

## آنالیز میزان کاهش دمای پنل های فتوولتائیک با استفاده از پلیمرهای شفاف به روش خنک سازی تابشی

**چکیده:** دانشمندان همواره بر کاهش دمای سلول های خورشیدی تأکید داشته و از روش های گوناگون با هدف کاهش دمای پنل های خورشیدی بهره گرفته اند، چرا که دمای بالا موجب خرابی و ایرادات متنوع و متعدد در ساختار پنل های فتوولتائیک می شود. از تحقیقات مؤثر و مهمی که بر روی سلول های خورشیدی با هدف کاهش دما و افزایش بازدهی آنها انجام شده است می توان به روش خنک سازی تشعشعی اشاره کرد که این تحقیقات نشان می دهد سلول فتوولتائیک پوشش دهی شده با لایه بندی شفاف نسبت به سلول خورشیدی عاری از هرگونه لایه اضافی دارای بازدهی بیشتری است. در این مطالعه ساختار معمولی (تجاری) سلول خورشیدی از لحاظ اپتیکی و دمایی با ساختارهای پوشش دهی شده مقایسه گردید. این مقایسه نشان داد که ساختارهای پوشش دهی شده بالاتری نسبت ساختار تجاری دارند. در این تحقیق سه ساختار سلول فتوولتائیک را کنار هم قرار داده که این سه ساختار شامل ۱- ساختار تجاری (ساده) ۲- پنل خورشیدی به همراه یک لایه PDMS ۳- پنل خورشیدی به همراه یک لایه PVB هستند. سپس به تحقیقات نرم افزاری و شبیه سازی پیرامون خواص تشعشعی و دمایی این سه ساختار پرداخته و با مقایسه آنها نشان داده شد که در ساختارهای دارای PDMS و PVB دمای لایه بندی بر حسب شدت تابش به ترتیب در حدود ۵ و ۹ کلوین نسبت به ساختار تجاری کاهش می یابد که این نشان از تأثیر خنک سازی تشعشعی مواد پلیمری شفاف بر روی این دو ساختار دارد.

**واژه‌های راهنما:** سلول خورشیدی، خنک سازی تشعشعی، لایه بندی شفاف، انرژی تجدیدپذیر، اپتیک

حسین معظمی‌گودرزی  
دانشجوی دکتری

سعید دیناروند\*  
استادیار

محمد وهابی  
استادیار

آرش میرعبداله لواسانی  
دانشیار،  
گروه مهندسی مکانیک،  
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران  
مرکزی، تهران

مقاله علمی پژوهشی  
دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳  
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵  
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۶

## Analysis of the temperature reduction of photovoltaic panels using transparent polymers by radiation cooling method

**Abstract:** Scientists have always emphasized on reducing the temperature of solar cells and have used various methods with the aim of reducing the temperature of solar panels, because high temperature causes damage and various defects in the structure of photovoltaic panels. Among the effective and important researches that have been carried out on solar cells with the aim of reducing their temperature and increasing their efficiency, we can mention the radiation cooling method, which shows that the photovoltaic cell coated with a transparent layer is better than the bare solar cell. It is more efficient than any additional layer. In this study, the conventional (commercial) structure of the solar cell was compared with the coated structures in terms of optics and temperature. This comparison showed that the coated structures have higher efficiency than the commercial structure. In this research, three solar photovoltaic structures have been put together, which include 1- commercial (simple) structure, 2- solar panel with a PDMS layer, 3- solar panel with a PVB layer. Then to software research and simulation. The radiation and temperature properties of these three structures were discussed and by comparing them, it was shown that in the structures with PDMS and PVB, the layering temperature in terms of radiation intensity is reduced by about 5 and 9 K, respectively, compared to the commercial structure, which is an indication of the effect of cooling. The radiation of transparent polymer materials has on these two structures.

**Keywords:** Solar cell, Radiation cooling, Transparent layering, Renewable energy, Optics

Hussein  
Goodarzi Moazami  
PhD Student

Saeed Dinarvand\*  
Assistant Professor

Mohammad Vahabi  
Assistant Professor

Arash  
Mirabdollah Lavasani  
Associate Professor,  
Department of Mechanical  
Engineering, Islamic Azad  
University, Central Tehran  
Branch, Tehran

## ۱- مقدمه

افزایش راندمان پنل‌های فتوولتائیک همواره مورد توجه محققین و دانشمندان در زمینه انرژی بوده است چرا که پنل‌های خورشیدی دارای بازدهی محدودی هستند [۱]. این مسئله موجب کاهش عمر و فرسودگی تجهیزات نیروگاه‌های خورشیدی می‌گردد [۲]. خرابی و بازسازی نیروگاه‌های خورشیدی بسیار پرهزینه و مشکل می‌باشد به همین دلیل بحث خنک‌سازی سلول‌های خورشیدی و افزایش راندمان آنها از دیرباز تاکنون مورد توجه دانشمندان بوده است [۳]. یکی از روش‌های نو ظهور و نوین کاهش دمای اجسام، روش خنک‌سازی تشعشعی می‌باشد که با بهره‌گیری از خواص اپتیکی و حرارتی متریال گوناگون باعث جذب حداکثری نور خورشید و به تبع آن دفع حداکثری گرمای جسم به بازه شفافیت پنجره نور مرئی می‌شود؛ از این رو دانشمندان زیادی به تحقیق در مورد این مهم پرداخته‌اند [۴]. بدین صورت که دریافتند با بهره‌گیری از روش خنک‌سازی تشعشعی و همچنین با استفاده از مواد نانو می‌توان دمای اجسام را کاهش و زمینه افزایش راندمان تجهیزات را فراهم آورد [۵]. در ادامه تحقیقات پیرامون خنک‌سازی تشعشعی این بار دانشمندان بصورت متمرکز به افزایش باردهی و کاهش دمای سلول‌های فتوولتائیک پرداختند [۶]. با استفاده از ماده پلی دی متیل سیلوکسان و پوشش‌دهی بر روی سلول خورشیدی دریافتند با بکارگیری این روش و مقایسه آن با مدل تجاری معمولی می‌توان به خنک‌سازی تشعشعی رسید و این روش می‌تواند در کاهش دمای سلول فتوولتائیک سودمند باشد [۷]. به‌طور کلی در روش خنک‌سازی تشعشعی با بهره‌بردن از یک یا چند لایه از متریال‌هایی با خواص اپتیکی مطلوب و با پوشش‌دهی آنها بر روی ویفر سیلیکونی ساده با هدف جذب مناسب نور و انتشار آن درمی‌یابیم که دمای سلول خورشیدی کاهش می‌یابد. بطور کلی آزمایشات متعدد و ارزشمندی پیرامون خنک‌سازی سلول فتوولتائیک به روش تشعشعی انجام شده است. از ساختارهای پیچیده‌تری نیز همچون سیلیکون اکسی کربونیتريد با هدف جذب و انتشار حداکثری نور و گرمای خورشید استفاده شده است و تلاش شده تا کاهش دما با نتیجه حداکثری همراه باشد [۸]. در این راستا با هدف توسعه این روش تحقیقات متنوعی بصورت شبیه‌سازی و عددی و اکسپریمنت انجام گردیده از همین رو از اکسید آلومینیوم آندی نانو متخلخل نیز با این هدف استفاده شده [۹]. همچنین دانشمندان از پلی اتیلن گلیکول ترفتالات نیز با توجه به خواص اپتیکی مورد نظر بهره برده‌اند [۱۰]. هر کدام از این تحقیقات موجب کسب نتایج ارزشمند و توسعه فرآیند افزایش بازدهی نیروگاه‌های خورشیدی شده است. در مجموع کلیت تحقیقات پیرامون خنک‌سازی تشعشعی بدین صورت بوده که با استفاده از لایه‌بندی‌های مختلف بر روی ساختار سلول خورشیدی به بررسی خواص اپتیکی آنها با هدف کاهش دما پرداخته شده است بدین صورت که برخی از تحقیقات با استفاده

## ۲- انتخاب متریال و تحلیل فیزیکی

در این طرح اصلی‌ترین تحقیقات شامل خواص اپتیکی پلیمرها و نحوه تشعشعات ورودی و خروجی آنها در بازه شفافیت نور مرئی می‌باشد که تحت معادلات ماکسول شبیه‌سازی می‌شود [۱۶]. معادله انرژی تمامی تشعشعات رفت و برگشتی را آنالیز کرده و در نهایت میزان جذب، بازتاب و عبور نور از سطح لایه‌بندی را محاسبه می‌نماید [۱۷]. عمده مطالعات آزمایشگاهی این طرح بر روی انتخاب و جایگیری متریال‌های مناسب برای تحقق هدف افزایش بازدهی سلول انجام گرفته است [۱۸]. چنانکه با انتخاب ماده پلی وینیل بوتیرال به دلیل شفافیت بالا و خواص اپتیکی مناسب به دنبال عبور حداکثری نور و جذب آن توسط ویفر سیلیکونی هستیم که بعد از آن بتوان با انتشار حداکثری گرما در بازه مرئی پنجره آسمان به خنک‌سازی تشعشعی رسید. سه طرح مختلف برای آزمایش و شبیه‌سازی اپتیکی و حرارتی با هدف مقایسه نتایج و تعیین میزان پیشرفت در نظر داریم. با هدف اعتبارسنجی از صحت روش تحقیق اعم از انتخاب متریال، انتخاب ماژول مناسب در نرم‌افزار و انتخاب دیتاهای ورودی و ... به مطالعه بر روی نمونه تجاری ساده و نمونه موجود در مقاله مرجع نیز می‌پردازیم و با کسب نتایج دلخواه و متناسب با نتایج بدست آمده در مقاله مرجع به مقایسه با نتایج مدل اصلی می‌پردازیم. در شکل نوع متریال و نحوه جایگیری آنان و همچنین ضخامت و مقدار هر کدام از متریال‌ها را می‌توان برای هر سه نمونه (تجاری، مقاله ژائو و مدل اصلی) مشاهده کرد.

در فاز روابط و ازدیدگاه علمی ابتدا به مفهوم خنک‌سازی تشعشعی باید پرداخت و برای ارزیابی اثرات خنک‌سازی تشعشعی لایه‌بندی اصلی را در نظر می‌گیریم و تحلیل را توسط یک مدل ریاضی همانند مطالعات گذشته که تقریباً حالت پایداری است انجام می‌دهیم. شکل لایه‌بندی مورد نظر را نشان می‌دهد و همه تشعشعات ورودی و خروجی لایه‌بندی را نشان می‌دهد. از تحلیل مقدار تغییرات دمایی در جهت افقی به دلیل ناچیز بودن مقدار آن صرف نظر کردیم.

معادله انتشار گرما با توجه به فرضیات بدین صورت خواهد بود.

$$\frac{d}{dz} \left( k \frac{dT}{dz} \right) + \dot{q} = 0 \quad (1)$$

به صورت کلی قدرت خنک‌کنندگی لایه‌بندی مورد نظر از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$P_{net}(T) = P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{amb}) - P_{sun} - P_{cond+conv} \quad (2)$$

اما در سلول خورشیدی حاوی لایه‌بندی مورد نظر ما ابتدا رابطه خنک‌سازی تشعشعی را در سطح بالایی به صورت زیر می‌آوریم.

$$-k \frac{dT}{dz} = P_{rad}(T_{top}) - P_{sky}(T_{amb}) + P_{non-rad}(T_{top} \cdot T_{amb}) \quad (3)$$

و سپس این رابطه را یکبار برای سطح زیرین بصورت زیر تعریف می‌کنیم.

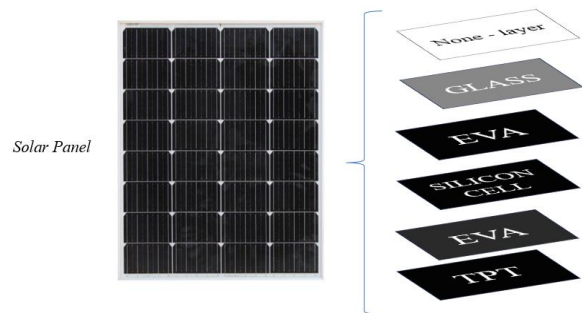
$$k \frac{dT}{dz} = P_{non-rad}(T_{bottom} \cdot T_{amb}) + P_{rad}(T_{bottom} \cdot T_{ground}) \quad (4)$$

### ۳- آماده‌سازی آنالیز نرم‌افزاری

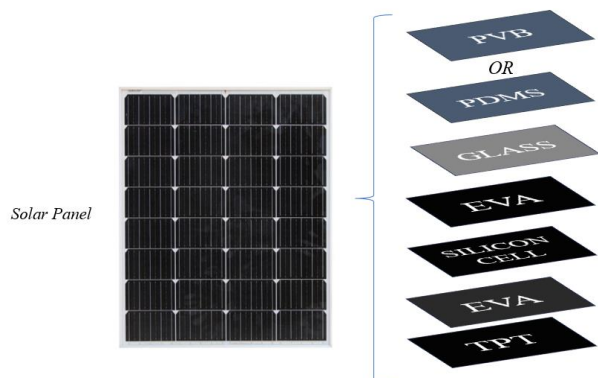
برای مدل‌سازی نمونه‌های سه گانه از نرم‌افزار تحلیلی کامسول به دلیل جامع بودن این پلتفرم از نظر تعداد ماژول‌های مهندسی از جمله ماژول حرارتی و اپتیکی و همچنین کوپل کردن روش‌های حل استفاده کردیم که بطور خلاصه میزان تابش ورودی خورشید را برابر با تابش طیفی خورشید که برگرفته از استاندارد تابش خورشید و استاندارد تابش اتمسفر است قرار دادیم. متریکال‌های ورودی در مدل‌سازی را معادل با نمونه‌های ذکر شده که خواص اپتیکی آنها از جمله ضریب شکست حقیقی و ضریب شکست موهومی وارد نرم‌افزار شده، اما بطور میانگین نیز طبق جدول ضرایب شکست مواد مشخص گردیده است. ابتدا پورت و یا درگاه خروجی را روی ویفر سیلیکونی با هدف بدست آوردن میزان عبور نور قرار داده شده است و پس از استخراج نتایج پورت خروجی با هدف بدست آوردن میزان جذب در زیر پایین‌ترین لایه قرار داده شده است. همچنین بازه طول موج مورد مطالعه برای میزان عبور از ۰/۳ تا ۲/۵ میکرومتر تنظیم گردیده و برای میزان جذب نور با هدف آنالیز دقیق‌تر بازه کوتاه‌تر ۴ تا ۲۵ میکرومتر مورد مطالعه قرار داده شده است.

### ۴- نتایج و بحث پیرامون مقایسه ساختارها

بعد از انجام تمامی ملاحظات شبیه‌سازی نظیر ترسیم هندسه، انتخاب متریکال، وارد کردن ضرایب اپتیکی، تنظیمات ماژول اپتیک و مش‌بندی به ریزالت‌گیری از نرم‌افزار پرداخته‌ایم.



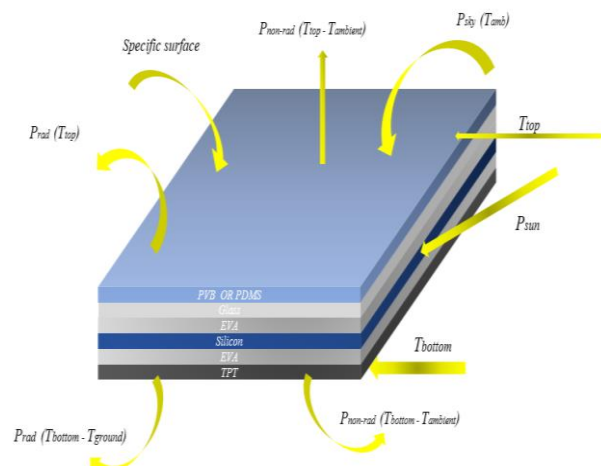
شکل ۱ لایه‌بندی ساده مدل تجاری



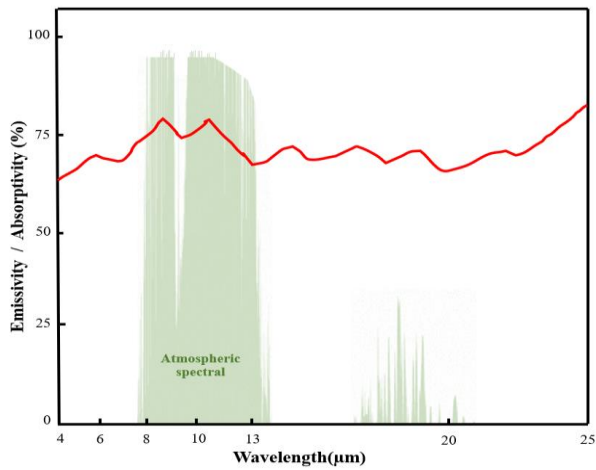
شکل ۲ لایه‌بندی پوشش‌دهی شده با پلیمرهای شفاف

جدول ۱ ضخامت لایه‌های مورد مطالعه

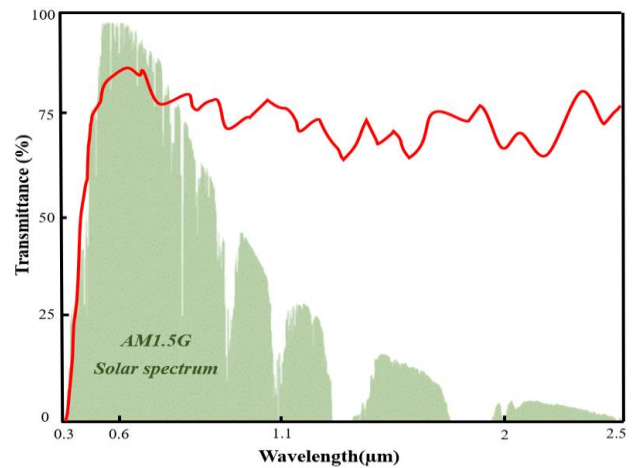
ردیف	متریال (mm)	ضخامت
۱	PVB	۳/۲
۲	PDMS	۰/۲
۳	Silicon cell	۰/۲
۴	EVA	۰/۵
۵	TPT	۰/۱
۶	Glass	۰/۳۸



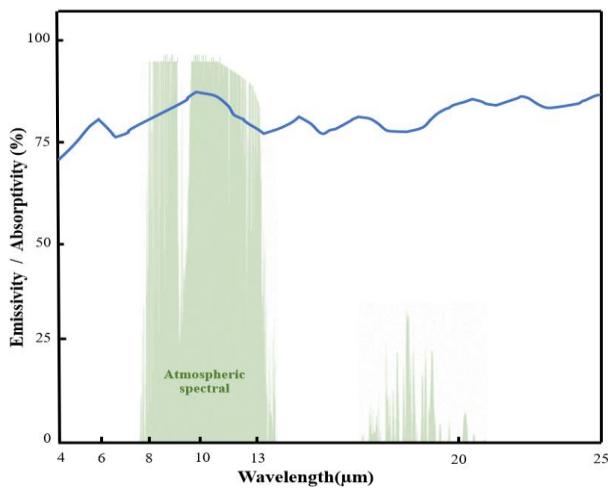
شکل ۳ شماتیک مدل ریاضی حرارتی به صورت تک بعدی



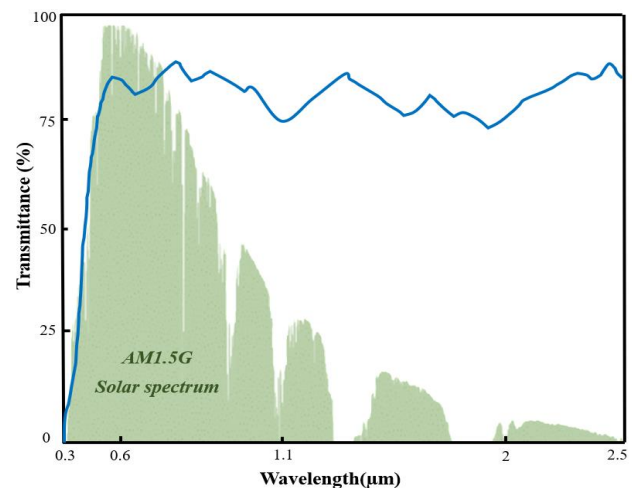
شکل ۷ میزان جذب نور از لایه‌بندی تجاری و ساده سلول خورشیدی که در آن خط قرمز نشان دهنده میزان جذب لایه‌بندی تجاری و نمودار سبز نشان دهنده استاندارد تابش اتمسفر است.



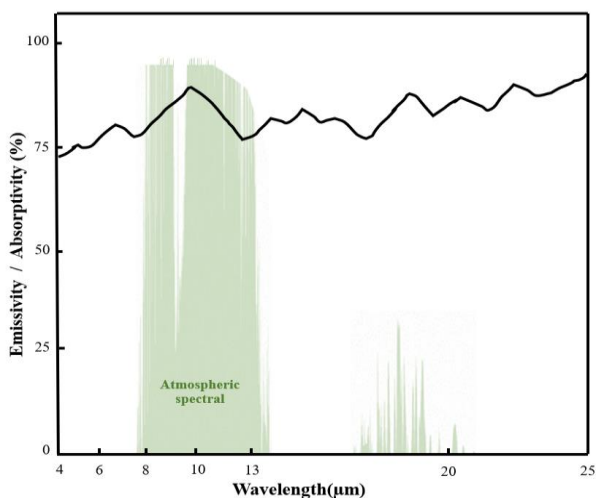
شکل ۴ میزان عبور نور از لایه‌بندی تجاری و ساده سلول خورشیدی که در آن خط قرمز نشان دهنده میزان عبور لایه‌بندی تجاری و نمودار سبز نشان دهنده استاندارد تابش خورشید است.



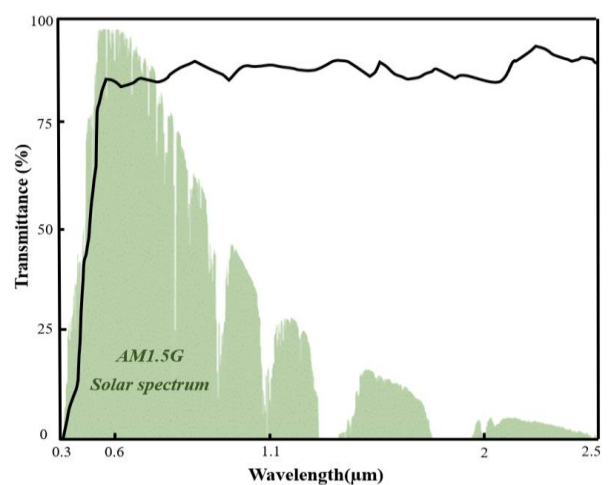
شکل ۸ میزان جذب نور از لایه‌بندی پوشش‌دهی شده با PDMS که در آن خط قرمز نشان دهنده میزان جذب PDMS و نمودار سبز نشان دهنده استاندارد تابش اتمسفر است.



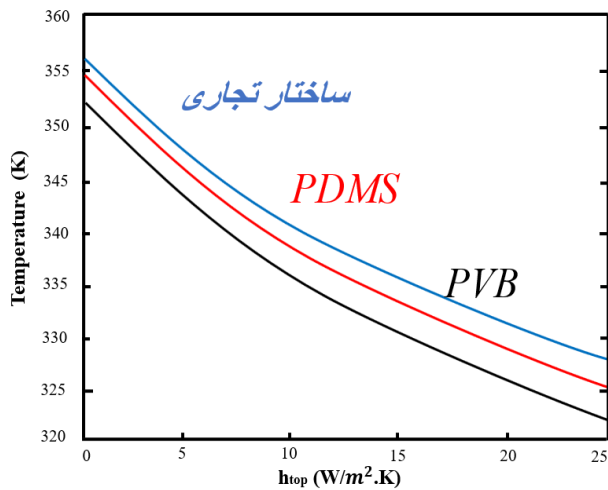
شکل ۵ میزان عبور نور از لایه‌بندی پوشش‌دهی شده با PDMS که در آن خط آبی نشان دهنده میزان عبور PDMS و نمودار سبز نشان دهنده استاندارد تابش خورشید است.



شکل ۹ میزان جذب نور از لایه‌بندی پوشش‌دهی شده با PVB که در آن خط آبی نشان دهنده میزان جذب PVB و نمودار سبز نشان دهنده استاندارد تابش اتمسفر است.



شکل ۶ میزان عبور نور از لایه‌بندی پوشش‌دهی شده با PVB که در آن خط مشکی نشان دهنده میزان عبور PVB و نمودار سبز نشان دهنده استاندارد تابش خورشید است.



شکل ۱۱ نمودار بازدهی دمایی هر سه ساختار برحسب انتقال حرارت سطح بالایی

نتایج دمایی سطح هر سه ساختار که در شکل (۱۱) نمایان است نشان از برتری ساختار دارای پلی وینیل بوتیرال دارد؛ چرا که زمانیکه دمایی سطح بالایی هر سه ساختار به  $25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  می‌رسد دمایی ساختار حاوی پلی وینیل بوتیرال به ترتیب در حدود ۲ و ۵ کلوین از دمایی ساختارهای حاوی پلی دی متیل سیلوکسان و ساختار تجاری کمتر است که این خود نشان از برتری ماده پلی وینیل بوتیرال در امر خنک‌سازی تشعشعی دارد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

بطور کلی نتایج نشان داد بهره‌گیری از پلیمرهای شفاف و پوشش‌دهی آنها بر روی سطح پنل‌های خورشیدی می‌تواند دمایی ساختار را در حالتی که شدت تابش در نهایت میزان خود قرار دارد حدود ۵ کلوین کاهش دهد که این ایده دستاورد مطلوبی را در صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر به ارمغان می‌آورد. پس از اتمام شبیه‌سازی‌ها و مقایسه نتایج دریافتیم در ساختار سلول خورشیدی به همراه لایه پلی وینیل بوتیرال میزان جذب مقداری افزایش داشته که این میزان جذب بیشتر رابطه مستقیمی با میزان انتشار گرما به آسمان و در نتیجه خنک‌سازی هرچه بیشتر سلول خورشیدی این ساختار نسبت به ساختار تجاری آن دارد. همچنین مقایسه میزان عبور نور در هر سه ساختار نشان از برتری ساختار دارای پلی وینیل بوتیرال دارد که مشخص می‌کند در این لایه‌بندی نور به میزان حداکثر خود عبور کرده و با قدرت بیشتری به سطح لایه سیلیکونی می‌تابد که در نتیجه آن افزایش میزان جذب و افزایش میزان انتشار را خواهیم داشت.

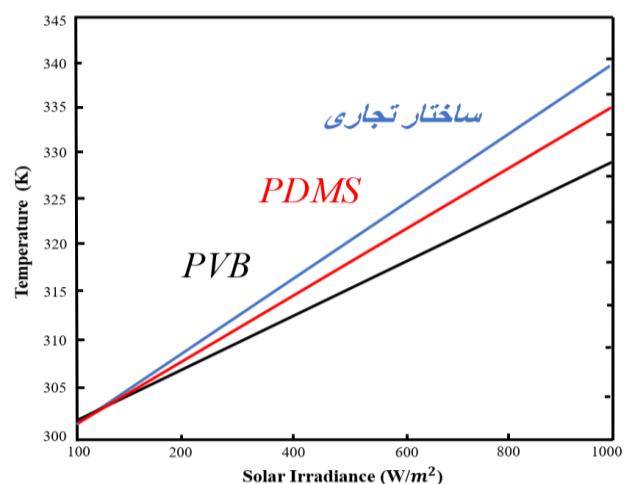
#### ۶- مراجع

- [1] H. S. Bagiorgas and G. Mihalakakou, "Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator for space cooling," *Renew. Energy*, vol. 33, no. 6,

همانطور که در قسمت تنظیمات شبیه‌سازی نیز گفته شد، شبیه‌سازی اپتیکی نمونه‌ها به دو صورت انجام می‌پذیرد. ابتدا پورت خروجی را بالای ویفر سیلیکونی قرار می‌دهیم تا میزان عبور نور خورشید را اندازه‌گیری کنیم و سپس پورت خروجی را در زیر پایین‌ترین لایه قرار می‌دهیم تا میزان جذب نور خورشید محاسبه شود. همانطور که مشاهده می‌شود میزان عبور لایه بندی‌های دارای ماده PDMS و PVB نسبت به لایه‌بندی ساده تجاری بیشتر است که نشان از تاثیر مواد پلیمری در گذردهی نور خورشید می‌باشد که به تبع آن میزان جذب نیز در ساختارهای دارای مواد پلیمری بیشتر از ساختار تجاری است که این میزان جذب باعث انتشار بیشتر گرما به پنجره آسمان شده و کاهش دما را برای سلول خورشیدی مورد نظر به ارمغان می‌آورد.

نتایج شبیه‌سازی میزان عبور نور را برای هر لایه‌بندی در بازه  $0.3$  تا  $2.5$  میکرومتر و همچنین میزان جذب نور را در بازه  $4$  تا  $2.5$  میکرومتر نشان می‌دهد که در کنار آن استانداردهای تابش خورشید و اتمسفر نیز به‌عنوان تابع و یا رفرنس نشان داده شده است که به ترتیب نمودارهای عبور و جذب بر روی آن‌ها قرار گرفته‌اند که این امر موجب درک صحیحی از خواص اپتیکی هر سه ساختار می‌گردد.

همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است دمایی سطح لایه‌بندی دارای ماده پلی وینیل بوتیرال نسبت به دو ساختار دیگر کاهش دمایی بیشتری را تجربه کرده است که این امر موجب افزایش راندمان الکتریکی این لایه‌بندی می‌شود چراکه با کاهش دمایی سلول خورشیدی فرآیند فرسودگی سلول با سرعت کمتری همراه می‌شود و کارایی سلول خورشیدی مورد نظر افزایش می‌یابد، همانطور که قابل مشاهده است هنگامی که شدت تابش در اوج خود و در  $1000 \text{ W/m}^2$  قرار دارد ساختار حاوی پلی وینیل بوتیرال حدود ۵ کلوین نسبت به ساختار حاوی پلی دی متیل سیلوکسان و ۹ کلوین نسبت به ساختار تجاری، کاهش دمایی بیشتری را به خود دیده است.



شکل ۱۰ نمودار بازدهی دمایی هر سه ساختار برحسب شدت تابش

- <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.015>.
- [11] C. G. Granqvist and A. Hjortsberg, "Radiative cooling to low temperatures: General considerations and application to selectively emitting SiO films," *J. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 6, pp. 4205–4220, 1981, <https://doi.org/10.1063/1.329270>.
- [12] D. M. Diatezua, P. A. Thiry, A. Dereux, and R. Caudano, "Silicon oxynitride multilayers as spectrally selective material for passive radiative cooling applications," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 40, no. 3, pp. 253–259, 1996, [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(95\)00092-5](https://doi.org/10.1016/0927-0248(95)00092-5).
- [13] G. Perrakis, A. C. Tasolamprou, G. Kenanakis, E. N. Economou, S. Tzortzakis, and M. Kafesaki, "Combined nano and micro structuring for enhanced radiative cooling and efficiency of photovoltaic cells," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, p. 11552, 2021, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91061-1>.
- [14] S. Ahmed, Z. Li, T. Ma, M. S. Javed, and H. Yang, "A comparative performance evaluation and sensitivity analysis of a photovoltaic-thermal system with radiative cooling," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 221, no. 110861, p. 110861, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110861>.
- [15] B. Bhatia *et al.*, "Passive directional sub-ambient daytime radiative cooling," *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, p. 5001, 2018, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07293-9>.
- [16] Z. Huang and X. Ruan, "Nanoparticle embedded double-layer coating for daytime radiative cooling," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 104, pp. 890–896, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.009>.
- [17] E. M. González-Cruz and E. L. Krüger, "Applicability of a radiant-capacitive cooling and heating system in its cooling mode in Köppen-Geiger's A, B and C climate types," *Build. Environ.*, vol. 258, no. 111623, p. 111623, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111623>.
- [18] F. Ferraresso and M. Marletta, "Essential spectrum for dissipative Maxwell equations in domains with cylindrical ends," *J. Math. Anal. Appl.*, vol. 536, no. 1, p. 128174, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2024.128174>.
- pp. 1220–1227, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.015>.
- [2] E. M. Lushiku and C. G. Granqvist, "Radiative cooling with selectively infrared-emitting gases," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 11, p. 1835, 1984, <https://doi.org/10.1063/1.331487>.
- [3] Y. Lu *et al.*, "A universal route to realize radiative cooling and light management in photovoltaic modules," *Sol. RRL*, vol. 1, no. 10, p. 1700084, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.050>.
- [4] H. Bahaidarah, A. Subhan, P. Gandhidasan, and S. Rehman, "Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions," *Energy (Oxf.)*, vol. 59, pp. 445–453, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.050>.
- [5] H. S. Bagiorgas and G. Mihalakakou, "Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator for space cooling," *Renew. Energy*, vol. 33, no. 6, pp. 1220–1227, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.015>.
- [6] B. Zhao, M. Hu, X. Ao, and G. Pei, "Performance analysis of enhanced radiative cooling of solar cells based on a commercial silicon photovoltaic module," *Sol. Energy*, vol. 176, pp. 248–255, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.043>.
- [7] U. Banik *et al.*, "Enhancing passive radiative cooling properties of flexible CIGS solar cells for space applications using single layer silicon oxycarbonitride films," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 209, no. 110456, p. 110456, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110456>.
- [8] K. Gao, H. Shen, Y. Liu, Q. Zhao, Y. Li, and J. Liu, "Random inverted pyramid textured polydimethylsiloxane radiative cooling emitter for the heat dissipation of silicon solar cells," *Sol. Energy*, vol. 236, pp. 703–711, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.040>.
- [9] H. Tang *et al.*, "Radiative cooling of solar cells with scalable and high-performance nanoporous anodic aluminum oxide," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 235, no. 111498, p. 111498, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111498>.
- [10] T. Xia and H. Wang, "High reflective polyethylene glycol terephthalate package layer for passive daytime radiative cooling in photovoltaic cells," *Sol. Energy*, vol. 237, pp. 313–319, 2022,