

# مطالعه اثر هندسه درپوش بر بازده جمع‌کننده‌های خورشیدی با استفاده از روش ردیابی ماتریسی سه‌بعدی

افضل رقوی\*

دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران

دریافت: ۹۸/۵/۲۷ پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۲۲

## چکیده

در این مقاله، از یک روش ماتریسی ردیابی سه‌بعدی پرتو برای مطالعه توزیع زاویه‌ای نور عبوری از یک تیغه شفاف با سطح ناهموار استفاده شده است. با استفاده از این روش، ضریب عبور و بازتاب برای سطحی با ناهمواری‌های چهاروجهی منشوری محاسبه شده است. با استفاده از نتایج به دست آمده اثر استفاده از این نوع سطوح در مقایسه با سطوح هموار برای درپوش‌های مورد استفاده در جمع‌کننده‌های خورشیدی بر حسب زاویه تابش نور و همچنین زاویه رأس منشورها مورد بحث قرار گرفته و یک ساختار بهینه برای افزایش بازده جمع‌کننده‌های خورشیدی با جایگزینی درپوش‌های مسطح متداول با درپوش‌های منشوری پیشنهاد شده است.

**واژگان کلیدی:** جمع‌کننده خورشیدی، ردیابی ماتریسی پرتو، درپوش منشوری

## مقدمه

تیغه‌های شفاف با سطح ناهموار، که بیش‌تر تحت عنوان صفحات منشوری شناخته می‌شوند، یک دسته از ابزارهای اپتیکی پرکاربرد هستند که امروزه در زمینه‌های مختلف جایگاه خود را به خوبی پیدا کرده‌اند [۱]. این صفحات معمولاً به صورت تیغه‌هایی از یک ماده شفاف ساخته می‌شوند که سطح آنها با آرایه‌ای از زائده‌های یکسان پوشیده شده است. صفحات منشوری، معمولاً با توجه به ابعاد زائده‌های ایجاد شده بر روی سطح آنها در مقایسه با طول موج تابش مورد استفاده، به دو دسته جداگانه تقسیم‌بندی می‌شوند. صفحات ریزمنشوری<sup>۱</sup> به صفحاتی گفته می‌شود که ابعاد زائده‌های آنها کوچک‌تر و یا قابل مقایسه با طول موج تابش مورد استفاده باشد. در این دسته از صفحات منشوری خصوصیات ایجاد شده بیش‌تر حاصل رفتار موجی تابش بوده و مکانیسم حاکم بر آنها از طریق یک روش تقریبی تحت عنوان محیط مؤثر قابل توضیح است [۲-۳]. از آنجایی که خاصیت ضدانعکاسی چشم‌موش‌ها در برابر تابش نور مرئی ناشی از چنین ساختاری در سطح چشم آنها است، سطوح ریزمنشوری گاهی سطوح چشم‌موشی<sup>۲</sup> نیز نامیده می‌شوند. این نوع سطوح دارای کاربرد گسترده‌ای در ساختار سلول‌های خورشیدی و ابزار اپتیکی به عنوان سطوح ضدانعکاس

\*نویسنده مسئول: a\_raghavi@pnu.ac.ir

<sup>1</sup> Microprismatic

<sup>2</sup> Motheye

می‌باشند [۲-۹]. همچنین به علت ساختار آرایه‌ای که این صفحات دارند می‌توان آنها را در دسته بلورهای فوتونی نیز قرار داد.

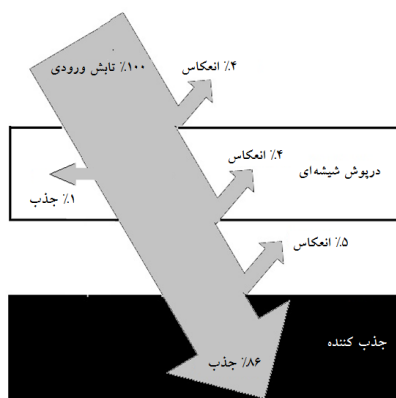
دسته دیگر صفحاتی هستند که ابعاد ناهمواری‌های سطح آنها بسیار بزرگ‌تر از ابعاد طول موج نور مورد استفاده است. به این دسته از صفحات گاهی صفحات بزرگ‌منشوری<sup>۱</sup> یا به اختصار صفحات منشوری گفته می‌شود. یک فهرست تقریباً کامل از کاربردهای متفاوت این دسته از صفحات منشوری در فصل ۸ مرجع [۱] آورده شده است. همچنین در مراجع [۱۰-۱۴] به صورت جداگانه برخی از این کاربردها مورد بحث قرار گرفته‌اند. این کاربردها به طور خلاصه عبارتند از؛ صفحات منشوری قطبنده، بهینه‌ساز روشنایی، ابزار تولید نور پس زمینه، هادی نور منشوری، شکافنده و ترکیب‌کننده نور و استفاده به عنوان صفحه درپوش در بازتابنده‌ها و جمع‌کننده‌های خورشیدی.

جمع‌کننده‌های خورشیدی یک دسته از ابزارهای بسیار کارآمد را تشکیل می‌دهند که انرژی تابشی خورشید را از آسمان گرفته و سپس به صورت انرژی گرمایی و یا انرژی الکتریکی به ما تحویل می‌دهند.

جمع‌کننده‌های خورشیدی مسطح که در آنها از صفحات تخت استفاده می‌شود، یکی از متداول‌ترین انواع جمع‌کننده‌های خورشیدی هستند که به طور گسترده و عمومی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در کنار این نوع از جمع‌کننده‌ها، جمع‌کننده‌های لوله‌ای نیز هستند که جذب‌کننده آنها به صورت لوله‌های موازی هم ساخته می‌شوند. هر یک از این ساختارها دارای مزایا و معایبی هستند که مصرف‌کنندگان با توجه به این خصوصیات انتخاب خود را انجام می‌دهند.

متداول‌ترین ماده مورد استفاده به عنوان درپوش شیشه‌ای در جمع‌کننده‌های خورشیدی شیشه است. شکل (۱) میزان تابش جذب شده و منعکس شده در ساختار یک جمع‌کننده خورشیدی مسطح با درپوش شیشه‌ای را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است بیشتر اتلاف تابش در اثر انعکاس از دو سطح درپوش شیشه‌ای است. میزان عبور استفاده شده در این شکل مربوط به شیشه معمولی با میزان آهن ( $Fe_2O_3$ ) زیاد است. این نوع شیشه معمولاً با رنگ سبز کم‌رنگی که در نواحی پررخامت خود ظاهر می‌سازند قابل تشخیص هستند. با استفاده از شیشه‌های با آهن کم‌تر می‌تواند ضریب عبور را ۸۶٪ به ۹۰٪ افزایش دهد. ثابت شده است که با افزایش ۱٪ در ضریب عبور درپوش شیشه‌ای حدود ۲٪ به بازده سالیانه یک جمع‌کننده خورشیدی افزوده می‌شود [۱۵]. با توجه به این می‌توان دریافت که انتخاب مناسب جنس و شکل درپوش دارای اهمیت زیادی در طراحی و ساخت این دستگاه خواهد بود.

<sup>1</sup> macroprismatic



شکل ۱. درصد انعکاس و جذب برای یک جمع‌کننده خورشیدی بدون پوشش ضدانعکاس

جمع‌کننده‌های مسطح با وجود دارا بودن مزیت‌هایی مثل سادگی ساخت، قیمت کم‌تر و راحتی نصب در مقایسه با نوع لوله‌ای آن، دارای بازده کم‌تری هستند. علت این بازده کم‌تر نیز ضریب عبور کم‌تری است که بیش‌تر به علت انعکاس تابش از سطح درپوش شفاف و بازگشت دوباره آن به فضا اتفاق می‌افتد. متداول‌ترین روش برای کاهش انعکاس نور از درپوش شفاف یک جمع‌کننده، استفاده از پوششی از یک لایه ضدانعکاس است که بر روی سطح درپوش نشانده می‌شود [۱۵]. این روش اگرچه تا حد زیادی باعث کاهش انعکاس و افزایش ضریب عبور تا حدود ۹۵٪ می‌شود ولی درعین حال دارای دو ایراد نیز هست. یکی از این ایرادات، افزایش هزینه ساخت این نوع صفحات است که رغبت مصرف‌کنندگان را نسبت به استفاده از آنها کاهش می‌دهد. ایراد دیگر مربوط به محدوده عملکرد لایه‌های ضدانعکاس است. این لایه‌ها با توجه به اساس فیزیکی که دارند، به این معنی که از پدیده‌های تداخل سازنده و ویرانگر بین امواج برای تغییر ضرایب تراکسیل لایه استفاده می‌کنند، برای طول‌موج‌های خاص و همچنین زاویه تابش خاصی دارای بهترین عملکرد بوده و با انحراف از این طول موج و زاویه دچار کاهش در عملکرد مؤثر می‌شوند.

ایده استفاده از پدیده انعکاس داخلی کلی برای کاهش ضریب بازتاب از مدت‌ها قبل مطرح بوده و از زوایای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۲-۱۴]. امروزه نیز استفاده از درپوش‌های شیشه‌ای با سطح طرح‌دار و مشجر به منظور افزایش ضریب عبور در جمع‌کننده‌های خورشیدی مسطح متداول است. به عنوان مثال در این رابطه می‌توان به محصولات شرکت Shinergy glass [۱۶] اشاره کرد، که در آنها از شیشه‌های با سطوح منشوری و طرح‌دار استفاده می‌شود (شکل ۲).

• **Diffused Series 1:**  
 Clear Prismatic Tempered  
 Low Iron Prismatic Tempered  
 Clear Prismatic Tempered + 2AR  
 Low Iron Prismatic Tempered + 2AR



• **Diffused Series 2:**  
 Clear Matt Tempered  
 Low Iron Matt Tempered  
 Clear Matt Tempered + 2AR  
 Low Iron Matt Tempered + 2AR



• **Textured Series:**  
 Clear CustomTex Tempered  
 Low Iron CustomTex Tempered  
 Clear CustomTex Tempered + 2AR  
 Low Iron CustomTex Tempered + 2AR



شکل ۲. نمونه درپوش‌های شیشه‌ای محصول شرکت Shinerger glass با سطوح منشوری و طرح‌دار که به منظور افزایش ضریب عبور استفاده می‌شوند.

با وجود این، در منابع علمی و پژوهشی مربوطه هیچ تحقیق جامعی در رابطه با اثرات توزیع زاویه‌ای تابش و همچنین زاویه رأس زائده‌های منشوری بر ضریب عبور این صفحات در این تحقیقات مشاهده نمی‌شود و ظاهراً به همین دلیل، هیچ قاعده خاصی در انتخاب شکل زائده‌ها در آنها مشاهده نمی‌شود. تنها موردی که در جستجوهای انجام گرفته توسط نگارنده در این رابطه مشاهده شد؛ کار انجام گرفته در مرجع [۱۷] است که در آن اثر درپوش‌های ساده و طرح‌دار، بدون مشخص کردن نوع و شکل طرح‌ها، بررسی شده است. در این مقاله به مطالعه اثر استفاده از درپوش شفاف منشوری به جای درپوش مسطح برای کاهش انعکاس از سطح جمع‌کننده‌های خورشیدی با استفاده از روش ردیابی ماتریسی پرتو پرداخته شده است. این روش بر تغییر شکل سطح درپوش از سطح هموار به سطحی با زائده‌های منشوری شکل مبتنی می‌باشد که در آن با به دام‌اندازی پرتوها در اثر پدیده انعکاس کامل داخلی در داخل درپوش موجب کاهش پرتوهای برگشت داده شده به فضای خارج و در نتیجه افزایش جذب آنها می‌شود. برای انجام این تحقیق از یک روش ردگیری پرتو ماتریسی سه‌بعدی مشابه آنچه در مراجع [۱۰ و ۱۱] به کار رفته، استفاده شده و فرآیند عبور پرتو تابشی از یک صفحه تخت منشوری شبیه‌سازی شده است. محاسبات به ازاء زوایای رأس متفاوت برای منشورها و همچنین زوایای متفاوت تابش تکرار شده و وابستگی ضریب انعکاس به این پارامترها مورد بررسی قرار گرفته است.

### ردیابی سه‌بعدی پرتو به روش ماتریسی

در اپتیک هندسی ردیابی پرتو از طریق پیدا کردن مسیر عبور نور از یک محیط و یا مجموعه‌ای از دستگاه‌های اپتیکی انجام می‌گیرد. در محیط‌های همگن این مسیر یک خط مستقیم بوده و در مرز بین محیط‌های متفاوت مسیر انتشار مطابق با دو قانون بنیادی اپتیک هندسی، یعنی قانون بازتاب و قانون شکست تغییر می‌کند این دو قانون به همراه این واقعیت که پرتو تابیده شده، شکسته شده و منعکس شده همواره در یک صفحه قرار می‌گیرند امکان آن را فراهم می‌کند که جهت و موقعیت پرتو را در هر دستگاه اپتیکی ردیابی کرد.

صفحاتی که در این تحقیق به عنوان مرز محیط‌های مختلف با آنها سر و کار خواهیم داشت همه از نوع تخت هستند. اگر سطح مرز مشترک بین دو محیط را یک سطح تخت در نظر بگیریم در حالت کلی معادلهٔ مشخص کنندهٔ این صفحه را در دستگاه دکارتی می‌توان به صورت زیر نوشت،

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

در این رابطه مقادیر  $A$ ،  $B$  و  $C$  مؤلفه‌های بردار عمود بر سطح این صفحه هستند. اگر بردار یکهٔ این بردار را با بردار  $\hat{N}(N_x, N_y, N_z)$  نشان دهیم صفحهٔ حاصل از این بردار و بردار تابش  $\hat{r}_i(t_x, t_y, t_z)$  یعنی برداری که مشخص کنندهٔ جهت و موقعیت پرتو تابشی است، همان صفحهٔ تابش خواهد بود. بنابراین بردار یکهٔ صفحهٔ تابش را می‌توان از رابطهٔ زیر به دست آورد،

$$\hat{N}_p(p_x, p_y, p_z) = \hat{r}_i \times \hat{N} \quad (2)$$

از آن جایی که باریکه‌های بازتاب یافته  $\hat{r}_r(r_x, r_y, r_z)$  و شکسته شده  $\hat{r}_t(t_x, t_y, t_z)$  مقید هستند که در صفحهٔ تابش قرار بگیرند روابط زیر نیز باید برقرار باشند،

$$\hat{r}_r \cdot \hat{N}_p = r_x p_x + r_y p_y + r_z p_z = 0 \quad (3)$$

$$\hat{r}_t \cdot \hat{N}_p = t_x p_x + t_y p_y + t_z p_z = 0 \quad (4)$$

زاویهٔ تابش به صورت زاویهٔ بین پرتو تابشی و خط عمود بر سطح تعریف می‌شود. با توجه به این تعریف زاویهٔ تابش را می‌توان از ضرب داخلی این دو بردار به دست آورد،

$$\cos \alpha_i = \hat{r}_i \cdot \hat{N} \quad (5)$$

همچنین برای زاویهٔ بازتاب داریم،

$$\cos \alpha_r = \hat{r}_r \cdot \hat{N} \quad (6)$$

که با توجه به قانون بازتاب همواره رابطهٔ

$$\alpha_r = \pi - \alpha_i \quad (7)$$

بین این دو زاویه برقرار خواهد بود. اگر زاویهٔ بین پرتو تابشی و پرتو بازتابی را با  $\delta_{ir}$  نشان دهیم رابطهٔ زیر برای این زاویه برقرار خواهد بود،

$$\cos \delta_{ir} = \cos(\alpha_i - \alpha_r) = -\cos 2\alpha_i = \hat{r}_i \cdot \hat{r}_r \quad (8)$$

که در آن در عبارت بعد از تساوی دوم از رابطهٔ (۷) استفاده شده است.

زاویهٔ شکست به صورت زاویهٔ بین پرتو شکسته شده با خط عمود بر سطح تعریف شده و از رابطهٔ زیر به دست می‌آید،

$$\cos \alpha_t = \hat{r}_t \cdot \hat{N} \quad (9)$$

رابطهٔ این زاویه با زاویهٔ تابش نیز با توجه به قانون اسنل عبارت است از

$$\alpha_t = \frac{n_1}{n_2} \sin^{-1} \alpha_i \quad (10)$$

همچنین زاویه بین پرتو تابش و زاویه شکست  $\delta_{it} = \alpha_i - \alpha_t$  را می‌توان از این رابطه به دست آورد،

$$\cos \delta_{it} = \hat{r}_i \cdot \hat{r}_t \quad (11)$$

مجموعه معادلات (۳)، (۶) و (۸) یک دستگاه سه‌معادله‌ای برای مؤلفه‌های باریکه بازتابی به دست می‌دهند که می‌توان آنها را به صورت معادله ماتریسی زیر نوشت،

$$\begin{pmatrix} i_y N_z - i_z N_y & -(i_x N_z - i_z N_x) & i_x N_y - i_y N_x \\ N_x & N_y & N_z \\ i_x & i_y & i_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \alpha_r \\ \cos \delta_{ir} \end{pmatrix} \quad (12)$$

ماتریس ضرایب در معادله ماتریسی فوق تنها شامل مشخصات صفحه برخورد و پرتو تابشی است. این ماتریس، که آن را با  $M_{in}$  نمایش خواهیم داد، ماتریس برخورد نامیده می‌شود. بردار ستونی سمت چپ که ماتریس برخورد در آن ضرب شده است تنها شامل مؤلفه‌های باریکه بازتابی، که در این جا مجهولات مسأله هستند، می‌باشد و به عنوان بردار بازتاب  $M_r$  شناخته می‌شود. بردار ستونی سمت راست این رابطه که شامل زاویه بازتاب است، به عنوان بردار پارامترهای بازتاب  $M_{pr}$  نام‌گذاری می‌شود. این معادله ماتریسی را می‌توان حل کرده و جواب آن را که مؤلفه‌های باریکه بازتابیده است به دست آورد،

$$M_r = M_{in}^{-1} M_{pr} \quad (13)$$

به روشی مشابه می‌توان معادلات (۴)، (۹) و (۱۱) را به صورت معادله ماتریسی زیر بازنویسی کرد،

$$\begin{pmatrix} i_y N_z - i_z N_y & -(i_x N_z - i_z N_x) & i_x N_y - i_y N_x \\ N_x & N_y & N_z \\ i_x & i_y & i_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \alpha_t \\ \cos \delta_{it} \end{pmatrix} \quad (14)$$

این رابطه ساختاری مانند رابطه (۱۲) داشته و جواب‌های آن مؤلفه‌های باریکه شکسته شده است. با تعریف بردارهای شکست  $M_t$  و پارامترهای شکست  $M_{pt}$  جواب‌های این معادله ماتریسی به صورت زیر به دست می‌آید،

$$M_t = M_{in}^{-1} M_{pt} \quad (15)$$

ماتریس‌های پارامتر  $M_{pr}$  و  $M_{pt}$  از طریق روابط (۱۲) و (۱۴) مشخص می‌شوند و ماتریس برخورد  $M_{in}$  نیز از ساختار هندسی دستگاه تعیین می‌گردد. بنابراین با محاسبه‌ی وارون ماتریس برخورد و سپس جایگذاری در روابط (۱۳) و (۱۵) میتوان پرتوهای بازتابی و شکستی را به دست آورد.

جهت انتشار یک باریکه‌ی نوری را می‌توان هم با استفاده از زوایای قطبی و سمتی  $(\theta, \varphi)$  و هم با استفاده از کسینوس‌های هادی آن تعیین کرد. برای باریکه‌ی تابشی  $\hat{r}_i(i_x, i_y, i_z)$  رابطه‌ی این دو دستگاه مختصات به صورت زیر داده می‌شود،

$$\begin{aligned} i_x &= \cos(\alpha) = \sin(\theta) \cos(\varphi) \\ i_y &= \cos(\beta) = \sin(\theta) \sin(\varphi) \\ i_z &= \cos(\gamma) = \cos(\varphi) \end{aligned} \quad (16)$$

که در آنها،  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  به ترتیب زاویه‌ی بردار پرتو با محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  است. معادله‌ی یک خط که با بردار  $\hat{r}(i_x, i_y, i_z)$  مشخص شده و از نقطه‌ای با مختصات  $\vec{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$  عبور می‌کند را می‌توان به صورت زیر نوشت،

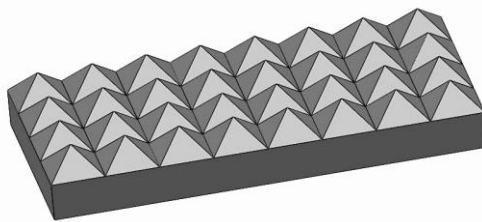
$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \hat{r}t \quad (17)$$

$$x = x_0 + i_x t, \quad y = y_0 + i_y t, \quad z = z_0 + i_z t$$

در این جا  $t$  پارامتر خط بوده و می‌تواند مقادیری بین صفر تا بی‌نهایت را بگیرد. با افزایش  $t$  موقعیت باریکه از نقطه شروع آن در جهت مشخص شده با بردار  $\hat{r}$  شروع به تغییر می‌کند. این مسیر در یک محیط همگن، تا زمانی که جنس محیط تغییر نکرده باشد یک مسیر مستقیم خواهد بود. در هنگام برخورد با مرز مشترک دو محیط، بسته به این‌که کدام یک از پدیده‌های بازتاب یا شکست اتفاق می‌افتد، از روابط (۱۳) یا (۱۵) استفاده کرده و جهت جدید انتشار را تعیین می‌کنیم. سپس با استفاده از این جهت جدید دوباره از روابط (۱۷) استفاده کرده و مسیر انتشار را در محیط جدید مشخص می‌کنیم. با تکرار این مراحل می‌توان مسیر پرتو را از نقطه شروع آن تا رسیدن به مقصد ردیابی کرد.

### محاسبه ضرایب عبور و شکست در ساختار جمع‌کننده خورشیدی با درپوش شفاف منشوری

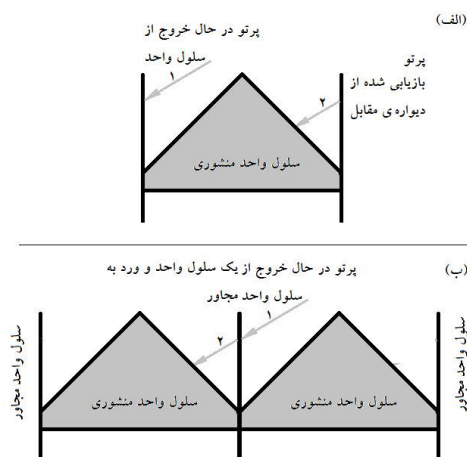
ساختار مورد مطالعه در این مقاله یک جمع‌کننده منشوری از نوع مسطح است. ساده‌ترین ترکیبی که برای این ساختار می‌توان در نظر گرفت، همان‌گونه که در شکل (۱) نمایش داده شده است، به صورت یک جعبه مکعب مستطیل با ارتفاع کم است که سطح بالایی (درپوش) آن را یک صفحه شفاف (معمولاً شیشه‌ای) تشکیل داده و سطح پایینی (کف) آن از یک صفحه تیره با درصد جذب زیاد نسبت به نور خورشید تشکیل شده است. انرژی تابشی خورشید به صورت یک دسته پرتو موازی از طریق درپوش شفاف وارد محفظه شده و توسط صفحه جذب کننده تبدیل به انرژی گرمایی می‌شود. سپس صفحه گرم شده متقابلاً شروع به تابش امواج الکترومغناطیسی با بسامدی متناسب با دمای سطح خود می‌کند. این تابش ثانویه که بنا به قانون پلانک معمولاً در محدوده تابش گرمایی قرار دارد، به سمت بالایی محفظه برای خروج از آن منتشر می‌شود، ولی به علت این‌که درپوش شفاف بالایی از جنسی انتخاب می‌شود که در محدوده امواج گرمایی کدر است، دوباره به داخل جعبه برگردانده شده و در آن محبوس می‌شود. این فرآیند پدیده‌ای است که به آن اثر گلخانه‌ای گفته می‌شود. در اثر تجمع گرمای محبوس شده در محفظه دمای آن مرتب بالاتر و بالاتر می‌رود. در گرمکن‌های خورشیدی این گرما صرف گرم کردن آبی که با صفحه جذب در تماس گرمایی است می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، تابش خورشیدی در سه مرحله به سمت عقب بازتاب پیدا کرده و از دسترس خارج می‌شود. در این جا برای کاهش اتلاف تابش، پیشنهاد استفاده از یک درپوش منشوری مانند، آن‌چه در شکل (۳) نشان داده شده است، به جای درپوش مسطح متداول مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۳. درپوش شفاف منشوری

این مطالعه شامل محاسبه ضرایب عبور و بازتاب این ساختار به ازاء زوایای متفاوت رأس منشورها و همچنین به زوایای متفاوت تابش نور خورشید می‌باشد. برای این کار از کد ویژه‌ای که توسط نویسنده با استفاده از الگوریتم تشریح شده در بخش قبل در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار *MATLAB* نوشته شده، استفاده شده است.

در شبیه‌سازی صفحه منشوری نشان داده شده در شکل (۳) به منظور کاهش حجم محاسبات و در نتیجه افزایش دقت نتایج، به جای استفاده از شکل منتهای نشان داده شده در این شکل، از یک آرایه نامتناهی از این نوع استفاده شده است. این کار ضمن ساده‌سازی در نوشتن کد در قبال چشم‌پوشی از آثار مربوط به لبه‌های درپوش، با افزایش نسبی تعداد پرتوهای مورد استفاده به میزان بسیار زیادی باعث افزایش دقت نتایج می‌شود. برای این منظور، با توجه به تکراری بودن منشورهای سطح صفحه تنها از یک منشور واحد مطابق شکل (۴-الف) استفاده شده و سپس برای به شمار آوردن اثر بقیه منشورها، پرتوهای خارج شده از وجوه جانبی سلول واحد به صورت قرینه از وجه مقابل آن دوباره بازتابی شده و به سیستم بازگردانده می‌شود. این فرآیند به صورت طرح‌وار در شکل (۴-الف) نشان داده شده و نتیجه آن با وضعیت واقعی که در آن آرایه نامتناهی از منشورها در کنار هم قرار گرفته‌اند در شکل (۴-ب) مقایسه شده است.



شکل ۴. الف) مدل بازتابی پرتوها استفاده شده برای شبیه‌سازی یک آرایه نامتناهی از سلول‌ها با استفاده از یک سلول واحد. ب) دو سلول مجاور از آرایه نامتناهی از سلول‌ها در حالت واقعی. پرتو شماره ۱ که در حالت واقعی (شکل ب) از سلول سمت چپ خارج شده و به صورت سلول شماره ۲ وارد سلول سمت راست می‌شود، در روش بازتابی پرتو (شکل الف) از دیوار سمت چپ خارج و از دیوار سمت راست دوباره وارد سلول می‌شود.



جنس درپوش منشوری مورد مطالعه از شیشه با ضریب شکست  $1/53$  و بدون جذب در نظر گرفته شده و ضریب جذب صفحه جذب‌کننده برابر  $95\%$  فرض شده است. شبیه‌سازی در دو مرحله جداگانه انجام می‌گیرد. در مرحله اول ضریب جذب دستگاه به صورت نسبت پرتوهای جذب شده توسط صفحه جذب به پرتوهای تابیده شده، به ازای تابش عمودی و برای زوایای مختلف رأس منشور محاسبه می‌شود. از نتایج این قسمت به مناسب‌ترین زاویه رأس منشورها که منجر به بیشترین جذب تابش می‌شود خواهیم رسید.

در مرحله دوم پس از مشخص شدن زاویه رأس مناسب، به مطالعه تأثیر زاویه تابش بر میزان جذب پرداخته شده و نتایج با حالت صفحه تخت مقایسه خواهد شد.

قبل از شروع بهتر است نتایج حاصل از کد مورد استفاده را با نتایج تحلیلی شناخته شده برای یک صفحه شیشه‌ای تخت مقایسه کرده تا از صحت عملکرد آن اطمینان حاصل شود.

از نظریه الکترومغناطیس کلاسیک می‌دانیم که ضرایب عبور و بازتاب برای یک تیغه متوازی‌السطوح بدون جذب با ضریب شکست  $n$  از روابط زیر به دست می‌آیند [۱۸].

$$T = \frac{1-\rho}{1+\rho} \quad (18)$$

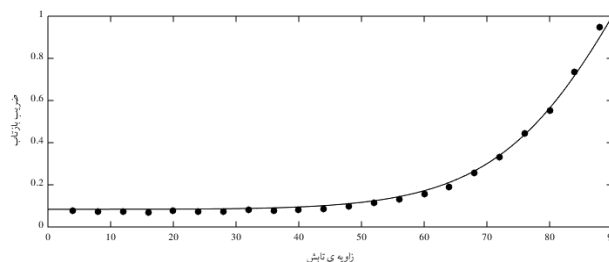
$$R = \frac{\gamma\rho}{1+\rho} \quad (19)$$

که در آنها  $\rho$  ضریب فرنل بوده و برای قطبش‌های موازی و عمودی بر حسب زاویه تابش  $\theta_i$  به صورت،

$$\rho_s = \left( \frac{\cos\theta_i - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}} \right)^2 \quad (20)$$

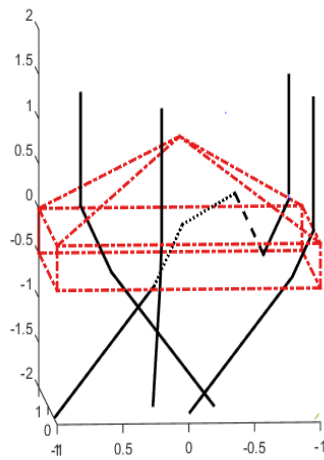
$$\rho_p = \left( \frac{n^2 \cos\theta_i - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}}{n^2 \cos\theta_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}} \right)^2 \quad (21)$$

تعریف می‌شوند. برای یک نور ناقطبیده مانند نور خورشید ضرایب عبور و بازتاب کل را می‌توان میانگین مقادیر مربوط به دو قطبش در نظر گرفت. ضریب بازتاب حاصل از این روابط برای تیغه‌ای شیشه‌ای با ضریب شکست  $1/53$  در شکل (۵) رسم شده است (نمودار خط پیوسته). همچنین در همین شکل نتایج حاصل از کد حاضر برای همان تیغه به صورت نقاط گسسته رسم شده است.



شکل ۵. مقایسه ضریب بازتاب یک تیغه متوازی‌السطوح حاصل از ضرایب بازتاب فرنل (خط پیوسته) و محاسبه شده توسط کد مورد استفاده در این تحقیق (نقاط)

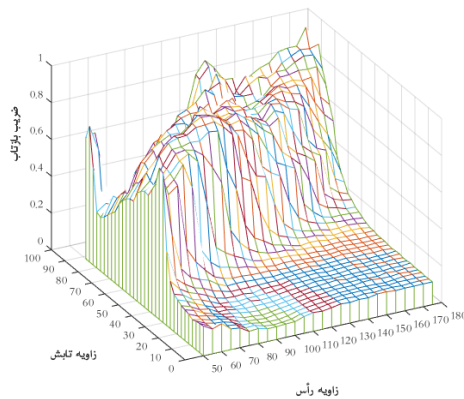
مقایسه این دو نشان دهنده توافقی بسیار خوب نتایج تئوری با نتایج شبیه‌سازی شده توسط این کد است.



شکل ۶. یک نمونه از اجرا و رسم پرتوها توسط کد حاضر.

در مرحله بعد به مطالعه اثر زاویه‌ی رأس منشورها بر ضریب بازتاب کل جمع‌کننده خورشیدی خواهیم پرداخت. برای این منظور از یک صفحه منشوری مشابه شکل (۳) و از جنس شیشه استفاده می‌کنیم. برای به دست آوردن نتایج واقعی‌تر، برای صفحه جاذب دستگاه نیز ضریب بازتابی برابر ۰/۵٪ در نظر گرفته شده است تا پرتوهایی که در اثر بازتاب از این سطح از محیط خارج می‌گردند نیز به شمار آمده باشند. شکل (۶) ساختار واقعی مورد استفاده در کد و چند نمونه از پرتوهای ردیابی شده توسط آن را نشان می‌دهد.

ضریب بازتاب به ازاء زوایای رأس متفاوت از طریق شمارش نسبت پرتوهای برگردانده شده به سطح چشمه به کل پرتوهای خارج شده از آن محاسبه می‌شود. این کمیت به ازاء زوایای رأس از ۵۰ درجه تا ۱۷۵ درجه، یعنی حالت نزدیک به صفحه تخت، با فاصله زاویه‌ای ۵ درجه محاسبه شده و به ازاء زوایای تابش بین صفر تا نزدیک به ۹۰ درجه (تابش خراشان) برای هر زاویه‌ی رأس تکرار شده است. نتایج حاصل در شکل (۷) به صورت نمودار تغییرات ضریب بازتاب بر حسب زاویه‌ی رأس منشورها و زوایای تابش مختلف نشان داده شده است.

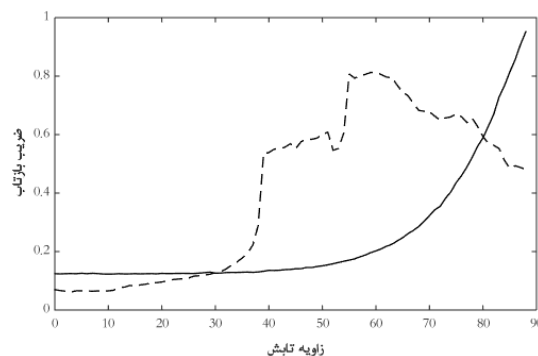


شکل ۷. نمودار ضریب بازتاب بر حسب زاویه تابش به ازاء زوایای رأس مختلف

همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، با تغییر شکل صفحه از حالت مسطح (زاویه رأس ۱۸۰ درجه) به حالت منشوری، ضریب بازتاب نیز دچار تغییر می‌شود. این تغییرات برای زوایای تابش نزدیک به عمود بر صفحه و نزدیک به موازی با سطح رفتاری متفاوت دارند، چنان‌که با کاهش زاویه رأس، ضریب بازتاب برای زوایای عمودی و نزدیک به آن کاهش می‌یابد. البته این رفتار تنها تا زاویه رأس ۹۰ درجه، یعنی منشور با رأس قائمه به این صورت بوده و با عبور از این زاویه ضریب بازتاب زوایای تابش کوچک دوباره شروع به زیاد شدن می‌کند. در زوایای تابش متوسط (حدود ۵۰ درجه) این رفتار برعکس بوده و با کاهش زاویه رأس ضریب بازتاب افزایش پیدا می‌کند. در زوایای تابش بزرگ افت و خیزهای ضریب بازتاب بسیار زیاد بوده ولی به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که زوایای رأس کوچک‌تر ضریب بازتاب کمتری دارند.

نتیجه‌ای که از این تحلیل می‌توان گرفت این است که از دیدگاه کمترین ضریب بازتاب برای زوایای تابش کوچک، زاویه رأس قائمه بهترین گزینه خواهد بود. برای این‌که این مقایسه راحت‌تر انجام بگیرد نمودار تغییرات ضریب بازتاب بر حسب زاویه تابش برای دو حالت زاویه ۱۸۰ درجه (صفحه تخت) و زاویه رأس قائمه در شکل (۸) به صورت مجزا رسم شده است.

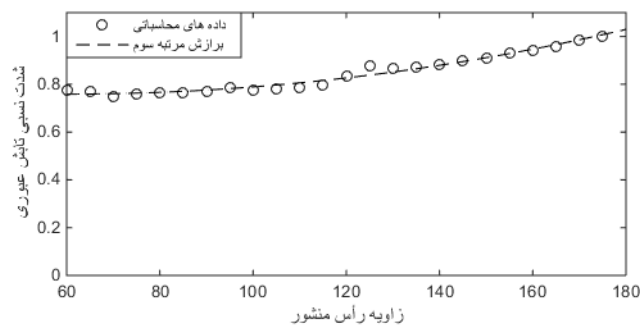
این زاویه در محدوده زوایای تابش بین صفر تا ۱۰ درجه ضریب بازتاب را تا حدود ۵۰٪ کاهش می‌دهد (شکل ۸، تفاوت بین نمودارهای خط چین و پیوسته را ببینید). بین زوایای تابش ۱۰ تا ۳۰ درجه ضریب بازتاب تقریباً به صورت خطی افزایش یافته تا تقریباً در زاویه ۳۰ درجه با مقدار مربوط به صفحه‌ی تخت برابر شود. همان‌گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، از زاویه ۳۰ درجه به بعد تا حدود ۸۰ درجه ضریب بازتاب بزرگتر از حالت صفحه مسطح خواهد بود ولی بین ۸۰ تا ۹۰ درجه این مقدار کاهش می‌یابد.



شکل ۸. ضریب بازتاب بر حسب زاویه تابش با زاویه رأس قائمه (خط چین) در مقایسه با درپوش مسطح (خط پیوسته)

از نتایج به دست آمده در این قسمت نمی‌توان در مورد بازتاب کل برای تابش در تمام طول یک روز نتیجه‌گیری کرد. برای تعیین اثر زاویه رأس بر بازتاب کل باید انرژی کل بازتابیده یا جذب شده را در طول یک روز کامل، یعنی برای زوایای تابش بین صفر تا ۹۰ درجه مورد بررسی قرار داد. برای این منظور، از آنجایی که انرژی تابشی جذب شده مستقیماً متناسب با مقدار پرتو جذب شده توسط دستگاه است، می‌توان از ضریب جذب به دست آمده برای هر زاویه

رأس بر حسب زاویه تابش انتگرال‌گیری کرده و تابش کل جذب شده در یک روز را محاسبه نمود. در این پژوهش برای انتگرال‌گیری از روش سیمپسون استفاده شده است. نتایج حاصل به صورت ضریب جذب کل بر حسب زاویه رأس در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹. نمودار رابطه شدت تابش نسبی عبوری (انتگرال ضریب عبور بر حسب زاویه تابش) با زاویه رأس

همان‌گونه که در این نمودار دیده می‌شود، استفاده از درپوش منشوری برای استفاده معمولی جمع‌کننده خورشیدی در هیچ زاویه‌ای بر درپوش مسطح مزیتی ندارد. این نتیجه را می‌توان برای تابش غیرمستقیم محیطی (مثل تابش دریافتی در یک روز ابری) نیز به کار برد. با فرض این که تابش محیطی به صورت یکنواخت از تمام زوایا به سطح جمع‌کننده برسد، این نتایج نشان می‌دهد که درپوش مسطح بهترین گزینه برای جذب این نوع تابش خواهد بود. با وجود این می‌توان نشان داد که برای استفاده در حالت‌های خاص که تابش به زوایای معینی محدود است استفاده از درپوش منشوری بر مسطح برتری دارد. به عنوان مثال، برای یک دستگاه قابل حمل که در آن زاویه تابش قابل انتخاب باشد، یا یک صفحه متصل به ردگیر مسیر خورشید (خورپا)<sup>۱</sup>، با نگر داشتن زاویه تابش در محدوده کمتر از ۳۰ درجه یک درپوش منشوری قائم‌الزاویه درصد جذب بسیار بالاتری نسبت به نوع مسطح آن خواهد داشت. برای شرایطی که در آن در یک بازه زمانی معین در طول روز از دستگاه استفاده می‌شود نیز این نوع درپوش مناسب‌تر است. در این نوع کاربرد، برای هر زاویه رأس مشخص می‌توان با محاسبه ضریب جذب کل با انتگرال‌گیری در بازه‌های زاویه‌ای مختلف مناسب‌ترین بازه زاویه‌ای و از آنجا بازه زمانی مناسب با آن را پیدا نمود.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر استفاده از درپوش منشوری به جای درپوش مسطح بر میزان بازتاب تابش در جمع‌کننده‌های خورشیدی پرداخته شده است. نتایج تحقیق، که به روش شبیه‌سازی کامپیوتری و محاسبات عددی با استفاده از ردیابی ماتریسی پرتو انجام گرفته است، نشان می‌دهد که تغییر شکل سطح درپوش شیشه‌ای جمع‌کننده‌های خورشیدی از حالت مسطح به سطح منشوری به میزان بیار زیادی بر ضریب بازتاب سطح تأثیر

<sup>۱</sup>Heliostat

می‌گذارد. این تغییر که در اثر پدیده بازتاب کلی داخلی در داخل درپوش اتفاق می‌افتد، به سه عامل عبارت از جنس درپوش، زاویه تابش و زاویه رأس منشورها بستگی دارد. وابستگی به جنس درپوش به علت بدیهی بودن و همچنین محدودیتی که در عمل در انتخاب جنس وجود دارد (معمولاً شیشه با ضریب شکست  $1/53$ ) در این تحقیق مورد توجه قرار نگرفته است. مطالعه وابستگی ضریب بازتاب به زاویه رأس منشورها نشان می‌دهد که منشور قائم‌الزاویه در تابش‌های عمودی بیشترین تأثیر مثبت را بر این کمیت داشته و می‌تواند تا  $50\%$  ضریب بازتاب را نسبت به سطح هموار کاهش دهد. با وجود این، تأثیر مثبت این زاویه رأس محدود به زوایای تابش نزدیک به قائم است که برای شیشه تقریباً در محدوده زوایای تابش کوچک‌تر از  $30^\circ$  قرار می‌گیرد. با افزایش یا کاهش زاویه رأس نسبت به زاویه قائمه می‌توان بازه زاویه تابش مؤثر را افزایش داد ولی این کار همیشه به بهای افزایش ضریب بازتاب خواهد بود. با توجه به این نتایج می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که استفاده از درپوش منشوری در جمع‌کننده‌های خورشیدی ثابت که در طول روز تابشی با تمام زوایای ممکن را دریافت می‌کنند هیچ مزیتی بر درپوش‌های هموار ندارند. با وجود این، در شرایطی که زاویه تابش در بازه محدودی قرار می‌گیرد، مثل دستگاه‌هایی که در ساعات محدودی از طول روز مورد استفاده قرار می‌گیرند و یا دستگاه‌های ردیاب خورشیدی استفاده از این درپوش‌ها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ضریب بازتاب سطح و از آن‌جا بر بازده دستگاه جمع‌کننده خورشیدی داشته باشد.

### منابع

1. Wanderwerf D. F., "Applied Prismatic and Reflective Optics", 1st edition, SPIE press, Bellingham, Washington USA (2010).
2. Wilson S. J. and Hutley M. C., "The optical properties of 'moth eye' antireflection surface", *Optica Acta*, 29, 7 (1982) 993-1009.
3. Deinega A., Valuev I, Potapkin B. and Lozovik Y., "Minimizing light reflection from dielectric textured surfaces", *Journal of Optical Society of America A*, 28, 5 (2011) 770-777.
4. Raut H. K. et al, "Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review", *Energy & Environmental Science*, 4 (2011) 3779-3804.
5. MacLeod B. D. and Hobbs D. S., "Low Cost Anti-Reflection Technology for Automobile Display", *SID Vehicle Display Conference*, Canton, United States, October 2004.
6. Deinega A., Valuev I, Potapkin B. and Lozovik Y., "Antireflective properties of pyramidally textured surfaces", *Optics Letters*, 35, 2 (2010) 106-108.

7. Hava S. and Auslender M., "Design and Analysis of Low-Reflection Grating Microstructures for a Solar Energy Absorber", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 61 (2000) 143-151.
  8. Sopori B. L. and Pryor R. A., "Design of Antireflection Coatings for Textured Silicon Solar Cells", *Solar Cells*, 8 (1983) 249 – 261.
  9. Askari M. B., Mirzaei Mahmoud Abadi V. and Mirhabibi M., "Types of Solar Cells and Application", *American Journal of Optics and Photonics*, 3, 5 (2015) 94-113.
  10. Yeh S. C. et al, "Distribution of Emerged Energy for Daylight Illuminate on Prismatic Elements", *Journal of Solar Energy Engineering*, 133 (2011) 021007-1-9.
  11. Whang A. J. W., Lin C. M. and Yeh S. C., "Investigation of Prismatic Daylight Collectors With Different Apexes", *Journal of Solar Energy Engineering*, 135 (2013) 011015-1-10.
  12. Rabl A., "Prisms with Total Internal Reflection as Solar Reflectors", *Solar Energy*, 19 (1977) 555-565.
  13. Mughal H. A., "Solar Energy Reflector and Assembly", US Patent, Pub. No. US 2011/0083723 A1
  14. Smith A. W. and Rphatgi A. "Ray tracing analysis of the inverted pyramid textured geometry for high efficiency silicon solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 29 (1993) 37-49.
  15. Nostell, P., Roos, A., & Karlsson, B. "Optical and mechanical properties of sol-gel antireflective films for solar energy applications", *J. Thin solid films* 351 (1999), 170 - 175.
  16. <http://www.shinergyglass.com/Content/index/id/454>
  17. Fischer, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen: The effect of different glass covers on the yearly energy gain of a solar collector EuroSun 2000, Proceedings of the third ISES - Europe Solar Congress, 2000, Copenhagen, Denmark.
۱۸. ریتس جان ار، میلفورد فریدریک جی و کریستی رابرت دبلیو، مبانی نظریه الکترومغناطیس، ترجمه صمیمی جلال، جمشیدی ابوالقاسم، جمشیدی پور مسیب و علی‌زاده قمصری، ناصر ویراسته صمیمی جلال، چاپ دهم، تهران، نشر دانشگاهی، ۱۳۸۳، صفحه ۵۱۴