

# بررسی اثر سرمایه‌شعشعی و بازتابنده براگ

سید حسین حسینی بیوکی<sup>1</sup> و مجید بدیعی رستمی<sup>\*</sup>

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

پست الکترونیکی: mbadie@ut.ac.ir

## چکیده

ساختارهای سرمایه‌شعشعی با کم کردن جذب انرژی‌های شعشعی از محیط پیرامون و ساطع کردن حداکثری انرژی شعشعی خود ساختار، می‌تواند به دمایی زیر دمای محیط برسد. این ساختارها به علت آنکه بدون صرف انرژی اضافی می‌تواند از مصرف انرژی برق سیستم‌های سرمایه‌شعشعی بکاهد، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. برای دست‌یابی به این هدف، نیاز به طراحی یک ساختار با خواص الکترومغناطیسی ویژه از نقطه نظر میزان جذب و میزان عبور نور داریم. ساختار مورد نظر باید همزمان دارای شرایط (۱) بازتابش خوب در مقابل امواج خورشیدی و (۲) گسیل (جذب) خوب در پنجره انتقال اتمسفر باشد. این مقاله ضمن بررسی این شرایط، ابتدا برای تحقق شرط گسیل ماده فوتورزیست SU-8 را پیشنهاد کرده و برای تحقق شرط بازتابش امواج خورشیدی، ساختار براگ را بررسی و تحلیل نموده است.

واژه‌های کلیدی: سرمایه‌شعشعی، بازتابنده براگ، ماتریس انتقال

## ۱. مقدمه

توجه قرار گرفت و پس از آن ساختارهای سرمایه‌شعشعی متنوعی در پژوهش‌ها ارائه شد [۳-۵].

هر جسم دارای اثر سرمایه‌شعشعی باید همزمان دارای دو ویژگی باشد: (۱) ضریب بازتاب بالا در برابر امواج خورشید (طول موج ۰/۳ الی ۳ میکرومتر) و (۲) ضریب گسیل بالا در محدوده طول موج پنجره انتقال اتمسفر (۸ الی ۱۳ میکرومتر). هر جسمی با داشتن دو خاصیت مذکور، می‌تواند بصورت غیرفعال به دمایی کمتر از دمای همان جسم بدون دو خاصیت مذکور برسد که این امر می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی در فصول گرم سال شود. در ادامه به بررسی فیزیکی پدیده سرمایه‌شعشعی پرداخته و ساختار مورد نظر را از این منظر بررسی می‌نماییم.

مبادله حرارت یک جسم با محیط پیرامون به سه شیوه همرفتی، رسانشی و شعشعی امکان‌پذیر است. در دو شیوه نخست، انتقال حرارت متناسب با اختلاف دمای جسم و محیط است، درحالی‌که انتقال حرارت به روش شعشعی، طبق قانون استیفن-بولتزمن، با اختلاف توان چهارم دمای دو جسم رابطه دارد که این بیانگر اهمیت انتقال حرارت شعشعی است.

سرمایش شعشعی پدیده‌ای غیرفعال است که در آن جسم حرارت اضافی خود را از طریق شعشع به محیط بیرون خود می‌تبلاند. این پدیده گرچه از مدت‌ها قبل مورد بررسی بوده است [۱]، با انتشار مقاله [۲] در سال ۲۰۱۳، مجدداً در کانون

## ۲. امکان پدیده سرمایه‌شعشی

توانی که از ذرات اتمسفر با دمای  $T_{amb}$  به جسم می‌رسد با  $P_{atm}(T_{amb})$  نشان داده می‌شود و از رابطه

$$P_{atm}(T_{amb}) = A \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\theta \sin\theta \cos\theta \int_0^{\infty} d\lambda I_{BB}(T_{amb}, \lambda) \varepsilon_{atm}(\lambda, \theta, \varphi) \varepsilon(\lambda, \theta, \varphi) \quad (5)$$

حاصل می‌شود. در این رابطه  $\varepsilon_{atm}(\lambda, \theta, \varphi)$  ضریب گسیل اتمسفر است که با توجه به ناچیز فرض کردن ضریب بازتاب، می‌توان از تفاضل عدد یک از ضریب عبور آن را بدست آورد. ضریب عبور اتمسفر در نقاط مختلف کره زمین را می‌توان با محاسبه‌گرهای استاندارد (مانند ATRAN) بدست آورد [۷]. تبادل غیر تشعشی جسم (همرفتی و رسانشی) در رابطه (۱) با  $P_{non-rad}$  نمایش داده شده است و از رابطه

$$P_{non-rad} = Ah(T - T_{amb}) \quad (6)$$

بدست می‌آید که در آن  $h$  ضریب عبور حرارت غیر تشعشی است. اگر  $P_{net}$  عددی منفی باشد به معنی آن است که جسم از محیط اطراف انرژی دریافت می‌کند و باعث افزایش دمای جسم می‌شود. اگر  $P_{net}$  عددی مثبت باشد، جسم انرژی از دست می‌دهد و دمای آن کاهش می‌یابد که به این پدیده اصطلاحاً سرمایه‌شعشی گفته می‌شود. برای نشان دادن امکان سرمایه‌شعشی، رابطه (۱) را برای سه جسم فرضی محاسبه می‌کنیم. شکل ۱ الف نمودار طیف ضریب گسیل این سه جسم را در همه جهات نشان می‌دهد. با فرض ضریب عبور صفر، ضرایب گسیل برای اجسام مذکور مطابق آنچه بیان شد، بدست می‌آید. مطابق روابط (۱) تا (۶)، برای این سه جسم در نرم‌افزار Matlab محاسبه شده و در شکل ۱ ب بر حسب دما  $(T)$  نمایش داده شده است. محل برخورد منحنی  $P_{net}$  با صفر، نمایانگر دمای تعادل ساختار است که در جدول ۱ آورده شده

هر جسم در دمای  $T$  و با ضریب گسیل  $\varepsilon(\lambda, \theta, \varphi)$  با محیط پیرامون خود، شامل اتمسفر با دمای  $T_{amb}$  و خورشید، در طول موج  $\lambda$  و در جهت  $(\theta, \varphi)$  تبادل حرارت می‌کند. برآیند این مبادلات را توان خالص نامیده ( $P_{net}$ ) که از رابطه

$$P_{net}(T) = P_{rad}(T) - P_{Sun} - P_{atm}(T_{amb}) - P_{non-rad} \quad (1)$$

بدست می‌آید. در این رابطه  $P_{rad}$  توانی است که از جسمی با مساحت  $A$  و دمای  $T$  در فضای نیم‌کره بالاسر و در تمام طول موج‌ها تشعشع می‌شود و از رابطه

$$P_{rad}(T) = A \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} d\theta \sin\theta \cos\theta \int_0^{\infty} d\lambda I_{BB}(T, \lambda) \varepsilon(\lambda, \theta, \varphi) \quad (2)$$

بدست می‌آید که در آن  $I_{BB}(T, \lambda)$  توانی است که از یک جسم سیاه در دمای  $T$  و طول موج  $\lambda$  ساطع می‌شود و از قانون پلانک یعنی

$$I_{BB}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1} \quad (3)$$

محاسبه می‌شود [۲]. لازم به ذکر است  $h$  ثابت پلانک،  $k_B$  ثابت بولتزمن و  $c$  سرعت نور در محیط است. گفتنی است که جسم سیاه دارای ضریب گسیل یک در همه جهات و همه طول موج‌ها است و این جسم فرضی، معیاری برای سنجش ضریب گسیل اجسام دیگر می‌باشد. در رابطه (۱)،  $P_{Sun}$  توانی است که از خورشید به جسم می‌رسد و از رابطه

$$P_{Sun} = A \int_0^{\infty} d\lambda I_{AM1.5}(\lambda) \varepsilon(\lambda, 0, 0) \quad (4)$$

بدست می‌آید که در آن  $I_{AM1.5}(\lambda)$  طیف تشعشع دریافتی خورشید طبق داده‌های استاندارد است [۶، ۲]. در رابطه (۱)

### ۳. ارائه ساختار چند لایه جهت سرمایش تشعشعی

در این بخش به بررسی یک ساختار چندلایه که دارای اثر سرمایش تشعشعی باشد، می‌پردازیم. ساختار ایده‌آل مدنظر باید به گونه‌ای باشد که لایه‌ی زیرین دارای بازتاب مناسب در بازه

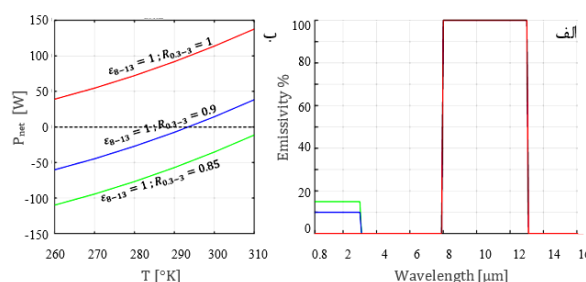


شکل ۲. ساختار سرمایش تشعشعی چندلایه

طول موجی ۰/۳ الی ۳ میکرومتر باشد و لایه‌های بالایی نیز دارای دو شرط: (۱) شفافیت در ناحیه امواج خورشیدی و (۲) داشتن ضریب گسیل زیاد در ناحیه پنجره انتقال اتمسفر باشند (شکل ۲). در این شرایط امواج با طول موج ۰/۳ الی ۳ میکرومتر با برخورد به جسم، از لایه بالایی عبور کرده و به لایه بازتابنده می‌رسد و با بازتاب از این لایه، به محیط بازگردانده می‌شود. همچنین لایه بالایی انرژی حرارتی خود را به طور حداکثری، به محیط بیرون گسیل می‌کند [۸].

طبق قانون تابش حرارتی کیرشهف، در تعادل حرارتی، ضریب جذب یک جسم در یک طول موج و جهت مشخص با ضریب گسیل آن در همان طول موج و جهت برابر است [۹]. بنابراین، استفاده از مواد شفاف در برابر امواج خورشیدی که قسمت موهومی ضریب شکست مختلط  $(n - jk)$  آن‌ها عدد قابل توجهی در ناحیه فروسرخ باشد، می‌تواند به عنوان ایده اولیه تحقق گسیل‌کننده مناسب در پنجره انتقال اتمسفر، مورد توجه قرار گیرد. یکی از این مواد، فوتورزیست منفی SU-8 است.

SU-8 به علت قابلیت مسطح سازی و پوشش دهی مناسب، برای ساخت ساختارهای عمیق و تناوبی مورد اقبال است. این ماده به علت پایداری شیمیایی و استحکام مکانیکی می‌تواند به تنهایی به عنوان لایه پوششی روی ساختار بماند و جزئی از ساختار باشد [۱۰]. در ادامه سعی در طراحی یک بازتابنده مناسب برای امواج خورشیدی داریم.



شکل ۱. الف) ضریب گسیل سه ساختار فرضی با بازتاب ۱۰٪، ۹۰٪ و ۸۵٪ در بازه امواج با طول موج ۰/۳ الی ۳ میکرومتر و ضریب گسیل ۱۰۰٪ در طول موج ۸ الی ۱۳ میکرومتر. ب) توان خالص سه ساختار ارائه شده در نمودار الف. فرض شده است که گرمای غیرتشعشعی صفر است ( $h = 0$ ). توجه شود که محل تلاقی توان سرمایشی با خط چین صفر، دمای تعادل را بدست می‌دهد (دمای محیط ثابت و برابر ۳۰۰ درجه کلون است).

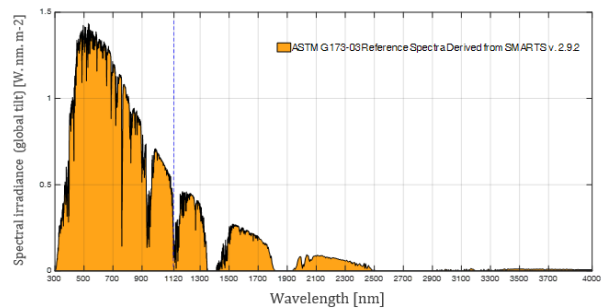
جدول ۱. مقایسه دمای تعادل سه ساختار فرضی شکل ۱

شرایط ساختار فرضی	دمای تعادل (درجه کلون)
$\epsilon_{8-13} = 1; R_{0.3-3} = 1$	کمتر از ۲۶۰
$\epsilon_{8-13} = 1; R_{0.3-3} = 0.9$	۲۹۳
$\epsilon_{8-13} = 1; R_{0.3-3} = 0.85$	بالتر از ۳۱۰

است. ملاحظه می‌شود که هرچه ضریب بازتاب جسم در محدوده امواج خورشیدی بیشتر باشد، حرارت کمتری جذب ساختار شده و در نتیجه دمای تعادل جسم کمتر می‌شود. این نشان می‌دهد که اگر سطحی با بازتاب بالا (در محدوده امواج خورشیدی) روی جسمی قرار دهیم، می‌تواند باعث کاهش دمای آن جسم شود. لازم به ذکر است در محاسبه  $P_{net}$  فرض شده است که تبادل حرارتی غیرتشعشعی ناچیز است ( $h = 0$ ) و دمای اتمسفر ثابت و برابر ۳۰۰ درجه کلون است. همچنین  $\epsilon_{atm}(\lambda, \theta, \varphi)$  در نقطه مشاهده با شرایط مشابه تهران (ارتفاع از سطح دریا ۴۵۳۸ فوت، عرض جغرافیایی ۳۹ درجه و مقدار بخار آب صفر) از محاسبه گر ATRAN استخراج شده است [۷].

#### ۴. طراحی بازتابنده مناسب برای امواج خورشیدی

در این بخش سعی داریم تا با روش‌های رلیج در الکترومغناطیس، یک بازتابنده مناسب در محدوده طول موج خورشیدی طراحی کنیم. برای سادگی طراحی، بازه طول موج طراحی را محدود می‌کنیم. بدین منظور، هدف طراحی را طول موج  $0.3$  الی  $1/12$  میکرومتر قرار می‌دهیم چون  $85/5\%$  از توان خورشید در این بازه متمرکز شده است (شکل ۳). در ادامه با روش براگ سعی در طراحی یک بازتابنده خوب در محدوده ذکر شده هستیم.

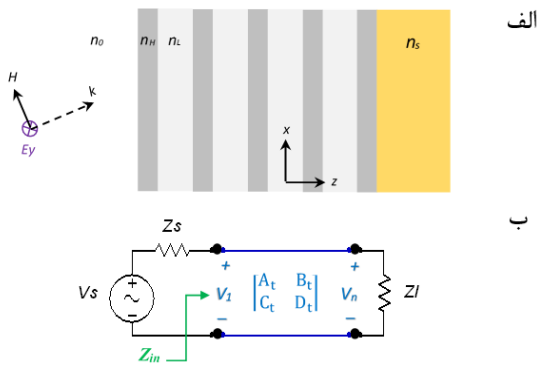


شکل ۳. شدت طیفی تابش خورشید پس از عبور از اتمسفر [۱۱].

#### ۵. بازتابنده براگ<sup>۱</sup>

بازتابنده براگ از  $N$  لایه‌های نازک که معمولاً متناوب هستند تشکیل می‌شود. این ساختار از جفت لایه دی‌الکتریک با ضریب شکست  $n_L$  و  $n_H$  تشکیل شده است که  $n_H > n_L$  است. لایه‌ها، به ترتیب، دارای ضخامت  $d_L$  و  $d_H$  است که روی یک زیرلایه با ضریب شکست  $n_s$  قرار گرفته است. همچنین لایه اول و آخر باید دارای ضریب شکست  $n_H$  باشد و در نتیجه تعداد لایه‌ها فرد است (شکل ۴ الف). با طراحی مناسب موج‌های عبوری از ساختار بر هم تاثیر مخرب می‌گذارند و در نتیجه ضریب عبور ساختار صفر و بازتاب برابر با یک می‌شود (ضریب جذب لایه‌ها را صفر فرض کردیم). در ادامه یکی از روش‌های تحلیل بازتابنده براگ را معرفی می‌کنیم و سپس سعی داریم با استفاده از این روش، یک بازتابنده خوب برای هدف

سرمایش تشعشعی طراحی کنیم. با توجه به توان بالای امواج خورشیدی در طول موج  $0.55$  میکرومتر، در طراحی‌ها آن را به عنوان طول موج مرکزی بازتابنده اختیار می‌کنیم.



شکل ۴. الف. بازتابنده براگ متشکل از  $N$  لایه‌ی متناوب  $n_L$  و  $n_H$  که روی زیرلایه  $n_s$  قرار دارد. ب. خط انتقال معادل بازتابنده براگ

#### ۱.۵. تحلیل بازتابنده براگ

یکی از روش‌های تحلیل بازتابنده براگ، روش ماتریس انتقال است. در این روش، هر لایه معادل یک خط انتقال در نظر گرفته می‌شود که در آن برای قطبش  $TM_y$ ، میدان‌های عرضی  $E_y$  و  $H_x$  معادل ولتاژ و جریان خط انتقال است. به علت پیوستگی میدان‌های عرضی در مرزها، این خطوط انتقال بصورت زنجیره‌ای به هم متصل می‌شود و بنابراین بررسی انتشار موج در بازتابنده براگ معادل حل یک مدار متشکل از خطوط انتقال است. جهت حل خط انتقال، برای هر لایه یک ماتریس انتقال با تعریف

$$Z_s = \frac{\omega\mu}{\sqrt{k_0^2 n_0^2 - k_x^2}} \quad (7)$$

در نظر می‌گیریم که این ماتریس بصورت

$$\begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta_i l_i & jZ_{C_i} \sin \beta_i l_i \\ \frac{j}{Z_{C_i}} \sin \beta_i l_i & \cos \beta_i l_i \end{pmatrix} \quad (8)$$

<sup>1</sup> Bragg reflector

است که در آن

$$\beta_i = \sqrt{k_0^2 n_i^2 - k_x^2}; Z_{C_i} = \frac{\omega \mu}{\beta_i} \quad (9)$$

است. در رابطه ۹،  $n_i$  ضریب شکست لایه مورد بررسی،  $k_x$  مولفه مماسی بردار موج تابشی ( $k_x = k_0 n_0 \sin \alpha$ )،  $n_0$  ضریب شکست محیط تابش (که معمولاً هوا است) و  $\alpha$  زاویه بردار موج با خط قائم بر ساختار است. به علت زنجیره‌ای بودن اتصال خطوط، موج خروجی (لایه  $N$ ) و ورودی (لایه ۱) با ماتریس انتقال بصورت

$$\begin{pmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_N \\ I_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

ارتباط داده می‌شود که در آن

$$\begin{pmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \dots \begin{pmatrix} A_{N-1} & B_{N-1} \\ C_{N-1} & D_{N-1} \end{pmatrix} \quad (11)$$

است. بنابراین مدار معادل ساختار براگ به شکل ۴ ب در می‌آید که  $Z_s$  و  $Z_l$  امپدانس مشخصه مربوط به زیرلایه و محیط موج تابشی است. با معادل‌سازی انجام شده، بازتاب توان<sup>۱</sup> از سطح ساختار به راحتی از رابطه

$$\Gamma = \left| \frac{Z_{in} - Z_s}{Z_{in} + Z_s} \right|^2 \quad (12)$$

بدست می‌آید که در آن  $Z_{in}$  (امپدانس معادل ساختار براگ) و

$Z_s$  (امپدانس محیط تابش) بصورت

$$Z_{in} = \frac{A_t Z_l + B_t}{C_t Z_l + D_t} \quad (13)$$

$$Z_s = \frac{\omega \mu}{\sqrt{k_0^2 n_0^2 - k_x^2}}$$

بدست می‌آید.

## ۲.۵. شبیه سازی بازتابنده براگ

بر مبنای روش ماتریس انتقال، برای محاسبه بازتاب

ساختارهای براگ، برنامه ای در نرم افزار Matlab نوشته شد که در این برنامه، با دادن جنس، ضخامت و تعداد لایه‌ها، ضریب بازتاب را برای موج تخت تابشی با طول موج و زاویه تابش دلخواه محاسبه می‌کند.

زیرلایه را از جنس سیلیسیوم و لایه‌های فوق را متناوباً از جنس  $\text{TiO}_2$  و  $\text{SiO}_2$  در نظر گرفتیم. ملاک انتخاب این مواد اولاً در دسترس بودن و قابلیت لایه نشانی آنها، ثانیاً اختلاف بالای ضریب شکست آنها است. گفتنی است که در برنامه نوشته شده، ضریب شکست این مواد نسبت به طول موج ثابت برابر با میانگین ضریب شکست آنها در بازه طول موج ۰/۳ الی ۱/۱۲ میکرومتر بصورت ۳/۸، ۲/۴ و ۱/۴۵ در نظر گرفته شده است.

در ادامه دو متغیر  $d_L$  و  $d_H$  را جاروب می‌کنیم و برای هر حالت، بازتاب امواج خورشیدی (۰/۳ الی ۱/۱۲ میکرومتر) را از سطح ساختار محاسبه می‌کنیم. برای جاروب روی ضخامت لایه‌ها نیاز داریم که یک حدس اولیه مناسب داشته باشیم. برای پیشینه شدن بازتاب در طول موج  $\lambda_0$ ، ضخامت لایه‌ها باید ربع طول موج در دی‌الکتریک ( $\frac{\lambda_0}{4n}$ ) باشد. در این حالت امواج بازتابی عمدتاً بصورت هم فاز با یکدیگر جمع می‌شوند. به بیان دقیق‌تر، موج بازتابیده عمدتاً در یکی از دو حالت زیر در لایه‌ها طی طریق کرده است:

الف) طی کردن  $2m$  لایه به سمت +Z، بازتاب از لایه  $n_H$  و سپس طی کردن  $2m$  لایه به سمت -Z

ب) طی کردن  $2m+1$  لایه به سمت +Z، بازتاب از لایه  $n_L$  و سپس طی کردن  $2m+1$  لایه به سمت -Z

در حالت الف موج بازتابیده به میزان

$$2m \frac{\pi}{2} + \pi + 2m \frac{\pi}{2} = (2m+1)\pi$$

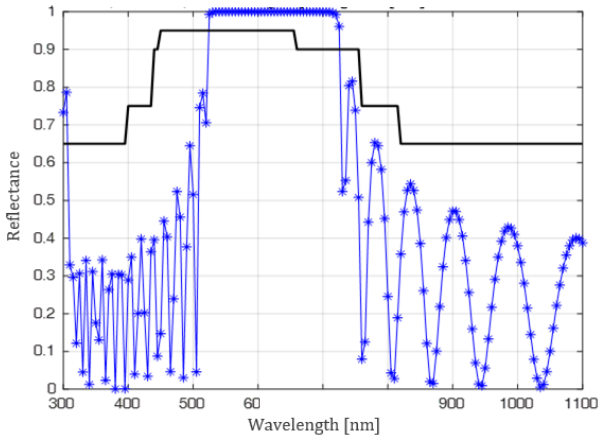
و همچنین در حالت ب موج بازتابیده به میزان

$$(2m+1) \frac{\pi}{2} + (2m+1) \frac{\pi}{2} = (2m+1)\pi$$

تغییر فاز داده است و در نتیجه امواج بازتابی عمدتاً بصورت سازنده با یکدیگر جمع می‌شوند که باعث بازتاب بالای سطح می‌شود.

<sup>1</sup> Reflectance

میکرومتر توسط ساختار براگ الف. ۵ لایه و ب. ۳۱ لایه.



شکل ۶. نمودار بازتاب ساختار براگ ۳۱ لایه در حالت بیشینه (  $n_H = 2.4, n_L = 1.45, d_H = 60nm, d_L = 110nm$  ) برحسب طول موج. پوش گسسته تشعشع امواج خورشیدی به رنگ سیاه ترسیم شده است.

جدول ۲. محاسبه بازتاب ساختارهای براگ با روش ماتریس انتقال

تعداد لایه ها (N)	ضخامت بهینه لایه $n_L$ [nm]	ضخامت بهینه لایه $n_H$ [nm]	بازتاب توان خورشید %
۵	۱۱۲/۵	۷۵	۵۰/۲
۱۱	۱۰۵	۸۵	۵۸/۱
۲۱	۱۱۰	۶۲/۵	۵۷/۵
۳۱	۱۱۰	۶۰	۵۸/۱

### ۶. نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا خواص یک ساختار با خاصیت سرمایش تشعشعی بررسی و تحلیل گردید و ضمن پیشنهاد فوتورزیست SU-8 برای لایه گسیل دهنده، در مورد استفاده از بازتابنده براگ تحقیق صورت گرفت. با روش ماتریس انتقال نشان داده شد که توانایی بازتابش بازتابنده براگ (با دو ماده معرفی شده) در برابر پرتو خورشید نهایتاً ۵۸٪ می شود. این بررسی منجر به ارائه نمودارهای سیستماتیک شکل ۵ شد که برای طراحی یک ساختار براگ سودمند است. همچنین دیده شد که در بازتابنده براگ بهینه، ضخامت لایه ها کمتر از ۲۰۰ نانومتر است که

با توضیحات گفته شده، با انتخاب طول موج ۵۵۰ نانومتر به عنوان طول موج مرکزی، ضخامت اولیه  $d_H$  و  $d_L$  را بصورت زیر انتخاب می کنیم:

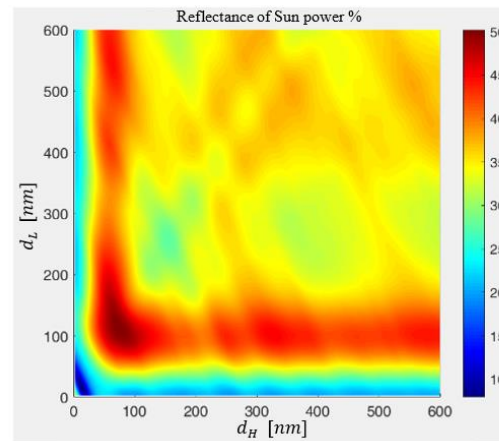
$$d_H = \frac{550}{2 \times 2.4} = 57.3nm$$

$$d_L = \frac{550}{4 \times 1.45} = 94.2nm$$

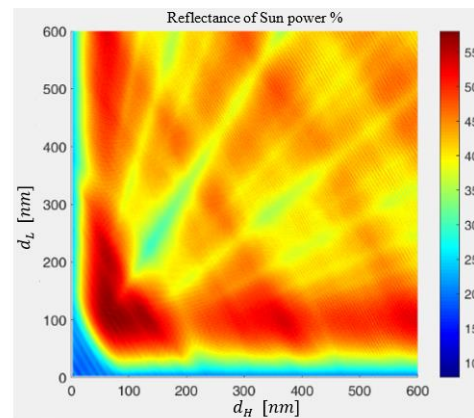
ضخامت زیر لایه که در واقعیت نسبت به طول موج خیلی زیاد است را بی نهایت فرض می کنیم.

در ادامه به ازای  $N \in \{5, 11, 21, 31\}$ ، ضخامت لایه ها را بین ۲/۵ تا ۶۰۰ نانومتر جاروب می کنیم و بازتاب امواج خورشیدی (با فرض زاویه تابش صفر درجه) را برای هر مورد میانگین گرفته و در شکل ۵ برای  $N \in \{5, 31\}$  ترسیم می کنیم. ابعاد ساختار با بازتاب بیشینه در هر نمودار، در جدول ۲ خلاصه شده است.

الف



ب



شکل ۵. میانگین بازتاب توان خورشید در بازه ۰/۳ الی ۱/۱۲

---

ساخت این بازتابنده‌ها را با پیچیدگی روبرو می‌سازد و این از چالش‌های مهم و عملی بازتابنده‌های براگ به شمار می‌رود.

## مراجع

- [1] Catalanotti et al., “The radiative cooling of selective surfaces,” *Sol. Energy*, vol. 17, pp. 83–89, 1975.
- [2] E. Rephaeli, A. Raman, and S. Fan, “Ultrabroadband photonic structures to achieve high-performance daytime radiative cooling,” *Nano Lett.*, vol. 13, pp. 1457–1461, 2013.
- [3] A. Raman, M. A. Anoma, L. Zhu, E. Rephaeli, and S. Fan, “Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight,” *Nature*, vol. 515, pp. 540–544, 2014.
- [4] Y. Zhai et al., “Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling,” *Science*, vol. 355, pp. 1062–1066, 2017.
- [5] J. Mandal et al., “Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling,” *Science*, vol. 362, pp. 315–319, 2018.
- [6] Reference Air Mass 1.5 Spectra, National Renewable Energy Laboratory. Accessed on: June 28, 2021. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>.
- [7] Web-based Input Form for ATRAN (Atmosphere Transmittance). Accessed on: June 28, 2021. [Online]. Available: <https://atran.arc.nasa.gov/cgi-bin/atran/atran.cgi>.
- [8] D. Zhao et al., “Radiative sky cooling: Fundamental principles, materials, and applications,” *Appl. Phys. Rev.* 6, 021306, 2019.
- [9] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York: JohnWiley & Sons., 2011.
- [10] A. del Campo, C. Greiner, “SU-8: a photoresist for high-aspect-ratio and 3D submicron lithography,” *J Micromech Microeng*; vol. 17, pp. 81–95, 2007.
- [11] *Reference Air Mass 1.5 Spectra*, National Renewable Energy Laboratory. Accessed on: June 28, 2021. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>.