

وابستگی نیروی کاسیمیر در یک میکروسیستم سه لایه با ویژگی های اپتیکی و افت و خیزهای دمایی

مطهره عالی^۱، فاطمه تاجیک^۲

گروه فیزیک ماده چگال، دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

۱- دانش آموخته ی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک ماده چگال، دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران

Aali.mot1993@gmail.com

۲- استادیار، گروه ماده چگال، دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران

f.tajik@alzahra.ac.ir

چکیده

در این مقاله نیروی کاسیمیر بین دو صفحه موازی که فاقد هر گونه زبری هستند به روش لیفشیتز محاسبه و بررسی شده است که ویژگی های اپتیکی اجزای تشکیل دهنده ی سیستم و همچنین افت و خیزهای دمایی چگونه می توانند بر بزرگی و قدرت این نیرو موثر باشند. به منظور بررسی چگونگی تاثیر خواص نوری سیستم بر نیروی کاسیمیر، سیستم مورد مطالعه در این پژوهش متشکل از دو صفحه موازی و بدون زبری از جنس SiO_2 و SiC ، Au و همچنین برای ماده ی میانی بین صفحات از خلا، اتانول و کراسون استفاده کرده ایم. برای بررسی اثر افت و خیزهای دمایی نیز، سیستم را در دمای 300 K (دمای اتاق)، دمای 500 K (معیاری برای دمای بالا) و دمای 100 K (معیاری برای دمای پایین) مورد بررسی قرار داده ایم. بر اساس نتایج بدست آمده، هر چه رسانندگی صفحات سیستم بیشتر باشد، نیروی کاسیمیر قوی تر خواهد بود، اما با قرار دادن لایه ی میانی بین دو صفحه مشاهده شد که هر چه دی الکتریک ماده ی میانی قوی تر باشد، نیروی کاسیمیر کم تری را شاهد هستیم. همچنین در دماهای بالا اثر افت و خیزهای دمایی بسیار قوی می باشد. بر اساس نتایج افت و خیزهای دمایی کاملاً به خواص نوری سیستم وابسته است و نمی تواند به طور مستقل روی سیستم اثر گذارد.

کلمات کلیدی: افت و خیزهای دمایی، خواص اپتیکی، نظریه ی لیفشیتز، نیروی کاسیمیر

۱. مقدمه

امروزه ما شاهد پیشرفت روزافزون سیستم های نانو و میکروالکترومکانیکی در علم و فناوری هستیم. با ساخت و کنترل دستگاه هایی در مقیاس های کوچک تر، همه فناوری ها سود می برند. مزایای مورد انتظار شامل راندمان بیشتر و کاهش اندازه، کاهش مصرف برق و هزینه کمتر تولید در سیستم های الکترومکانیکی است. این وسایل در ارتباطات اپتیکی، شتاب دهنده ها، میکرو سوئیچ ها و بسیاری از تکنولوژی های دیگر کاربرد وسیعی دارند. هم زمان با این پیشرفت، اهمیت تاثیر نیروهای غیر قابل اجتناب در ابعاد بسیار کوچک برای ما آشکارتر می شود. نیروهای پراکندگی یکی از انواع نیرو های سطحی هستند که می توانند جهان میکروسکوپی را تحت تاثیر خود قرار دهد. این نیروها به طور ذاتی در اطراف ما حضور دارند و در فواصل کم تر از چند صد نانو متر بسیار قدرتمند می باشند. این اتفاق به آن دلیل است که هنگامی که دو جسم بسیار به هم نزدیک می شوند نسبت سطح به حجم که این دو جسم با هم پوشش می دهند، با کاهش یافتن فاصله آن ها بسیار افزایش می یابد [۱]. این افزایش سطح به حجم باعث مهم شدن شرایط مرزی می شود و شرایط مرزی بر روند موج الکترومغناطیس که قرار است در آن فضا منتشر شود حاکم است. در این شرایط اثر نیرو های پراکندگی به عنوان یک اثر کوانتومی بسیار تقویت می شود. از جمله این نیروها می توان به نیروی کاسیمیر اشاره کرد.

نخستین بار در سال ۱۹۴۸، هندریک کاسیمیر [۲]، فیزیکدان هلندی، نیروی بین دو صفحه موازی با سطح صاف (فاقد هر گونه زبری) که رسانای کامل در نظر گرفته بود را با رابطه $F^D = (\pi^2 \hbar c) / (240 d^4)$ در دمای صفر کلون محاسبه کرد؛ این نیرو به نام نیروی کاسیمیر نامگذاری شد. در این رابطه نیرو در واحد سطح بیان شده و d فاصله ی بین صفحات می باشد. همچنین c و $\hbar$ به ترتیب معرف سرعت نور و ثابت پلانک هستند. به دنبال مطالعات و محاسبات کاسیمیر، در دهه ی ۱۹۵۰، دانشمند روسی به نام لیفشیتز و همکارانش با استفاده از نظریه ی افت و خیز - اتلاف [۳] این نیرو را در حالت کلی تر و برای مواد واقعی در نظر گرفتند و به محاسبه ی نیروی کاسیمیر بین مواد حقیقی، با در نظر گرفتن اثرات برانگیختگی های دمایی [۴] پرداختند. بنابر این نظریه منبع تولید افت و خیز ذرات باردار و ایجاد جریان، موج الکترومغناطیس جذب شده در ماده می باشد. همچنین ویژگی های اتلافی صفحات از طریق جذب اپتیکی با استفاده از دو قطبی های میکروسکوپی وابسته به نوسانات امواج الکترومغناطیسی درون اجسام است.

نیروی کاسیمیر بین دو صفحه در خلا، در محدوده های نانو تا میکرو، همواره از جنس جاذبه می باشد. گاهی ممکن است قدرت این نیرو به اندازه ای باشد که با توجه به جنس جاذب بودن آن، منجر به کشانده شدن اجزای دستگاه به سمت یکدیگر شود. گاهی تحت شرایطی نیروی کاسیمیر می تواند، باعث چسبندگی دائم و بازگشت ناپذیر اجزای سیستم شود و این نقصی برای عملکرد دینامیکی سیستم به شمار می رود. پس با داشتن اطلاعات کافی در این زمینه می توان عملکرد و بازده این سیستم ها را افزایش داد. عوامل موثر در بزرگی و اندازه نیروی کاسیمیر عبارتند از: خواص اپتیکی، زبری سطح، افت و خیزهای دمایی، شکل هندسی ادوات [۵]. حضور یا تغییر هر یک از فاکتورها که برای سیستم ایده آل تعریف شده است، می تواند بزرگی و قدرت این نیرو را تغییر دهد. لازم است اشاره کنیم که تاثیر حاصل از تغییر هر کدام از فاکتور در محدوده ی مشخصی چشمگیر و قابل ملاحظه خواهد بود.

در این مطالعه به بررسی تاثیر ویژگی های اپتیکی اجزای میکروسیستم سه لایه در فواصل مختلف بر بزرگی نیروی کاسیمیر تولید شده در سیستم پرداخته شده است. همچنین مطالعه شده است که آیا ماده ی میانی صفحات با ویژگی های اپتیکی متفاوت، در یک میکروسیستم سه لایه می تواند بر بزرگی نیروی کاسیمیر تاثیرگذار باشد و این رفتار در فواصل مختلف صفحات و تغییر ویژگی های اپتیکی آن ها چگونه تغییر می کند. همینطور پاسخ به این پرسش بررسی شده است که اثر دما بر روند رشد این نیرو چگونه خواهد بود و آیا تاثیر افت و خیزهای دمایی در تمام فواصل یکسان است. همچنین

مطالعه شده است که افت و خیزهای دمایی با تغییر ویژگی های اپتیکی صفحات چگونه می تواند اثرات متفاوتی بر رفتار نیروی کاسیمیر داشته باشند.

۲. روش کار

محاسبه ی نیروی کاسیمیر

در این مطالعه نیروی کاسیمیر بین دو صفحه با استفاده از نظریه ی لیفشیتز محاسبه می شود. این نظریه، افت و خیز امواج الکترومغناطیسی بین اجسام ماکروسکوپی را بررسی می کند و از برهم کنش اجسام نشأت می گیرد. در این صورت نیروی بین دو جسم به تابع دی الکتریک آنها وابسته می باشد. نظریه ی لیفشیتز برای دو جسم موازی و در تمام محدوده های دمایی قابل استفاده است [۶-۸].

رابطه ی کلی که برای محاسبه ی نیروی کاسیمیر استفاده می شود به صورت $F_{cas}(z) = F^q(z) + F^{th}(z)$ می باشد؛ بخش اول این رابطه ($F^q(z)$) معرف بخش کوانتومی و نشأت گرفته از برهم کنش های نقطه ی صفر انرژی می باشد. در این بخش برانگیختگی های دمایی نقشی نخواهند داشت. در بخش دوم رابطه، ($F^{th}(z)$) نشانگر تاثیر افت و خیزهای دمایی در محاسبه ی نیروی کاسیمیر می باشد. از آنجا که نیرو، وابسته به هندسه سیستم می باشد، لازم است در ابتدا ذکر شود میکروسیستم مورد بررسی ما شامل دو صفحه موازی می باشد و هر کدام از صفحات فاقد هر گونه زبری در نظر گرفته شده اند. برای بررسی بهتر نیرو مفهوم فیزیکی فاکتور کاهش (η_{pp}) را تعریف می کنیم. در حقیقت η تقسیم نیروی محاسبه شده به روش لیفشیتز در واحد سطح بر قدیمی ترین رابطه ی کاسیمیر برای سیستم ایده ال (F^{ID}) می باشد:

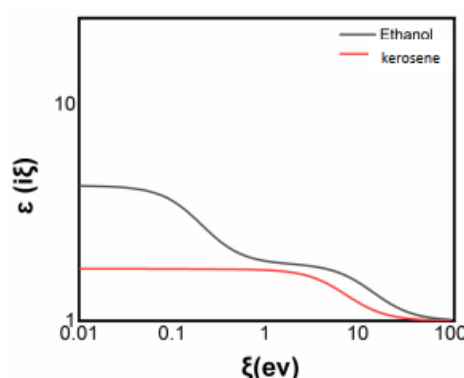
$$\eta_{pp}(z) = \frac{F(z)}{F^{ID}(z)} \quad (1)$$

در توصیف η باید گفت در مطالعات ما محدوده ی معتبر برای فاکتور کاهش بین صفر و یک می باشد ($0 < \eta < 1$). نزدیک شدن η به عدد یک به این مفهوم است که نیرو به حالت ایده آل نزدیک تر شده و این مساله نشان می دهد تاثیر فاکتور مورد مطالعه ضعیف شده و اثر آن کم تر می شود. همچنین هر چه η از عدد یک دورتر باشد، بدین معناست که بزرگی نیرو در سیستم از حالت ایده آل فاصله گرفته است.

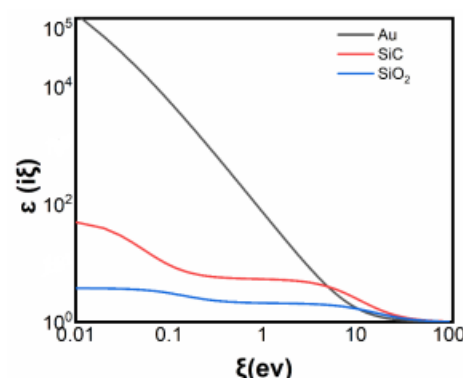
۲-۱ بررسی توابع دی الکتریک مورد مطالعه در این تحقیق

در این پژوهش نیروی کاسیمیر تولید شده در میکروسیستم مورد نظر با استفاده از نظریه ی لیفشیتز و با کدنویسی در برنامه متلب محاسبه شده است. در محاسبه ی نیروی کاسیمیر به روش لیفشیتز بخش موهومی تابع دی الکتریک از اهمیت بالایی برخوردار است. همان گونه که گفته شد سیستم مورد مطالعه متشکل از دو صفحه موازی و بدون زبری می باشد. به منظور پوشش محدوده ی وسیعی از خواص نوری جنس صفحات از طلا (Au)، سیلیکون کرباید (SiC) و سیلیکا یا شیشه (SiO_2) انتخاب شده است. همان طور که می دانیم Au رسانندگی بسیار بالایی دارد. رسانندگی بالای این ماده به دلیل حضور تعداد

زیادی الکترون آزاد در آن می باشد که باعث می شوند Au قدرت جذب بالایی داشته باشد. قدرت جذب بالا معرف قوی بودن بخش موهومی تابع دی الکتریک طلاست و به همین دلیل در مطالعات پیرامون نیروی کاسیمیر از Au بسیار استفاده می شود. SiC به خودی خود نارسناست و ماده ی مورد استفاده ی ما در این بررسی سیلیکون کربادی است که مقداری نیتروژن در آن تزریق شده است و به این دلیل رسانندگی کمی در آن به وجود آمده است این ماده در ساخت میکروادوات بسیار پر کاربرد است. ماده سوم مورد استفاده، SiO₂، نیز نارسناست. در این بخش تمام سیستم ها را در دمای ۳۰۰K (دمای اتاق) در نظر گرفته ایم. در مطالعات انجام شده لایه میانی هر یک از سیستم ها (فضای بین دو صفحه) در سه حالت پر شده توسط خلا و یا دی الکتریک های، اتانول و کراسون در نظر گرفته شده اند. علت انتخاب اتانول و کراسون در این بررسی به عنوان ماده ی دی الکتریک بین صفحات، اهمیت استفاده ی آن ها در صنعت و همچنین در دسترس بودن آن ها می باشد. به عنوان مثال کراسون پایه ی اصلی سیال های مغناطیسی می باشد [۴]. نیروی کاسیمیر در ابعاد نانو و میکرو غیر قابل حذف و چشم پوشی می باشد. نیروی جاذبه ی کاسیمیر بین اجزای سازنده ی نانو و میکروسیتسم ها می تواند باعث چسبندگی اجزا و اختلال در عملکرد سیستم شود. بنابراین نیروی دافعه ی کاسیمیر می تواند در بهبود عملکرد سیستم مفید بوده و مانع ایجاد اختلال در سیستم شود. اولین بار ماندی و همکارانش با آزمایشی که انجام دادند، توانستند نیروی کاسیمیر دافعه را مشاهده کنند. نیروی دافعه کاسیمیر به طور آزمایشی بین یک صفحه بزرگ از جنس SiO₂ و یک کره با قطر 39.8 μm که با لایه ای از طلا به ضخامت 100nm پوشیده شده و در مایع بروموبنزن که قطبی است و در ساختار آن الکترون آزاد است، انجام شده است [۹-۱۰]. مطالعات گذشته پیرامون نیروی کاسیمیر و آزمایش ها نشان داد که در سیستم شامل دو صفحه، یکی از جنس طلا و دیگری از جنس سیلیکا، با ماده ی میانی اتانول، نیروی دافعه ی کاسیمیر مشاهده می شود [۱۱]. از این رو استفاده از اتانول به عنوان ماده ی میانی در سیستم های تحت تاثیر نیروی کاسیمیر مورد توجه قرار گرفت. طبق مطالعات و بررسی های انجام شده نقطه جوش اتانول و کراسون به ترتیب ۳۵۱K و ۳۱۰K و نقطه ی انجماد اتانول و کراسون به ترتیب ۱۶۰K و ۲۲۶K است. دلیل انتخاب دمای اتاق در این بخش، محدودیت استفاده از اتانول و کراسون (به ویژه کراسون) در دماهای متفاوت از ۳۰۰K می باشد.



شکل ۲ قسمت موهومی تابع دی الکتریک بر حسب فرکانس موهومی برای دو ماده اتانول و کراسون



شکل ۱ قسمت موهومی تابع دی الکتریک بر حسب فرکانس موهومی برای سه ماده Au، SiC و SiO₂

همان طور که در شکل (۱) مشاهده می شود، مقدار $\epsilon_2(\xi)$ که معرف بخش موهومی تابع دی الکتریک است، برای Au بسیار قوی است. این موضوع به دلیل رسانندگی زیاد Au و قدرت بالای بخش موهومی تابع دی الکتریک این ماده

است. به عبارت دیگر به دلیل حضور الکترون های آزاد در Au قدرت جذب (اتلاف) در آن زیاد است و Au آماده ی پذیرش امواج الکترومغناطیس می باشد و افت و خیز ناشی از جذب در سیستم بالا می رود. این فاکتور برای SiC کم تر از Au است و نشان می دهد این سیستم از نوع دی الکتریک است و ما شاهد حضور الکترون آزاد نیستیم؛ بلکه جذب منجر به پلاریزه ی سیستم و افت و خیز می شود. در SiC جذب (اتلاف) کم تری نسبت به Au را شاهد هستیم. در مورد SiO_2 نیز مشاهده می شود که مقدار $\epsilon(i\xi)$ از عدد یک فاصله زیادی نمی گیرد. زیرا این ماده نارسا است و فاقد الکترون آزاد می باشد و الکترون های مقید آن بستگی بسیار بالایی به هسته دارند، بنابراین قدرت جذب ناچیزی دارد. تمایز سه نمودار از ابتدا تا حدود $1\text{ev} \approx \xi$ کاملاً واضح است. در مورد پاسخ فرکانسی مغناطیسی هر سه ماده باید گفت آن ها مواد غیر مغناطیسی هستند و در تمام محدوده های فرکانسی $\mu(\omega)=1$ در نظر گرفته شده است.

۲-۲ محاسبه ی نیرو

برای محاسبه ی نیرو به روش لیفشیتز، برای سیستم های مورد بررسی، با داشتن تابع دی الکتریک صفحات ϵ_1 و ϵ_2 (با توجه به یکسان بودن جنس صفحات $\epsilon_1 = \epsilon_2$) و دی الکتریک ماده ی میانی ϵ_0 ، همچنین بردار (k_0) ، بردار موج ماده ی میانی که بر دو صفحه عمود است، بردار موج صفحات $(k_1$ و $k_2)$ را با رابطه ی زیر محاسبه می کنیم:

$$k_i = \sqrt{\frac{(\epsilon_i - \epsilon_0) \cdot \xi^2}{c^2} + k_0^2} \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

در این رابطه ξ فرکانس ماتسوبارا، c سرعت نور و d فاصله ی بین صفحات می باشد. ضرایب بازتاب موج از صفحات نیز به صورت زیر خواهند بود:

$$r_i^s = \frac{k_0 - k_i}{k_0 + k_i} \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

$$r_i^p = \frac{\epsilon_i k_0 - \epsilon_0 k_i}{\epsilon_i k_0 + \epsilon_0 k_i} \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

با محاسبه بردارهای موج و ضرایب بازتاب، تابع توصیف کننده بازتاب های متوالی را خواهیم داشت [۱۴-۱۲]:

$$g_s = \frac{r_{1s} r_{2s} e^{-2k_0 d}}{1 - r_{1s} r_{2s} e^{-2k_0 d}} \quad (5)$$

$$g_p = \frac{r_{1p} r_{2p} e^{-2k_0 d}}{1 - r_{1p} r_{2p} e^{-2k_0 d}} \quad (6)$$

$$g = g_s + g_p \quad (7)$$

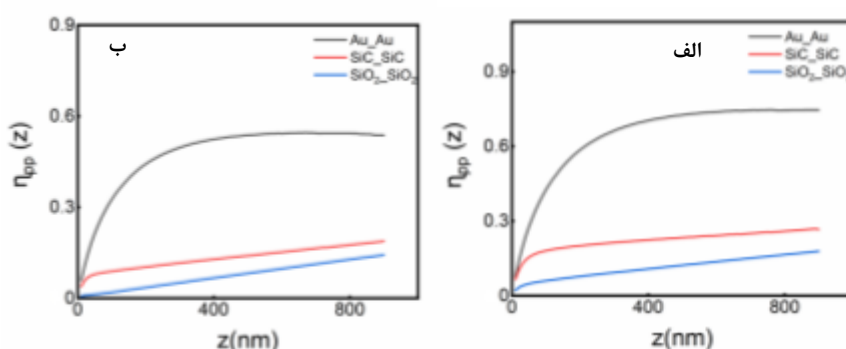
در نهایت نیرو با رابطه ی زیر برای فواصل مختلف بین دو صفحه با دی الکتریک خاص خودشان و در دمای محیط قرار داده شده محاسبه می شود :

$$F(T, d) = \frac{k_b T}{n} \sum_{n=0}^{\infty} (\int dq q |k_0| g(q, i\xi_n)) \quad (8)$$

$$F(T, d) = \frac{k_b T}{n} \sum_{n=0}^{\infty} (\int dq q \sqrt{\epsilon_0(i\xi) \frac{\xi^2}{c^2} + q^2} \sum_{v=s,p} \frac{r_1^v r_2^v \exp(2ik_0 d)}{1 - r_1^v r_2^v \exp(2ik_0 d)}) \quad (9)$$

۳. نتایج و بحث

۳-۱ چگونگی تاثیر ویژگی های اپتیکی بر نیروی کاسیمیر

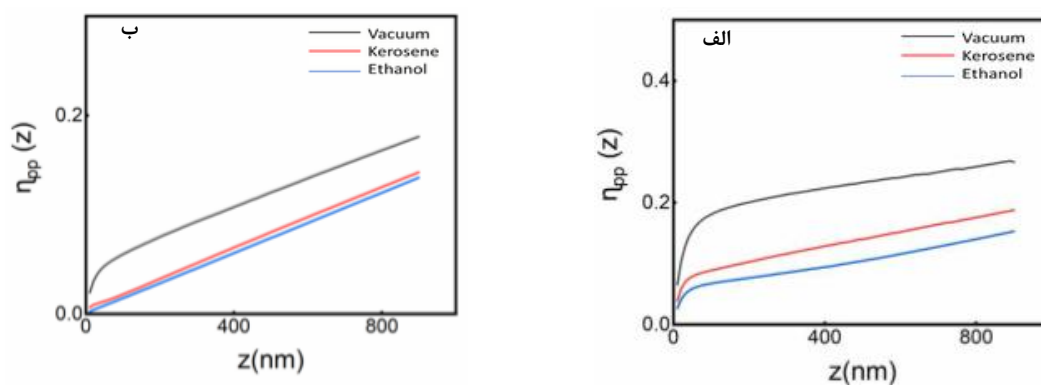


شکل ۳ نمودار نرخ کاهش بر حسب فاصله برای سه سیستم در دمای اتاق و با دی الکتریک لایه ی میانی (الف) خلا (ب) کراسون

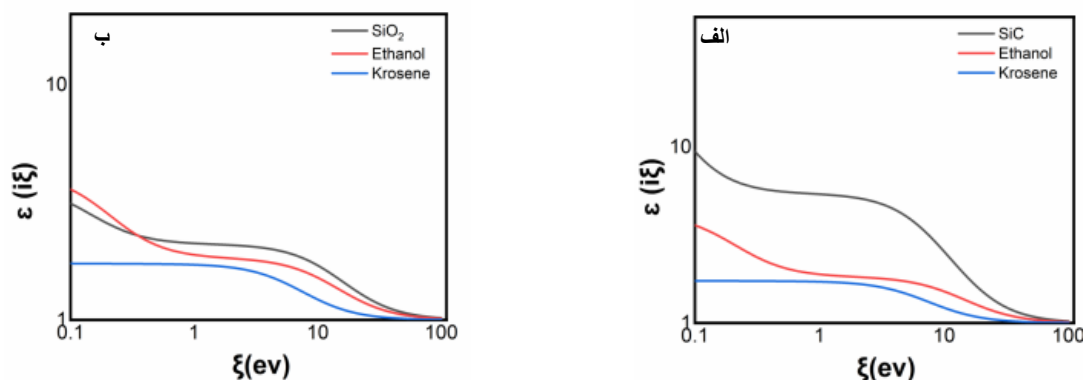
نتایج بدست آمده نشان می دهد در هر دو نمودار با افزایش فاصله ی بین صفحات ، فارغ از جنس صفحات و ماده ی بین آن ها ، η رشد می کند. بزرگ شدن η و نزدیک شدن این پارامتر به عدد یک نشان می دهد که قدرت قسمت موهومی تابع دی الکتریک ، در حال افزایش است و جذب سیستم در مواجهه با موج الکترومغناطیس و در پی آن افت و خیز درسیستم قوی می شود و این یعنی با افزایش فاصله ی بین صفحات میزان تضعیف نیرو در اثر خواص نوری بین صفحات کاهش می یابد و سیستم به حالت ایده آل نزدیک تر می شود. البته با توجه به شکل (۳) باید گفت که مطابق پیش بینی سیستم متشکل از طلا بالاترین η را در مقایسه با دو سیستم دیگر از خود بروز می دهد و با توجه به توابع دی الکتریک برای SiO_2 کمترین η قابل رویت است. نکته دیگر که باید بیان شود این است که در سیستمی که بین صفحات خلا است، دیده می شود هنگامی که صفحات ساخته شده از Au باشد، شیب تغییرات بسیار سریع با افزایش فاصله رشد می کند و به حالت اشباع می رسد و این یعنی پاسخ فرکانسی تابع دی الکتریک Au در سیستم Au-Vacuum-Au از حدود ۶۰۰nm به

بعد در پی رشد شدید تابع دی الکتریک تقریباً تغییری ندارد و بسیار به رسانای ایده آل نزدیک شده و نسبت نیروی آن سیستم به نیرو در سیستم ایده آل ثابت می ماند. همچنین در نمودارها دیده می شود فاکتور کاهش در دو سیستم با صفحات ساخته شده از SiC و SiO₂ با افزایش فاصله شیب افزایشی دارد در حالی که در مورد سیستم Au اشباع دیده می شود این مورد مهم در قسمت مطالعه تاثیر افت و خیزهای دمايي به طور مفصل بیان می شود.

حال قصد داریم نمودارهای الف و ب شکل (۳) را با هم مقایسه کنیم تا متوجه شویم دی الکتریک لایه میانی چگونه بر رشد نیرو اثر می گذارد و این تاثیر چقدر وابسته به رسانایی صفحات است. مطابق شکل ۲ قسمت موهومی تابع دی الکتریک ($\epsilon''(\xi)$) اتانول و کراسون قوی تر از خلا است. یعنی هر کدام می توانند سیستم سه لایه را دچار جذب کنند و در سیستم ایجاد افت و خیز نمایند. در مقایسه ی نمودارهای الف و ب شکل (۳) مشاهده می شود که با قرار دادن کراسون به عنوان ماده ی میانی، فارغ از جنس صفحات، η برای هر تمام سیستم ها کاهش یافته است. این نشان می دهد که نیرو در سیستم هایی با لایه ی میانی خلا قوی تر از سیستم با لایه ی میانی کراسون می باشد. این مشاهده با بررسی ماهیت امواج الکترومغناطیسی و برهم کنش آن ها با مواد مختلف قابل توجیه است. پس از برخورد موج الکترومغناطیسی به صفحات، بخشی از آن از صفحات عبور می کند و به فضای میانی می رسد. اگر لایه ی میانی کراسون باشد، بر اثر برخورد موج عبوری به ساختار کراسون، اتم ها می توانند به دو قطبی تبدیل شوند. برخورد موج به دوقطبی ها سبب نوسان و تابش آن ها می شود و امکان تولید موج هم بسامد با نوسان فراهم می آید. بنابراین با حضور کراسون به عنوان لایه ی میانی، امکان ایجاد امواج ایستا در وسط دو صفحه زیاد می شود. از این رو حضور ماده ی میانی باعث ایجاد افت اختلاف فشار در سیستم و در نهایت کاهش نیروی کاسیمیر می شود.



شکل ۴ نمودار نرخ کاهش بر حسب فاصله برای سه سیستم در دمای اتاق و با صفحات (الف) SiC و (ب) SiO₂ نوع ماده ی میانی (جنس دی الکتریک) در شکل نشان داده شده است.



شکل ۵ قسمت موهومی تابع دی الکتریک بر حسب فرکانس موهومی برای
(الف) SiC، اتانول و کراسون و (ب) SiO₂، اتانول و کراسون

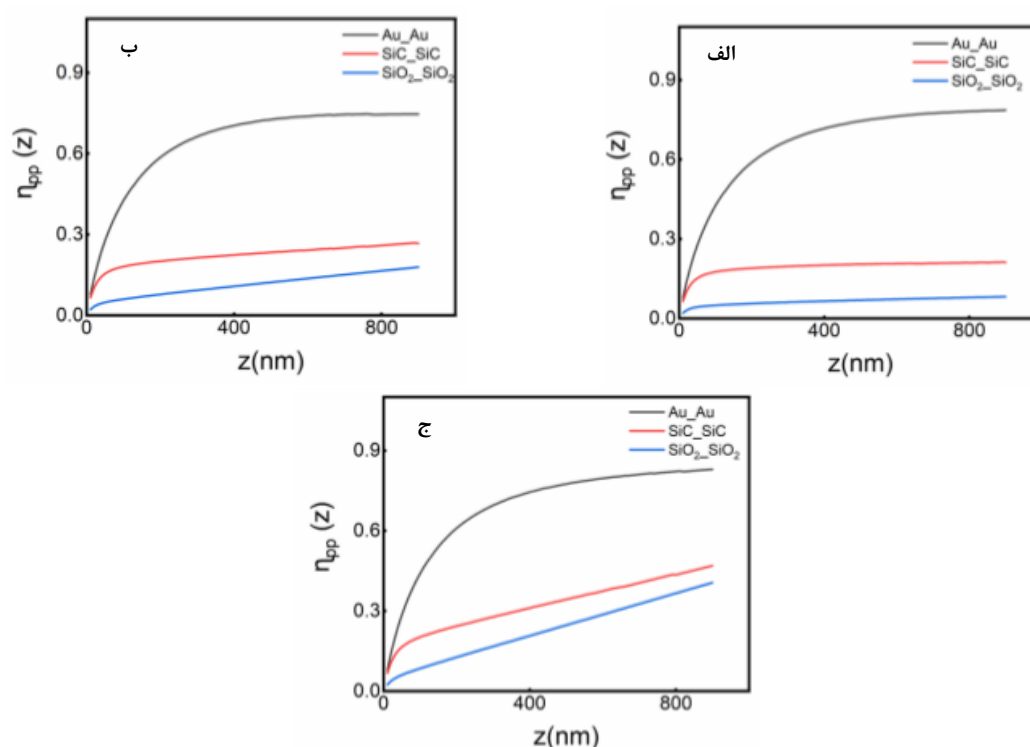
در بررسی و تحلیل شکل (۴) دو نکته ی مهم مورد توجه قرار می گیرد. نکته ی اول این که حضور دی الکتریک اتانول و یا کراسون بین صفحات سلیکا تفاوت قابل ملاحظه ای در رفتار سیستم ایجاد نمی کند؛ در حالی که اگر صفحات سلیکون کرباید باشند، تغییر رفتار سیستم با توجه به نوع ماده ی میانی ملموس خواهد بود برای توجیه این رفتار می توان به این نکته اشاره کرد که با توجه به شکل ۵ در فرکانس های کوچک که در محاسبه نیروی کاسیمیر بسیار تاثیرگذارند، مشاهده می شود تابع دی الکتریک SiO₂ بین اتانول و کراسون قرار گرفته است. این اتفاق منجر به این می شود که ضرایب فریل (r_s, r_p) بین دو سیستم SiO₂_ethanol_SiO₂ و SiO₂_kerosene_SiO₂ تفاوت چشمگیری نداشته باشند. بنابراین در این دو سیستم نیروی تقریباً هم اندازه تولید می شود. این در حالی است که اختلاف تابع دی الکتریک SiC در مقایسه با اتانول و کراسون در تمام محدوده ی فرکانسی واضح است. به همین علت تغییر ماده ی میانی برای صفحات از جنس Au و SiC به طور واضح منجر به تغییر نیرو می شود (شکل ۵).

۲-۳ بررسی اثر تحولات دمایی بر نیروی کاسیمیر

در این قسمت هدف بررسی بزرگی نیروی کاسیمیر در حضور افت و خیزهای دمایی با قدرت های مختلف است. سعی داریم به این سوال پاسخ دهیم آیا این تاثیرات در تمام سیستم های در نظر گرفته شده در این مطالعه نظمی یکسان دارد و تحت تاثیر رسانندگی اجزا قرار نمی گیرند. سیستم مورد مطالعه در این قسمت شامل دو صفحه موازی و بدون زبری ساخته شده از Au، SiC یا SiO₂ می باشد. برای تمام حالات فضای بین دو صفحه خلا در نظر گرفته شده است. ما علاوه بر دمای اتاق (۳۰۰ K)، دمای ۱۰۰ K را به عنوان دمای پایین و دمای ۵۰۰ K را به عنوان دمای بالا استفاده کرده ایم. وقتی از دمای ۳۰۰ K (شکل ۶ ب) به سمت دماهای پایین تر برویم (شکل ۶ الف) مشاهده می شود که η کاهش پیدا می کند. این بدان معناست که اندازه نیرو از حالت سیستم ایده آل فاصله گرفته است و ضعیف شده است.

همان طور که در قسمت قبل گفته شد نیروی کاسیمیر متشکل از جمع دو بخش متاثر از خواص نوری سیستم مورد مطالعه در دمای صفر و بخش متاثر از افت و خیزهای دمایی می باشد. نتایج نشان می دهد که بخش دوم نیرو نمی تواند به طور مستقل از خواص نوری سیستم عمل کند. در این سیر (حرکت از ۳۰۰ K به سمت دمای ۱۰۰ K) نیرو و در نتیجه آن

η هر دو سیستم، شامل صفحات از جنس SiC ، SiO_2 کوچک تر می شود، به عبارتی اثر افت و خیزهای دمایی کوچک تر می شود که منجر به کاهش نیرو خواهد شد. نکته قابل تامل دیگری که در حرکت به سمت دماهای پایین قابل مشاهده است فاصله ی بین نمودارهای سیستم شامل دو صفحه از جنس SiC و سیستم شامل دو صفحه از جنس SiO_2 می باشد. این فاصله در دمای 100K بیش تر از فاصله ی نسبی دو نمودار در دمای 300K است. این مهم بیان می کند که حساسیت نیرو به خواص نوری مختلف با کاهش دما بیشتر می شود. بنابر این در دماهای پایین اثر خواص نوری شدیدتر ملاحظه می شود.

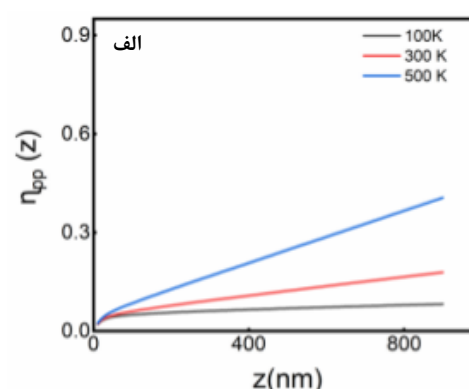
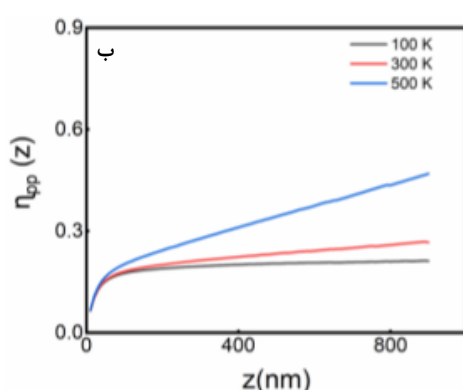


شکل ۶ نمودار نرخ کاهش بر حسب فاصله برای سه سیستم با دی الکتریک خلا به عنوان لایه میانی و در دماهای (الف) 100K (ب) 300K (ج) 500K جنس صفحات در شکل نشان داده شده است.

حال از دمای 300K به سمت دماهای بالا (شکل ۶ قسمت ج) می رویم. مشاهده می شود که با افزایش دما، η هر دو سیستم مذکور افزایش یافته است. یعنی در دمای 500K نیرو افزایش یافته و به بزرگی نیرو در سیستم ایده آل نزدیک تر شده است. بخش متاثر از افت و خیزهای دمایی در محاسبه ی نیروی کاسیمیر با افزایش دما قوی تر می شوند به طوری که قابل مشاهده است نمودارهای سیستم شامل دو صفحه از جنس SiC و SiO_2 در دمای 500K بسیار به هم نزدیک می شوند؛ زیرا در دماهای بالا اثر افت و خیزهای دمایی زیاد بوده و اثر خواص نوری سیستم کم تر خود را می نمایند و این در حالی است که نمودارها در دمای 100K بیشترین فاصله را از هم دارند. علاوه بر این می توان مشاهده کرد در فواصل بزرگ تر نمودارها به هم نزدیک تر شده اند و این به معنی افزایش اثر افت و خیزهای دمایی در فاصله های زیاد می باشد. بنابراین می توان گفت با افزایش فاصله ی بین صفحات، سهم افت و خیزهای دمایی در محاسبه ی نیروی کاسیمیر قوی تر می شود.

یعنی افت و خیزهای دمایی در فواصل بیشتر، قدرت بیشتری خواهند داشت و به تبع در فواصل کم بیشتر تغییرات بین نمودارها در شکل، حاصل از تغییرات مربوط به خواص نوری سیستم می باشد؛ با افزایش فاصله و نزدیک شدن خطوط نمودار به یکدیگر اثر خواص نوری کم شده و سهم افت و خیزهای دمایی افزایش می یابد.

همچنین رشد شیب نمودارها نشان دهنده ی میزان واکنش هر سیستم به افت و خیزهای دمایی می باشد. شیب نمودار مربوط به سیستم شامل صفحات از جنس SiC در محدوده ی فاصله ای ۲۰۰nm تا ۸۰۰nm در دماهای ۱۰۰K، ۳۰۰K و ۵۰۰K به ترتیب برابر ۰/۰۵، ۰/۰۷ و ۰/۲ بوده و شیب نمودار مربوط به سیستم شامل دو صفحه از جنس SiO₂ نیز در همین محدوده ی فاصله و در دماهای ۱۰۰K، ۳۰۰K و ۵۰۰K به ترتیب برابر ۰/۰۲، ۰/۰۹ و ۰/۲۷ می باشد. در دمای کم، کوچک تر بودن شیب سیستم شامل سیلیکا نسبت به سیستم دیگر نشأت گرفته از خصوصیات اپتیکی آن است، به طوری که در تمام بازه فرکانسی پاسخ فرکانسی تابع دی الکتریک این سیستم تقریباً فلت می باشد. در حالی که بزرگ تر بودن شیب سیستم شامل سیلیکا نسبت به سیستم دیگر در دماهای بالاتر نشان می دهد که هر چه رسانندگی ماده کم تر باشد، واکنش سیستم به تغییرات دما شدیدتر خواهد بود و در نتیجه تغییر شیب بیشتری را در نمودار مربوط به آن سیستم شاهد خواهیم بود. از بررسی های انجام شده می توان نتیجه گرفت که خواص نوری افت و خیزهای دمایی در محاسبه ی نیروی کاسیمیر سیستم نمی توانند مستقل از هم باشند و در بررسی افت و خیزهای دمایی، جنس صفحات سیستم بسیار مهم و غیر قابل چشم پوشی است.



شکل ۷ نمودار نرخ کاهش بر حسب فاصله برای سه سیستم و با صفحات
(الف) SiC و (ب) SiO₂ دمای هر سیستم در شکل نشان داده شده است.

در این قسمت واکنش دو سیستم شامل SiC و SiO₂ که در این مطالعه با توجه به ویژگی های اپتیکی شان کاملاً به طور چشمگیر تحت تاثیر افت و خیزهای دمایی قرار می گرفتند با جزییات بیشتر مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل شماره (۷) مشاهده می شود که افت و خیزهای دمایی به جنس صفحات و در نتیجه خواص نوری سیستم وابسته است. در سیستم ساخته شده از SiC تا فاصله حدود ۱۰۰ nm مترو برای سیستم ساخته شده از SiO₂ تقریباً در فواصل کم تر از ۵۰ nm شاهد قدرت اثر خواص نوری نسبت به افت و خیزهای دمایی، روی سیستم هستیم. در سیستم شامل صفحات از جنس SiO₂، می توان دید که افت و خیزهای دمایی نقش به سزایی در تعیین نیرو خواهند داشت. بنابراین نکته مهم و حائز اهمیت این است که افت و خیزهای دمایی کاملاً به خواص نوری سیستم وابسته است و نمی تواند به طور مستقل روی سیستم اثر گذارد.

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه نیروی کاسیمیر بین دو صفحه ی موازی بدون زبری، با در نظر گرفتن ویژگی های اپتیکی و تاثیرات دمایی، محاسبه شده و نحوه ی تاثیر این دو فاکتور بر بزرگی و قدرت نیروی کاسیمیر مورد بحث قرار گرفته است. از آن جا که محاسبه ی نیرو به روش لیفشیتز می باشد، ابتدا توابع دی الکتریک مواد مورد استفاده شده را مورد مطالعه قرار دادیم. نتایج نشان داد، طلا به دلیل حضور الکترون های آزاد، قدرت جذب زیادی دارد و بخش موهومی تابع دی الکتریک برای طلا بسیار قوی است. این فاکتور برای SiC کم تر از Au است و این نشان می دهد سیستم از نوع دی الکتریک بوده و جذب منجر به پلاریزه ی سیستم و افت و خیز می شود. در مورد SiO_2 نیز مشاهده شد که ، مقدار (ϵ'') از عدد یک فاصله زیادی نمی گیرد. زیرا این ماده نارسناست و فاقد الکترون آزاد می باشد و الکترون های مقید آن بستگی بسیار بالایی به هسته دارند، بنابراین قدرت جذب ناچیزی دارد. در ادامه سه سیستم با صفحات Au_Au و SiC_SiC و $\text{SiO}_2\text{-SiO}_2$ در دمای اتاق و با لایه میانی خلا و کراسون بین دو صفحه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد فارغ از جنس صفحات و ماده ی میانی آن ها، با افزایش فاصله ی صفحات، η رشد کرده است؛ این یعنی نیروی کاسیمیر سیستم به حالت ایده آل نزدیک تر می شود. همچنین مشاهده شد که سیستم متشکل از Au بالاترین η را در مقایسه با دو سیستم دیگر از خود بروز می دهد و با توجه به توابع دی الکتریک برای SiO_2 کمترین η قابل رویت است. همچنین دیده شد که فاکتور کاهش دو سیستم با صفحات ساخته شده از SiC و SiO_2 با افزایش فاصله شیب افزایشی دارد در حالی که در مورد سیستم Au اشباع دیده شد. نتایج حاصل نشان داد با قرار دادن کراسون به عنوان ماده ی میانی ، فارغ از جنس صفحات، η برای هر سیستم با رسانندگی های متفاوت نسبت به حالتی که صفحات در خلا قرار گرفته بودند، کاهش یافته است. این نتیجه به دلیل قوی بودن تابع دی الکتریک کراسون نسبت به خلا می باشد . بررسی ها در این بخش نشان داد هر چه رسانندگی صفحات سیستم بیشتر باشد η به عدد یک نزدیک تر بوده و نیروی کاسیمیر قوی تری را خواهیم داشت. اما با قرار دادن لایه ی میانی بین دو صفحه مشاهده می شود که هر چه دی الکتریک ماده ی میانی قوی تر باشد، η کاهش یافته و نیروی کاسیمیر کم می شود. همچنین مشاهده شد حضور دی الکتریک اتانول و یا کراسون بین صفحات SiO_2 تفاوت قابل ملاحظه ای در رفتار سیستم ایجاد نکرد.

در ادامه ی مطالعه بزرگی نیروی کاسیمیر در حضور افت و خیزهای دمایی با قدرت های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. سیستم مورد مطالعه در این قسمت شامل دو صفحه موازی و بدون زبری ساخته شده از Au یا SiC یا SiO_2 بود. برای تمام حالات فضای بین دو صفحه خلا در نظر گرفته شد. ما علاوه بر دمای اتاق (۳۰۰ کلوین) دمای ۱۰۰K را به عنوان دمای پایین و دمای ۵۰۰K را به عنوان دمای بالا استفاده کردیم. در این قسمت مشاهده شد وقتی از ۳۰۰K به سمت دماهای پایین تر برویم η در سیستم های شامل صفحات از جنس SiO_2 , SiC کاهش پیدا کرده و به صفر نزدیک تر می شود. این بدان معناست که اندازه نیرو از حالت سیستم ایده آل فاصله گرفته است و ضعیف شده است. بررسی ها نشان داد که بخش متاثر از افت و خیزهای دمایی نمی تواند به طور مستقل از خواص نوری سیستم عمل کند. در این قسمت دریافتیم که در سیستم ها-حساسیت نیرو به خواص نوری مختلف با کاهش دما بیشتر می شود. بنابراین در دماهای پایین اثر خواص نوری شدیدتر ملاحظه شد. وقتی از دمای اتاق (۳۰۰K) به سمت دماهای بالا می رویم. مشاهده شد که با افزایش دما، نیرو افزایش یافته و به حالت سیستم ایده آل نزدیک تر شده است.

نتیجه ی مهم از بررسی تاثیر افت و خیزهای دمایی بر محاسبه ی نیروی کاسیمیر نشان داد با افزایش فاصله ی بین صفحات، سهم افت و خیزهای دمایی در محاسبه ی نیروی کاسیمیر قوی تر می شود. یعنی افت و خیزهای دمایی در فواصل

بیشتر، قدرت بیشتری خواهند داشت و به تبع در فواصل کم بیش ترین تغییرات در فاکتور کاهش، حاصل از تغییرات مربوط به خواص نوری سیستم می باشد؛ از بررسی های انجام شده نتیجه گرفتیم که خواص نوری وافت و خیزهای دمایی در محاسبه ی نیروی کاسیمیر سیستم نمی توانند مستقل از هم باشند و در بررسی افت و خیزهای دمایی، جنس صفحات سیستم بسیار مهم و غیر قابل چشم پوشی است. نتیجه ی بسیار مهمی که از بررسی ها حاصل شد نشان داد که درسیستم شامل SiC تا حدود ۱۰۰ nm و برای سیستم ساخته شده از SiO₂ تا حدود ۵۰ nm شاهد قدرت اثر خواص نوری نسبت به افت و خیزهای دمایی، روی سیستم بودیم. در سیستم شامل صفحات از جنس SiO₂، دیدیم که افت و خیزهای دمایی نقش به سزایی در تعیین نیرو داشت. بنابراین نکته مهم و حائز اهمیت این است که افت و خیزهای دمایی کاملاً به خواص نوری سیستم وابسته است و نمی تواند به طور مستقل روی سیستم اثر گذارد.

منابع و مراجع

- [۱] A. W. Rodriguez, F. Capasso, and S. G. Johnson, Nature Photonics 5, 211 (2011)
- [۲] Casimir, H.B. and Polder, D., "The influence of retardation on the London-van der Waals forces", Physical Review 73(4), 360, 1948.
- [۳] Dzyaloshinskii, I.E.E., Lifshitz, E.M., Pitaevskii, L.P. and Priestley, M.G., "The general theory of van der Waals forces", In Perspectives in Theoretical Physics, 443-492.
- [۴] G. L. Klimchitskaya, V. M. Mostepanenko, E. K. Nepomnyashchaya, E. N. Velichko, "Impact of magnetic nanoparticles on the Casimir pressure in three-layer systems", PHYSICAL REVIEW B 99, 045433 (2019)
- [۵] D. Zhabinskaya, "Casimir interactions between scatters in carbon nanotubes. Publicly accessible Penn Dissertations". University of Pennsylvania, 2009
- [۶] V. Svetovoy, G. Palasantzas, " Influence of surface roughness on dispersion force", Advances in colloid in interface science 216,1-19 (2015)
- [۷] G. Bressi, G. Carugno, R. Onofrio, and G. Ruoso, "Measurement of the Casimir force between parallel metallic surfaces ", Phys. Rev. Lett, 2002.

- [۸] Ch. Xiong, T. Philibin, U. Leonhardt, S. Linton, "The Casimir effect exploring and engineering the quantum vacuum", University of St Andrews, (2013)
- [۹] F. Capasso, J.N. Munday, D. Iannuzzi, and H.B. Chan, "Long range interactions in nanoscale science", IEEE Journal, 2010.
- [۱۰] J. Ferretti, et al, "Two-dimensional J-resolved nuclear magnetic resonance spectral study of two bromobenzene glutathione conjugates", Environmental health perspectives, 1985.
- [۱۱] G L Klimchitskaya, U Mohideen , V M Mostepanenko, "Pulsating Casimir force", J. Phys. A: Math. Theor. 40 (2007)
- [۱۲] F. Tajik, N. Allameh, A. A. masoudi, " Sensitivity of attractive and repulsive Casimir force between topological insulator plates to magnetization and dielectric properties", 32, 9,(2022)
- [۱۳] A. G. Grushin, P. Rodriguez-Lopez, A. Cortijo, "Effect of fiite temperature and uniaxial anisotropy on the Casimir effect with three-dimensional topological insulators", phys. Rev B 84(4) , 045119, (2011).
- [۱۴] A. G. Grushin, A, Cortijo , " Tunable Casimir repulsion with three-dimensional topological insulators", Phy. Rev. Lett 106 (2), 020403, (2011).