکننده سهموی، فاصله کانونی آن می‌باشد. به ازای یک مشخص (h ثابت) با افزایش فاصله کانونی، دهانه سهمی گشوده‌تر می‌گردد. از آنجا که ضریب تمرکز از تقسیم مساحت دهانه به مساحت جمع‌کننده حاصل می‌شود بنابراین با افزایش فاصله کانونی ضریب تمرکز نیز افزایش می‌یابد. با تغییر فاصله کانونی و عمق الگوهای مختلف تابش اتفاق افتد. به عنوان نمونه دو حالت از حالت‌های بررسی شده در تصاویر ۷ و ۸ آورده شده است. در فاصله کانونی ۴۰ سانتی‌متر یکنواختی تابش بهتر از حالتی است که فاصله کانونی ۳۰ سانتی‌متر است. در فاصله کانونی ۴۰ سانتی‌متر ضریب تمرکز هندسی برابر با ۴ است اما همانطور که شکل ۷ نشان می‌دهد بیشینه تابش ۲۰۲۱ و میانگین آن ۱۱۵۰ (W/m^2) است. این ارقام نشان می‌دهند که در عمل متمرکزکننده سهموی نتوانسته است شدت تابش را به اندازه ضریب تمرکز تئوری افزایش بدهد. با کوچک کردن فاصله کانونی از ۴۰ به ۳۰ سانتی‌متر بیشینه تابش تا ۵۲۶۱ (W/m^2) افزایش می‌یابد اما یکنواختی تابش بر صحفه فتوولتائیک به شدت کاهش می‌یابد(شکل ۸).



شکل۶. شبیه‌سازی اپتیکی متمرکزکننده سهموی با فاصله کنونی ۴۰ و عمق ۱۶۰سانتی‌متر



شکل۷. شبیه‌سازی اپتیکی متمرکزکننده سهموی با فاصله کنونی ۳۰ و عمق ۱۶۰سانتی‌متر

به طور کلی با بررسی حالت‌های بیشتر مشخص گردید که افزایش فاصله کانونی باعث افزایش یکنواختی و کاهش مقدار تابش دریافت شده توسط صحفه فتوولتائیک می‌شود. همچنین کاهش فاصله کانونی ضریب تمرکز تئوری را کاهش می‌دهد و یکنواختی کاهش می‌یابد. با توجه به این نتایج متمرکزکننده سهموی با این که برای متمرکز نمودن نور خورشید بر یک خط یا نقطه گزینه مناسبی است اما برای کاربرد حاضر کارایی لازم را ندارد.

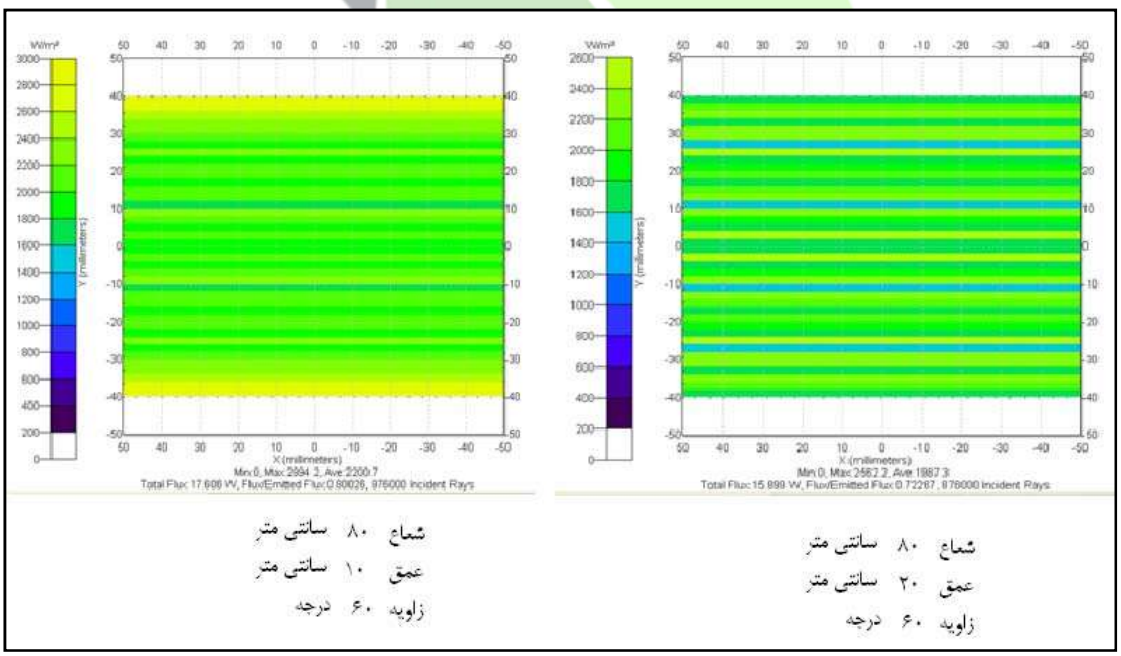
متمرکزکننده استوانه‌ای

تاثیر سه پارامتر شعاع، عمق و زاویه بر شدت تابش و الگوی تابش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییر زاویه بر دو خصیصه بیشینه تابش و الگوی تابش تاثیر به سزایی دارد. به عنوان مثال برای حالتی که شعاع ۶۰ و عمق ۲۰سانتی‌متر باشد، با افزایش زاویه بین ۳۰ تا ۷۰ درجه مشاهده می‌شود که در زاویه ۶۰ درجه در مقایسه با سایر زوایا، هم شدت تابش بیشینه بیشتر است و هم الگوی تابش یکنواخت‌تر می‌باشد (جدول ۲).

جدول ۱. تاثیر زاویه بر شدت تابش در متمرکزکننده استوانه‌ای

شعاع (cm)	عمق(cm)	زاویه (درجه)	بیشینه تابش (W/m^2)	میانگین تابش (W/m^2)
۱۶۰	۲۰	۳۰	۱۸۸۲	۱۳۶۷
۱۶۰	۲۰	۴۵	۲۴۹۲	۲۰۲۱
۱۶۰	۲۰	۶۰	۴۲۷۸	۳۱۹۹
۱۶۰	۲۰	۷۰	۴۰۲۴	۳۰۸۷

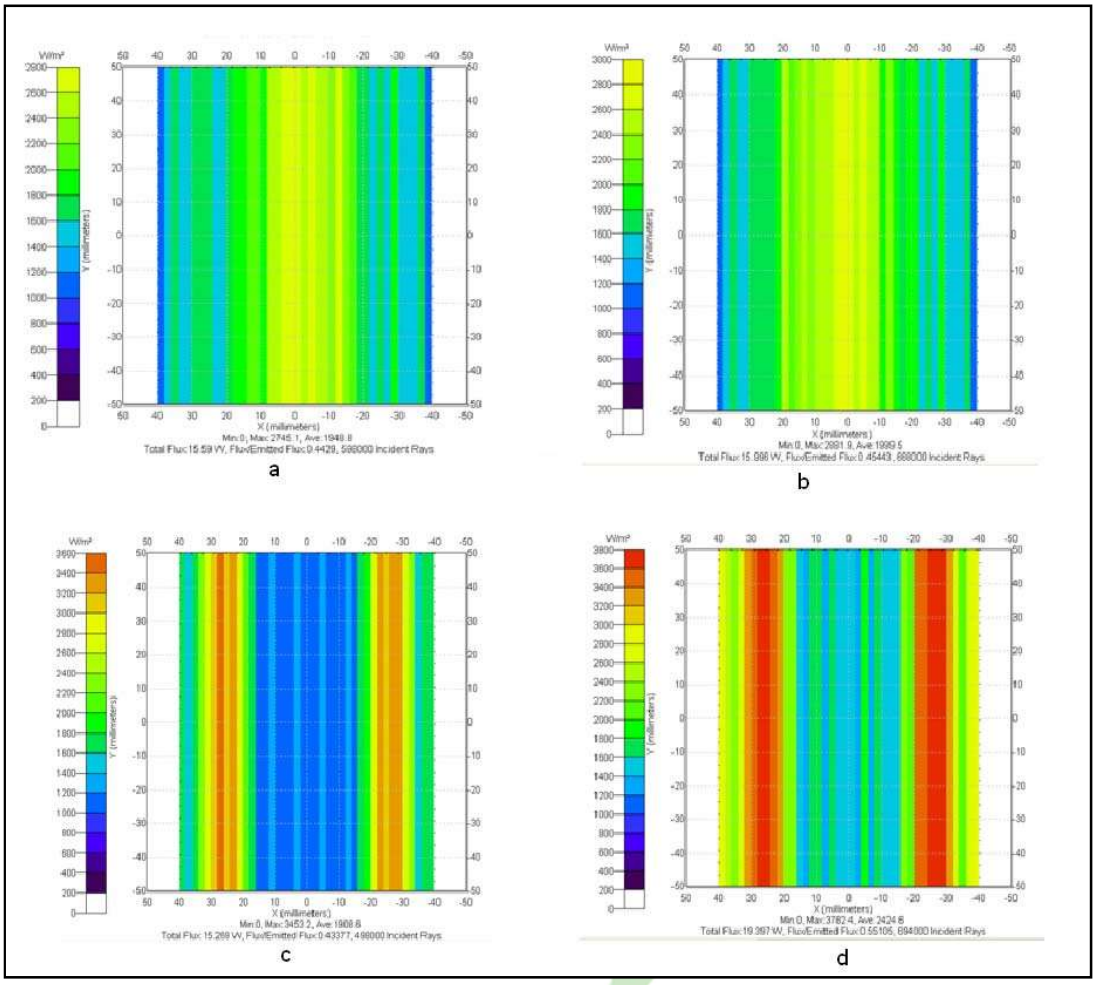
همچنان شبیه‌سازی اپتیکی به منظور بررسی اثر تغییر دو پارامتر عمق و شعاع صورت گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش شعاع و کاهش عمق، یکنواختی تابش بیشتر می‌شود. در این حالت (افزایش شعاع و کاهش عمق) به دلیل نزدیک شدن شکل متمرکز کننده به آینه‌ی تخت، یکنواختی بهبود می‌یابد اما شدت تابش نسبت به شعاع کوچکتر، کاهش می‌یابد (شکل ۹).



شکل۸. شبیه‌سازی اپتیکی متمرکزکننده استوانه‌ای

متمرکزکننده فرسنل خطی

در مطالعه حاضر تاثیر پهنا و تعداد آینه‌های موازی (مجموع آینه‌های فرسنل) بر شدت والگوی تابش بررسی شد. در شکل ۱۰ نتیجه شبیه سازی چهار حالت مختلف مشاهده می‌شود.



شکل۹. شبیه‌سازی اپتیکی متمرکزکننده فرسنل خطی، a) دو جفت آینه تخت با پهنای ۴۰ سانتی‌متر، b) سه جفت آینه تخت با پهنای ۴۰ سانتی‌متر، C) چهارجفت آینه تخت با پهنای ۲۰ سانتی‌متر و d) شش جفت آینه تخت با پهنای ۲۰ سانتی‌متر،

مشاهده می‌شود که افزایش تعداد آینه‌ها و کاهش پهنای هر آینه باعث افزایش شدت تابش می‌گردد. همچنین با افزایش بیشینه شدت تابش عدم یکنواختی نیز بیشتر می‌شود. در حالت کلیبا کاهش تعداد آینه‌ها و افزایش پهنای آن‌ها یکنواختی تابش بیشتر شده و الگوی تابش مشابه الگوی تابش متمرکزکننده تخت می‌گردد.بالعکسبا کاهش پهنای آینه‌ها و افزایش تعداد آن‌ها، الگو تابش مشابه الگوی تابش متمرکزکننده استوانه‌ای می‌شود اما عدم یکنواختی با استفاده از آینه‌های فرسنل خطی ملایم‌تر از متمرکزکننده استوانه‌ای می‌باشد.

نتیجه‌گیری

با در نظر گرفتن خروجی شبیه‌سازی اپتیکی چهار نوع متمرکزکننده تخت، سهموی، استوانه‌ای و فرسنل خطی نتایج کلی زیر بدست می‌آید:

۱. متمرکزکننده تخت در زاویه ۶۰ درجه یکنواخت‌ترین الگوی تابش را بر صفحه فتوولتائیک با ضریب تمرکز هندسی ۲ ایجاد می‌نماید. ضریب تمرکز پایین (کمتر از ۳) در متمرکزکننده تخت موجب عدم کارایی مناسب این متمرکزکننده برای اغلب سازه‌های خورشیدی می‌باشد.

۲. متمرکزکننده سهموی با وجود این که بیشینه شدت تابش را افزایش می‌دهد اما الگوی تابش غیر یکنواخت دارد که این امر با کاهش فاصله کانونی تشدید می‌گردد؛ بنابراین متمرکزکننده سهموی برای متمرکز کردن نور خورشید به صورت یکنواخت بر یک صفحه گزینه مناسبی نمی‌باشد.

۳. متمرکزکننده استوانه‌ای با افزایش شعاع و کاهش عمق الگوی تابش یکنواختی را ایجاد می‌نماید. همچنین افزایش عمق می‌تواند بیشینه تابش را بر روی صفحه افزایش بدهد. با تغییر پارامتر شعاع، عمق و زاویه می‌توان به طراحی مناسبی دست یافت.

۴. متمرکزکننده فرسنل خطی با تعداد آینه‌های موازی بیشتر و پهنای کم آینه‌ها رفتاری مشابه متمرکزکننده استوانه-ای ارائه می‌دهد. در انتخاب بین متمرکزکننده‌ی استوانه‌ای و فرسنل، روش ساخت آسان‌تر و کم هزینه‌تر تعیین کننده است.

منابع

1. Duffie, J. A., and W.A. Becman. 1991. Solar Engineering of Thermal Processes.John Wiley & Sons, Ltd.Pages323-370.

2. Garg, H. P., and J. Prakash. 2002. Solar Energy: Fundamentals and Applications. Tata McGraw-Hill Education.Pages 370-388.
3. Green M.A, K. Emery, Y. Hishikawa, and W. Warta. 2009. Solar cell efficiency tables (version 34), progress in photovoltaics.Reserach and Applications; 17(5): 320-326.
4. Kerzmann,T., and L.Schaefer. 2012. System simulation of a linear concentrating photovoltaic system with an active cooling system. Renewable energy, 41:254-261.
5. Luque, A., and S. Hegedus. 2003. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering.John Wiley & Sons, Ltd. Pages 184-195.
6. Royne, A., and C.J.Dey. 2007. Design of a jet impingement cooling device for densely packed PV cells under high concentration. Solar Energy. 81: 1014-1024.

Design of SolarConcentratorto Increase theIntensityofSolar Irradiation on Photovoltaic Panel

Yasaman Amanlou[1*] TeymourTavakoli Hashjin[2] Barat Ghobadian[3] and GholamhasamNajafi[4]

1- PhD Student, Department of Biosystems Engineering,TarbiatModares University. y.amanlou@yahoo.ie
2- Professor,Department of Biosystems Engineering,TarbiatModares University
3- Associate Professor,Department of Biosystems Engineering,TarbiatModares University
4- Assistant Professor,Department of Biosystems Engineering,TarbiatModares University

Abstract

To increase theelectricalefficiencyofphotovoltaicpanelsshouldbeconcentrated intensity ofsolarradiationuniformly.So far, several studies have been conducted on conventional concentrators; however, concentrating sunlight onto a flat plate uniformly is an issue that is interested rarely. In this study, different form of concentrators have been designed and evaluated by optical simulation. Studied types of concentrators are: flat plate, parabolic, cylindrical and linear Fresnel reflectors. Results show that flat mirror make the most uniform pattern of solar intensity; but its concentration ratio is low. Parabolic reflector is not appropriate type for concentrating on flat plate. Forasmuch as design parameters, cylindrical and linear Fresnel reflectors could prepare suitable uniformity and intensity of solar irradiation.

Keywords: Optical design, simulation, Geometrical concentration ratio, Linear Fresnel reflector.