

## حالت‌های مانا در انتقال حرارت تابشی میدان نزدیک برای دو تیغه موازی

سید کامیار توکلی<sup>۱</sup> و مولاداد نیکبخت<sup>۲</sup>

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان

پست الکترونیکی: mnik@znu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۰۹/۲۴)

### چکیده

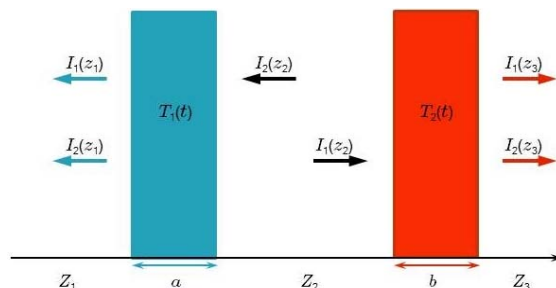
در این مقاله به بررسی دینامیک انتقال حرارت تابشی دو جسم تیغه‌ای شکل می‌پردازیم. در این سامانه‌ها با توجه به جنس تیغه‌ها و تعامل گرمایی که با محیط اطرافشان دارند، می‌توانند در فضای فاز دارای یک و یا چند حالت مانا باشند. مشاهده می‌شود که در این سامانه‌ها کمیت‌هایی مانند فاصله و ضخامت بر حالات مانای این سامانه‌ها تأثیر گذار است. نشان می‌دهیم که فاصله میان تیغه‌ها به مقدار زیادی در مدت زمان به تعادل رسیدن تیغه‌ها تأثیر گذار است. در سامانه‌هایی که یک حالت تعادل وجود دارد، صرف نظر از این که تیغه‌ها در چه شرایط اولیه‌ای باشند، به یک حالت تعادل نهایی میل می‌کنند. در اجسامی که گذار فاز در پاسخ اپتیکی آنها رخ می‌دهد سامانه می‌تواند با چند نقطه ثابت در فضای فاز همراه خواهد باشد. چنانچه فضای فاز این تیغه‌ها شامل چند نقطه ثابت باشد، حالت مانای نهایی توسط دمای اولیه تیغه‌ها مشخص خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** انتقال حرارت تابشی، دوپایایی، مواد دوفازی، حافظه حرارتی

### ۱. مقدمه

گرفته می‌شود. اما به طور تجربی و نظری ثابت شده است زمانی که فاصله دو جسم را کاهش دهیم (طوری که فاصله میان اجسام از طول موج حرارتی کوچک‌تر شود)، انتقال انرژی رفتاری کاملاً متفاوت به خود می‌گیرد. در این نوع انتقال حرارت تابشی که به اصطلاح انتقال حرارت میدان نزدیک گفته می‌شود، امواج میرا در انتقال حرارت بین دو جسم نقش مهمی ایفا می‌کنند و تابش حرارتی می‌تواند چند برابر بزرگ‌تر از تابش حرارتی بین دو جسم سیاه باشد [۱]. در انتقال حرارت میدان نزدیک، عوامل مختلفی مانند جفت‌شدگی مدهای سطحی (مانند فونون

کنترل شار حرارتی بین اجسام در فواصل بسیار کوچک توجه بسیاری از دانشمندان را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. اجسام به دلیل افت و خیز بارها، تابش حرارتی گسیل می‌کنند که این تابش عامل انتقال انرژی از جسمی به جسم دیگر خواهد بود. اگر فاصله میان اجسام بزرگ‌تر از طول موج حرارتی باشد، امواج میرا سهمی در انتقال انرژی بین دو جسم نخواهند داشت. در این حالت، انتقال انرژی بین دو جسم مستقل از فاصله است و تابش جسم سیاه بالاترین حد انتقال حرارت در نظر



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمایش شارهای تابش حرارتی برای ساختار تشکیل شده از دو تیغه.

دمایی که با یکدیگر دارند به تبادل انرژی گرمایی به شیوه تابش می پردازند. نحوه چیدمان تیغه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

متوسط بردار پوینتینگ به همراه نظریه افت و خیز- اتلاف این امکان را فراهم می آورد که سرمایش هر یک از اجسام و شار انرژی مبادله شده میان آنها را محاسبه کنیم. شار انرژی تابش حرارتی تیغه  $i$  ام در دمای  $T_i$  و در مکان دلخواه  $z_j$  به روش زیر به دست می آید:

$$I_i(z_j, T_i) = \sum_{s,p} \int \Theta(\omega, T_i) d\omega |k_{||} q(z_j, k_{||}, \omega) dk_{||}, \quad (1)$$

که در این رابطه،  $\theta(\omega, T) = \frac{\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{K_b T}\right) - 1}$ ،

نوسانگر پلانک، در دمای تعادل  $T$ ،  $K_b$  ثابت بولتزمن و  $\hbar$  ثابت پلانک می باشد. در رابطه (۱)، مؤلفه موازی بردار موج است. در این رابطه علامت سری مربوط به قطبش های  $s$  و  $p$  است.  $q(z_j, k_{||}, \omega)$  احتمال انتقال حرارت در نقطه دلخواه  $z$  را نشان می دهد. روابط احتمال انتقال حرارت برای تیغه دوم برای امواج انتشاری ( $k_{||} < \omega/c$ ) به شکل زیر است:

$$q_1(z_1, k_{||}, \omega) = \frac{(1 - |R_1|^2)(1 - |R_2|^2 - |T_1|^2)}{|1 - R_1 R_2 A_1|^2}, \quad (2)$$

$$q_1(z_2, k_{||}, \omega) = \frac{|T_1|^2 (1 - |R_1|^2 - |T_1|^2)}{|1 - R_1 R_2 A_1|^2}, \quad (3)$$

$$q_2(z_2, k_{||}, \omega) = \frac{(1 - |R_2|^2)(1 - |R_1|^2 - |T_1|^2)}{|1 - R_1 R_2 A_1|^2}, \quad (4)$$

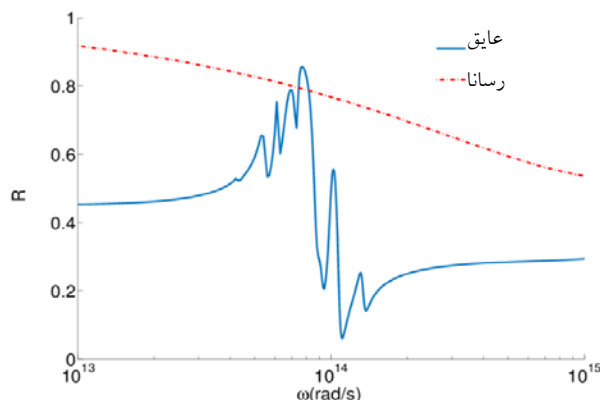
پلاریتون های سطحی و پلاسمون پلاریتون های سطحی (سهام عمده ای در افزایش انتقال حرارتی بین اجسام دارند [۲]). این امواج سطحی، امواج میرایی هستند که در امتداد فصل مشترک انتشار می یابند و کاربردهای مانند افزایش حساسیت سطحی اندازه گیری طیف سنج ها دارند [۳]. جفت شدگی مدهای سطحی به مقدار زیادی به فاصله و ضخامت تیغه ها از یکدیگر وابسته است. برای سامانه های دوجسمی، جنس اجسام اهمیت به سزایی دارند [۴]. با استفاده از موادی که همراه با انتقال عایق به فلز است، می توان مدارهای گرمایی متفاوتی از جمله دیود گرمایی [۵]، حافظه حرارتی [۶ و ۷] و ... جهت کنترل شار حرارتی طراحی کرد.

در این مقاله ابتدا روابط نظری مربوط به اتلاف توان تیغه ها را معرفی کرده و سپس با استفاده از روابط و معادله انرژی به بررسی تحول دمایی سامانه می پردازیم و حالت های مانا در این سامانه ها را به دست می آوریم. سپس با استفاده از مفهوم دویابایی انتقال حرارت تابشی، به بررسی حافظه حرارتی می پردازیم.

## ۲. معرفی ساختار و روابط نظری در انتقال حرارت

### تابشی میدان نزدیک

سامانه ای در نظر می گیریم متشکل از دو تیغه موازی، یکی با ضخامت  $a$  و دیگری با ضخامت  $b$  که در فاصله  $L$  از یکدیگر قرار دارند. تیغه اول دارای دمای  $T_1$  است و تیغه دوم دارای دمای  $T_2$  است. باید اشاره کرد که، توزیع گرما در داخل تیغه ها همگن است. این دو تیغه به دلیل اختلاف



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) ضریب بازتاب برای فرود عمود در فصل مشترک خلأ و وانادیوم دی‌اکسید در حالت فلز (نمودار قرمز) و عایق (نمودار آبی) بر حسب بسامد.

$$q_{\parallel}(z_{\parallel}, k_{\parallel}, \omega) = \frac{\left[ (1 - |r_{\parallel}|^2) \left( |R_{\parallel}^-|^2 |A_{\parallel}|^2 + 1 \right) (1 - |A_{\parallel}|^2) - 2 \operatorname{Im} \left( r_{\parallel} \operatorname{Im} \left( R_{\parallel}^- \left( A_{\parallel}^* - |A_{\parallel}|^2 \right) \right) \right) \right]}{|1 - R_{\parallel}^- r_{\parallel} A_{\parallel}^*|^2} \quad (5)$$

اگر فرض کنیم دو تیغه با دماهای اولیه  $T_1$  و  $T_2$  داریم. گسیل گرما از تیغه ۱، توسط تیغه دوم جذب می‌شود، در نتیجه دمای تیغه دوم عوض می‌شود. دمای تیغه دوم که تغییر می‌کند، این تیغه شروع به گسیل و از دست دادن انرژی می‌کند. زمانی که تابش حرارتی از تیغه دوم برابر با جذب تابش از تیغه ۱ می‌شود، دمای تیغه دوم ثابت می‌شود.

سامانه‌ای تشکیل شده از یک صفحه نیمه بی‌نهایت از جنس سیلیکون دی‌اکسید ( $\text{SiO}_2$ ) و تیغه‌ای از جنس وانادیوم دی‌اکسید ( $\text{VO}_2$ ) در نظر می‌گیریم. وانادیوم دی‌اکسید ماده‌ای است که در دمای بحرانی  $340^\circ\text{C}$  درجه کلونین، گذار عایق به فلز در آن اتفاق می‌افتد [۹]. عبور و بازتاب از این ماده در طرفین این دمای بحرانی بسیار با هم متفاوت است. ضریب بازتاب مربوط به وانادیوم دی‌اکسید در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

انتخاب سیلیکون دی‌اکسید به دلیل جفت‌شدگی مدهای سطحی‌اش با وانادیوم دی‌اکسید در حالت عایق در محدوده بسامدی مورد نظر است. به منظور بررسی دینامیکی تیغه وانادیوم دی‌اکسید از معادله تعادل انرژی تابشی شروع می‌کنیم که به شکل زیر می‌باشد:

$$\rho_{\parallel} C_{\parallel} \frac{dT_{\parallel}}{dt} = I_{\text{in}} + I_{\text{out}} \quad (9)$$

و همچنین برای امواج میرا ( $k_{\parallel} > \omega/c$ ) داریم:

$$q_{\parallel}(z_{\parallel}, k_{\parallel}, \omega) = q_{\perp}(z_{\parallel}, k_{\parallel}, \omega) = \frac{\operatorname{Im}(R_{\parallel}) \operatorname{Im}(R_{\perp})}{|1 - R_{\parallel} R_{\perp} A_{\parallel}^*|^2} \quad (6)$$

$$q_{\parallel}(z_{\parallel}, k_{\parallel}, \omega) = q_{\perp}(z_{\parallel}, k_{\parallel}, \omega) = 0 \quad (7)$$

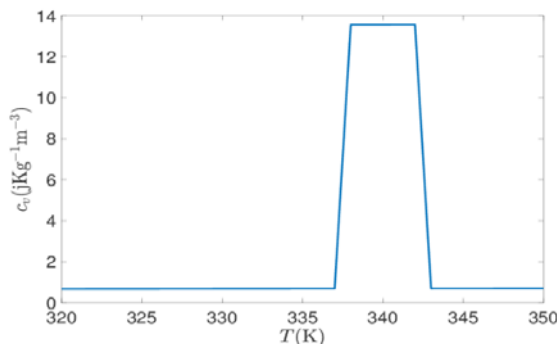
که در روابط بالا  $A_{\parallel} = e^{i\beta a}$ ،  $A_{\perp} = e^{i\beta L}$  و  $A_{\parallel} = e^{i\beta b}$  قرار داده‌ایم.  $\beta$  اندازه مؤلفه عمود بردار موج است که مقدار آن برای هر لایه متفاوت است. همچنین  $R_i$  و  $T_i$  ضرایب عبور و بازتاب تیغه  $i$  ام و  $R_{\parallel}^-$  برابر است با:

$$R_{\parallel}^- = \frac{(r_{\parallel} A_{\parallel}^* A_{\parallel}^* + r_{\parallel} r_{\parallel} r_{\parallel} A_{\parallel}^* + r_{\parallel} A_{\parallel}^* + r_{\parallel})}{(1 + r_{\parallel} r_{\parallel} A_{\parallel}^* + r_{\parallel} r_{\parallel} A_{\parallel}^* + r_{\parallel} r_{\parallel} A_{\parallel}^*)} \quad (8)$$

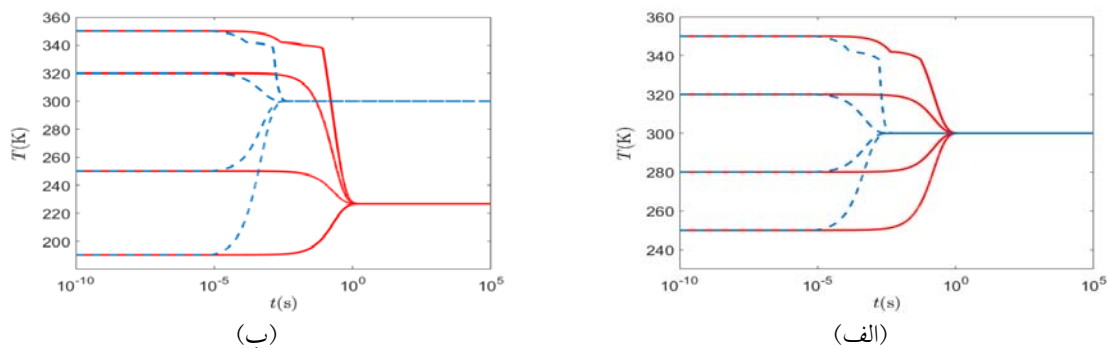
$r_{ij}$  ضریب بازتاب فرنل مربوط به فصل مشترک محیط  $i$  و  $j$  است. به همین طریق می‌توان با استفاده از ماتریس پراکندگی توان‌های ورودی و خروجی تیغه اول را محاسبه نمود [۷].

### ۳. دینامیک انتقال حرارت تابشی

مطالعه تحول دماها و حالات مانا در فضای فاز سامانه‌های دو جسمی تیغه‌ای، در چند سال اخیر توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است [۷ و ۸]. حالات مانا در واقع دمای تعادل تیغه‌ها هستند. برای دمای تعادل می‌توان این گونه توضیح داد



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) ظرفیت گرمایی وانادیوم دی اکسید بر حسب دما.



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شکل (الف) سامانه فاقد حمام گرمایی است. خط چین‌ها برای زمانی که وانادیوم دی اکسید و سیلیکون دی اکسید در فاصله ۵۰ نانومتر از هم قرار دارند را نشان می‌دهد و خط‌های توپر برای حالتی که در فاصله ۱۰۰ میکرومتر از هم قرار دارند است. شکل (ب) نشانگر حالتی است که تیغه وانادیوم دی اکسید با یک حمام گرمایی در دمای ۳۰۰ K در تعامل گرمایی است.

که در این رابطه،  $\rho$  مربوط به چگالی حجمی تیغه دوم و برابر با  $4/6 \text{ gr/cm}^3$  است. علاوه بر این، برای محاسبه شدت‌های انتقال حرارت ورودی و خروجی به تیغه دوم با توجه به شکل ۱، به صورت زیر است:

$$I_{in} = I_1(Z_p), \quad (10)$$

$$I_{out} = I_1(Z_p) + I_2(Z_p) + I_3(Z_p), \quad (11)$$

علاوه بر این برای محاسبه ظرفیت گرمایی وانادیوم دی اکسید، از مدل دمای استفاده شده است [۷]. مطابق با شکل ۳، این ظرفیت گرمایی به ویژه در محدوده دمای گذار فاز، وابستگی شدیدی به دما دارد که می‌توان به منظور محاسبه آن از گرمای نهان تغییر فاز استفاده کرد. در تحول دمایی وانادیوم دی اکسید، گرمای نهان تغییر فاز  $L = 51,49 \frac{J}{g}$  فرض شده است و ظرفیت گرمایی وانادیوم دی اکسید در بازه گرمایی ۳۳۸ تا ۳۴۲ با رابطه

به منظور بررسی تأثیر فاصله تیغه‌ها از یکدیگر بر تحول دمایی در سامانه، فرض می‌کنیم که دمای سیلیکون دی اکسید ثابت و برابر با ۳۰۰ کلوین باشد. ضخامت تیغه وانادیوم دی اکسید را ۵۰ نانومتر در نظر گرفته و تحول دمایی آن را برای دو فاصله ۱۰۰ میکرومتر و ۵۰ نانومتر بررسی می‌کنیم. با استفاده از معادلات (۱۰) و (۱۱) توان کل اتلاف شده در تیغه وانادیوم دی اکسید محاسبه و سپس با جایگذاری در معادله (۹) تحول زمانی تیغه وانادیوم دی اکسید حساب شده است. به این منظور با داشتن دمای اولیه برای این تیغه، دمای آن در زمان‌های بعدی را با استفاده از الگوریتم رانگ کوتا تطبیقی [۱۰] به دست آورده‌ایم.

در شکل ۴ (الف) اثر حمام گرمایی صرف نظر شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در وضعیتی که فاصله تیغه‌ها برابر با ۵۰ نانومتر است، زمانی از مرتبه چند میلی ثانیه

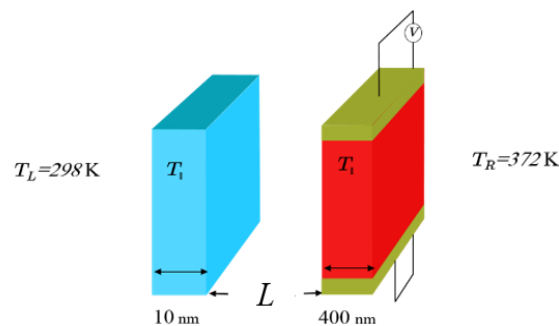
میکرومتر)، حمام گرمایی نقش اصلی در تحول دمایی تیغه‌ی وانادیوم دی‌اکسید را دارد و منجر به دمای نهایی ۳۰۰ کلوین برای این تیغه می‌شود. با توجه به نمودارهای شکل ۴، ذکر این نکته ضروری است که هر چند تحول دمایی تیغه‌ی وانادیوم دی‌اکسید به دمای اولیه آن وابسته است با این حال دمای نهایی آن (حالت مانا) مستقل از دمای اولیه بوده و صرفاً به مشخصه‌های فیزیکی سامانه بستگی دارد.

#### ۴. حافظه‌های حرارتی بر پایه‌ی دوپایایی در انتقال

##### حرارت تابشی

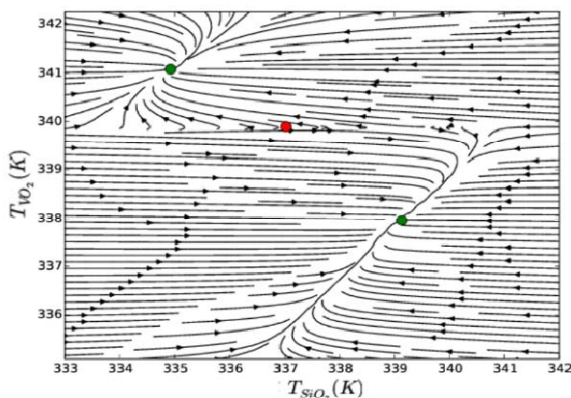
حافظه‌ی حرارتی به دستگاهی گفته می‌شود که در آن دوپایایی تابشی در آنها وجود داشته باشد. در حافظه‌ی حرارتی به ازای دو دمای خاص شار حرارتی خالص کل سامانه برابر صفر می‌شود [۱۰]. در شکل ۵ تیغه‌ی وانادیوم دی‌اکسید به ضخامت ۴۰۰ نانومتر و سیلیکون دی‌اکسید با ضخامت ۱۰ نانومتر در فاصله‌ی  $L$  از هم قرار دارند. هر کدام از تیغه‌ها در مجاورت یک حمام گرمایی هستند. گرمای جذب شده توسط تیغه‌ها از حمام از رابطه با  $I_i(z_r, T_R)$  و  $I_i(z_l, T_L)$  به دست می‌آید. دمای حمام سمت راست برابر با ۳۷۲ K و دمای حمام سمت چپ برابر ۲۹۸ K است. هر کدام از این حمام‌ها مانند یک جسم سیاه عمل می‌کنند و با هر دو تیغه گرما تبادل می‌کنند. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده با اعمال ولتاژ از طریق الکترودها، می‌توان به تیغه‌ی وانادیوم دی‌اکسید توان اضافه یا استخراج کرد.

ابتدا فرض می‌کنیم در این سامانه تیغه‌ی اول دی‌اکسید به فاصله‌ی ۵۰ میکرومتر از تیغه‌ی وانادیوم دی‌اکسید قرار دارد. به دلیل دور بودن اجسام از یکدیگر مدهای سطحی نقشی در انتقال حرارت ندارند. در نمودار فضای فاز که در شکل ۶ آورده شده است، مشاهده می‌شود که دو نقطه‌ی ثابت ایستا و یک نقطه‌ی ثابت زینی داریم. در این نمودار، پیکان‌ها نشان می‌دهند که سامانه در هر نقطه‌ای از این فضا باشد به این دو ثابت ایستا میل می‌کند. دماهای تعادل برای زمانی که وانادیوم دی‌اکسید در حالت عایق است، برابر با  $T_{SiO_2} = 321/433 K$  و  $T_{VO_2} = 337/572 K$  می‌باشد. هنگامی که وانادیوم دی‌اکسید در حالت فلزی باشد

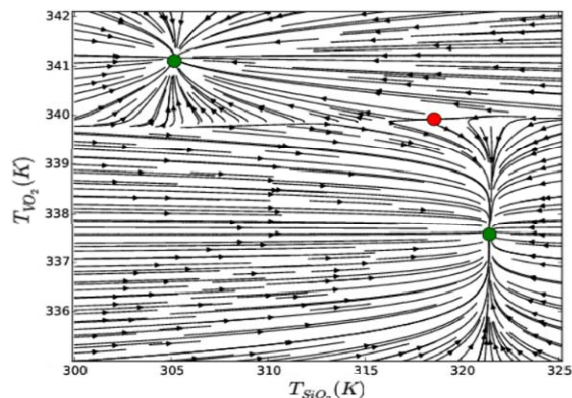


شکل ۵. (رنگی در نسخه‌ی الکترونیکی) نمایش حافظه‌ی حرارتی. هر کدام از تیغه‌ها در مجاورت یک حمام گرمایی قرار دارند. می‌توان با اعمال ولتاژ به تیغه‌ی وانادیوم دی‌اکسید توان خارجی را اعمال کرد.

طول می‌کشد که تیغه‌ی وانادیوم دی‌اکسید به دمای تعادلی ۳۰۰ K برسد. در مقابل با افزایش فاصله‌ی بین دو تیغه (فاصله‌ی ۱۰۰ میکرومتر) دمای تعادل تیغه‌ی وانادیوم دی‌اکسید برابر با ۲۲۵ K است و مدت زمان لازم برای رسیدن به این دما از مرتبه‌ی ثانیه است. از آنجایی که با افزایش فاصله‌ی میان تیغه‌ها، انتقال حرارت از رژیم میدان نزدیک به میدان دور تغییر می‌کند [۷]، کاهش انتقال حرارت میان تیغه‌ها و برهم‌کنش تیغه‌ها در رژیم میدان دور را می‌توان عامل افزایش زمان رسیدن به دمای تعادل در سامانه دانست. شایان ذکر است که افزایش زمان رسیدن به دمای تعادل، برای سامانه‌هایی که دمای هر دو تیغه هم‌زمان متغیر هستند نیز در مرجع [۱۰] بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در رژیم میدان دور، زمان رسیدن به حالت مانای سامانه به چند ده ثانیه می‌رسد. شکل ۴ (ب)، برای حالتی که تیغه‌ی وانادیوم دی‌اکسید با یک حمام گرمایی با دمای ۳۰۰ K در تعامل گرمایی است، رسم شده است. در حضور حمام گرمایی، تیغه‌ی وانادیوم دی‌اکسید گرمای  $I_i(z_r, T_R)$  را از حمام دریافت می‌کند. زمانی که تیغه‌ها در فاصله‌ی ۵۰ نانومتر از هم قرار دارند، سهم حمام گرمایی در تحول دمایی تیغه‌ی وانادیوم دی‌اکسید (که در برهم‌کنش میدان نزدیک با تیغه سیلیکون دی‌اکسید است) ناچیز است. دمای تعادلی ۳۰۰ کلوین برای تیغه‌ی وانادیوم دی‌اکسید، عمدتاً ناشی از قفل‌شدگی شدید آن با تیغه‌ی سیلیکون دی‌اکسید (که در دمای ۳۰۰ کلوین قرار دارد) می‌باشد. با دور کردن تیغه‌ها از یکدیگر (برای فاصله‌ی ۱۰۰



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) می‌توان دوپایایی برای زمانی که تیغه‌ها در فاصله ۵۰۰ نانومتر از هم قرار دارند مشاهده نمود ضخامت تیغه و انادیوم دی‌اکسید برابر با ۴۰۰ نانومتر و تیغه سیلیکون دی‌اکسید برابر با ۱۰ نانومتر است.



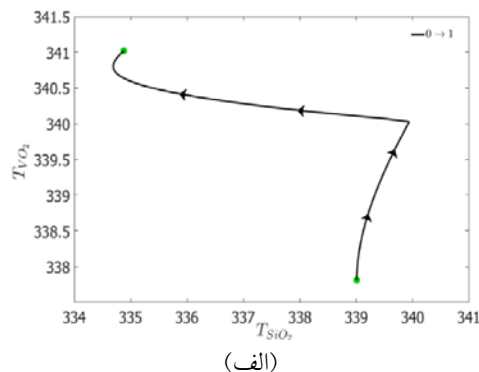
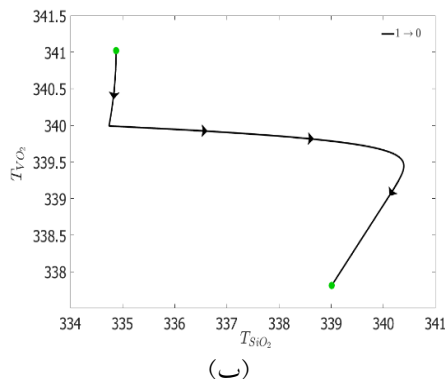
شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نقاط سبز رنگ نشان دهنده نقطه ثابت ایستا در سامانه است و همچنین نقطه قرمز نقطه ثابت زینی را نشان می‌دهد. می‌توان دوپایایی برای زمانی که تیغه‌ها در فاصله ۵۰۰ میکرومتر از هم قرار دارند مشاهده نمود ضخامت تیغه و انادیوم دی‌اکسید برابر با ۴۰۰ نانومتر و تیغه سیلیکون دی‌اکسید برابر با ۱۰ نانومتر است.

شکل ۶ با ۷ نشان می‌دهد که با کاهش فاصله تیغه‌ها، گذار از انتقال حرارت از رژیم «میدان دور» به انتقال حرارت در رژیم «میدان نزدیک» رخ می‌دهد. هر چند در رژیم میدان دور، مدت زمانی که طول می‌کشد تا سامانه به دماهای تعادلی نهایی برسد از مرتبه چند ثانیه است [۱۰]، به علت برهم‌کنش قوی میان تیغه‌ها در رژیم میدان نزدیک، زمان رسیدن به دمای تعادلی در این سامانه‌ها از مرتبه چند میلی‌ثانیه خواهد بود. از سویی دیگر، همان طور که از مقایسه شکل ۶ و ۷ دیده می‌شود، دماهای تعادلی سامانه برای انتقال حرارت در رژیم میدان نزدیک در مقایسه با دماهای آن در رژیم میدان دور، به یکدیگر نزدیک‌ترند. نزدیک شدن این دماها در فضای فاز، امکان جابه‌جا کردن سریع‌تر بین دو حالت در سامانه با برهم‌کنش در رژیم میدان نزدیک را فراهم می‌آورد.

با مشخص شدن این دماهای تعادل که نقطه ثابت ایستای سامانه هستند، می‌توانیم حالت صفر و حالت ۱ این حافظه حرارتی را تعریف کنیم. زمانی که انادیوم دی‌اکسید در حالت عایق باشد را حالت صفر و زمانی که در حالت فلزی باشد را حالت یک می‌نامیم. به منظور گذار بین این دو حالت نیاز داریم که به سامانه توان اضافه یا کم کنیم. با افزودن توان خارجی

برابر با  $T_{SiO_2} = 305/161 K$  و  $T_{VO_2} = 341/104 K$  است. در این حالت و انادیوم دی‌اکسید به دلیل خاصیت فلزی‌اش بازتاب دهنده است و به همین دلیل زمانی که در دمای بالاتر از ۳۴۰ درجه کلونین قرار دارد، حمام گرمایی مجاور و انادیوم دی‌اکسید، تأثیر به‌سزایی در دمای تعادل تیغه سیلیکون دی‌اکسید ندارد.

اکنون فاصله بین تیغه‌ها را کاهش داده و به بررسی حالتی که تیغه‌ها در نزدیکی یکدیگر قرار دارند می‌پردازیم. در این وضعیت برهم‌کنش تیغه‌ها در رژیم میدان نزدیک خواهد بود. ضخامت تیغه‌ها و دمای حمام‌ها را مانند وضعیت قبلی در نظر می‌گیریم و فقط فاصله بین دو تیغه را به ۵۰۰ نانومتر کاهش می‌دهیم. با حل معادلات تحول دمایی، دمای تیغه‌ها بر حسب زمان با استفاده از الگوریتم رانگ کوتا تطبیقی برای شرایط اولیه‌های مختلف برای دماها محاسبه شده است. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، دمای حالت مانای تیغه‌ها برای زمانی که و انادیوم دی‌اکسید در حالت عایق (دمای کمتر از ۳۴۰ K) است، برابر با  $T_{SiO_2} = 339/009 K$  و  $T_{VO_2} = 337/812 K$  کلونین هستند. از سویی دیگر، برای شرایطی که و انادیوم دی‌اکسید در حالت فلزی قرار دارد، دماهای تعادل برابر با  $T_{SiO_2} = 334/877 K$  و  $T_{VO_2} = 341/022 K$  می‌باشند. مقایسه



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شکل (الف) گذار از حالت صفر به یک با افزودن توان به تیغه و انادیوم‌دی‌اکسید (ب) گذار از حالت یک به صفر با گرفتن توان از تیغه و انادیوم‌دی‌اکسید.

زمانی که تیغه‌ها در فاصله‌ای کمتر از عمق نفوذ موج میرا از هم قرار دارند، زمان مشخصه برای رسیدن به حالت تعادل به فاصله دو جسم وابسته است. در چنین سامانه‌ای انتقال حرارت بین دو تیغه و دمای تعادل رسیدن تیغه‌ها بیشتر تحت تأثیر فاصله بین دو تیغه است. هنگامی که فاصله بین تیغه‌ها افزایش پیدا می‌کند تا زمانی که اثری از انتقال حرارت میدان نزدیک نباشد، انتقال حرارت میان تیغه‌ها به مقدار زیادی کاهش می‌یابد، در نتیجه مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا سامانه به تعادل برسد.

محاسبه انتقال حرارت تابشی بین دو تیغه سیلیکون دی‌اکسید و انادیوم دی‌اکسید نشان می‌دهد که با انتخاب پارامترهای مناسب امکان وجود دوپایایی در این سامانه‌ها می‌باشد. در چنین سامانه‌ای، برخلاف سامانه‌هایی که دارای یک حالت تعادل می‌باشند، دمای تعادلی نهایی وابسته به شرایط اولیه دماهاست. با استفاده از این نتیجه می‌توان توسط عامل خارجی و اضافه کردن توان به تیغه و انادیوم دی‌اکسید بین حالت‌های مانای سامانه، شرایط دمایی سامانه و مسیر تحول دمایی تیغه‌ها را تغییر داد. چنین سامانه‌هایی می‌توانند اهمیت به‌سزایی در کنترل انتقال حرارت در دستگاه‌ها داشته باشند.

می‌توان از یک حوضه وارد حوضه دیگر شد و مقصد تحول دمایی تیغه‌ها را عوض کرد. در شکل ۸ جابه‌جایی بین این دو نقطه ثابت ایستا را مشاهده می‌شود.

در این شکل ابتدا فرض می‌کنیم که سامانه در حالت صفر (وانادیوم دی‌اکسید در حالت عایق) باشد. با دادن توان  $50 \text{ W/m}^2$  در مدت زمان  $0.05$  ثانیه می‌توان از نقطه ثابت اول وارد حوضه دیگر ( $T_{VO2} > 340 \text{ K}$ ) می‌شود و به دماهای تعادل بالایی رسید. این حالت مانند تغییر از حالت صفر به حالت یک است. این فرایند  $2/21$  ثانیه زمان می‌برد. سامانه می‌تواند برای مدتی دلخواه در حالت یک بماند و اطلاعات گرمایی را ذخیره کند. سپس با گرفتن توان  $50 \text{ W/m}^2$  در مدت زمان  $0.25$  ثانیه از تیغه و انادیوم دی‌اکسید، سامانه از حالت یک به حالت صفر برمی‌گردد. گذار از حالت ۱ به صفر به مدت  $4/78$  ثانیه طول می‌کشد.

### ۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق دینامیک انتقال حرارت تابشی بین دو تیغه از جنس سیلیکون دی‌اکسید و انادیوم دی‌اکسید بررسی شد.

### مراجع

2. M Francoeur, M P Menguc, and R Vaillon, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** (2010) 075501.

1. P Ben-Abdallah, K Joulain, J Drevillon, and G Domingues, *J. Appl. Phys.* **106** (2009) 044306.

6. S Dyakov, J Dai, M Yan, and M Qiu, *J. Phys. D Appl. Phys.* **48** (2015) 305104.
7. S A Dyakov, J Dai, M Yan, and M Qiu, *Phys. Rev.* **90** (2014) 045414.
8. S A Dyakov, J Dai, M Yan, and M Qiu, *Appl. Phys. Lett.* **106** (2015) 064103.
9. A S Barker, H W Verleur, and H J Guggenheim, *Phys. Rev. Lett.* **17** (1966) 1286.
10. V Kubytzkyi, S-A Biehs, and P Ben-Abdallah, *Phys. Rev. Lett.* **113** (2014) 074301.
۳. م شریفی، ع ح پاشایی، ح تجلی، و ع ر بهرامپور، مجله پژوهش فیزیک ایران ۱۶، ۲ (۱۳۹۵) ۱۳۳.
3. M Sharifi, H Pashaei Adl, H Tajalli, and A Bahrapour, *Iranian Journal of Physics Research* **16**, 2 (2016) 133.
4. Y Yang, S Basu, and L Wang, *Appl. Phys. Lett.* **103** (2013) 163101.
5. P Ben-Abdallah and S A Biehs, *Appl. Phys. Lett.* **103** (2013) 191907.