

Theoretical study of the effect of the layer thickness on the sensitivity of tapered fiber optic sensors

M. Vahedi*, A. Riahi

* Assistant Professor, University of Science and Technology, Tehran, Iran

(Received: 10/12/2021; Accepted: 07/02/2022)

Abstract

In this paper, a comprehensive study was performed to investigate the effect of the absorbent layer thickness on the tapered fiber sensor sensitivity, which leads to the highest sensitivity for the sensor. For this purpose, a staircase method was introduced to investigate the effect of layer thickness on the sensitivity of fiber optic sensors. According to the results obtained from the simulations performed using this method, it was found that the type of variation in the sensitivity of the tapered fiber optic sensor depends on the refractive index of the layer. To investigate the dependence of sensitivity on the layer thickness and refractive index of the layer, two different general cases have been considered. If the refractive index of the layer is smaller than the refractive index of the fiber, it can be seen that the sensitivity increases with increasing the layer thickness. On the other hand, when the refractive index of the layer is greater than the refractive index of the fiber, there are optimal points in the sensitivity plot versus the layer thickness, which demonstrate the highest sensitivities.

Keywords: Fiber sensor, Tapered optical fiber, Staircase method, Evanescent waves, Refractive index sensor, layer thickness.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

© Authors



* Corresponding author E-mail: Mvahedi@iust.ac.ir

بررسی نظری تأثیر ضخامت لایه جاذب بر حساسیت حسگرهای تار نوری نازک شده

محمد واحدی^{۱*}، علی ریاحی^۲

۱- استادیار، ۲- دانشجوی دکترا، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸)

چکیده

در این مقاله، یک مطالعه نظری جامع برای بررسی اثر ضخامت لایه جاذب بر حساسیت حسگرهای تار نوری نازک شده که منجر به بیشترین حساسیت می‌شود، انجام شده است. به این منظور، یک روش پلکانی برای بررسی تأثیر ضخامت لایه بر حساسیت حسگرهای تار نوری معرفی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از این روش، مشخص شد که افزایش حساسیت حسگر تار نوری نازک شده به ضریب شکست لایه وابسته است. وابستگی حساسیت به ضریب شکست لایه جاذب و ضخامت لایه جاذب در دو حالت مختلف در نظر گرفته شده است: اگر ضریب شکست لایه کوچک‌تر از ضریب شکست تار باشد، مشاهده می‌شود که حساسیت با افزایش ضخامت لایه افزایش می‌یابد، اما زمانی که ضریب شکست لایه بزرگ‌تر از ضریب شکست تار باشد، نقاط بهینه‌ای در نمودار حساسیت بر حسب ضخامت لایه وجود دارد که در این نقاط حساسیت بیشترین مقدار را دارد.

کلیدواژه‌ها: حسگر تار نوری، تار نوری نازک شده، روش پلکانی، میدان میرا، حسگر ضریب شکست، ضخامت لایه

جاذب

۱- مقدمه

در طول سال‌های گذشته و پس از ساخت تار نوری، استفاده از آن در بخش مخابراتی مورد توجه قرار گرفت. اصول عملکرد تار نوری بر اساس اصل بازتاب داخلی از مرز میان هسته و پوسته است. از طرفی، تار نوری ابزار خوبی برای برهم‌کنش نور با محیط اطراف به عنوان حسگر به شمار می‌آید، از این رو در سال‌های اخیر توجه زیادی را به عنوان حسگرهای نوری به خود معطوف داشته است. در حسگرهای تار نوری^۱ (FOS) مبدل حسگر از تغییر ساختار تار نوری ایجاد می‌شود. ساخت و نحوه عملکرد این حسگر با توجه به نوع استفاده از مبدل آن (تار نوری) متفاوت است. حسگرهای تار نوری نسبت به نمونه‌های الکتریکی یا مغناطیسی مزایایی اعم از سبک و کم‌حجم بودن، زمان پاسخ مناسب، حساسیت بالا و عدم تداخل الکترومغناطیسی و ... دارند که امکان به‌کارگیری آن‌ها برای تشخیص مواد را در محیط‌های مختلف فراهم می‌کند.

تاکنون چندین حسگر تار نوری برای کاربردهای مختلف طراحی و بررسی شده است [۱-۴]. یکی از جالب‌ترین این حسگرها، حسگرهای تار نوری نازک شده (TOF) است که به دلیل تعامل زیاد نور از طریق تار با محیط اطراف است [۵-۱۱]. با نازک‌سازی تار، میدان میرا از سطح تار خارج شده و با مواد پیرامونی برهم‌کنش می‌کند. اثر متقابل موج هدایت شده با محیط اطراف می‌تواند ابزاری قدرتمند برای کاربردهای حسگری باشد. برای

طراحی یک حسگر TOF با حساسیت بالا و زمان پاسخ سریع، علاوه بر بررسی تأثیر پارامترهای مربوط به هندسه ناحیه نازک شده شامل قطر، طول و زاویه نازک شده، ضخامت لایه جاذب نیز باید تنظیم شود. تلاش‌های بی‌شماری برای بررسی این موضوع انجام شده است و محققان به دنبال افزایش حساسیت هستند.

در طراحی حسگرهای TOF، معمولاً از یک لایه برای جذب آنالیت در سطح حسگر استفاده می‌شود، جایی که میدان میرا وجود دارد و می‌تواند با آنالیت برای تولید سیگنال تعامل داشته باشد. اخیراً بررسی اثر لایه جاذب مورد توجه محققان قرار گرفته است. کارس^۲ و همکاران یک حسگر رطوبت بر اساس تار نوری نازک شده طراحی کردند [۱۲]. در آن مقاله، پاسخ حسگر با توجه به ضخامت لایه حساس و استفاده از مواد با ضریب شکست متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. شیب توان عبوری از تار به عنوان تابعی از ضخامت لایه، نشان‌دهنده حساسیت نهایی حسگر است. آن‌ها دریافتند که مواد با ضریب شکست بالا رفتار نوسانی از خود نشان می‌دهند که در نتیجه می‌توان از این ساختارها برای به دست آوردن حسگرهای رطوبت با حساسیت بالا استفاده کرد. علاوه بر این، دل ویلار^۳ و همکارانش به این نتیجه رسیدند که لایه با ضریب شکست بالاتر از تار مانند یک میدان الکتریکی خارجی عمل می‌کند که سبب اختلال در توزیع مد یک توری تار نوری با دوره تناوب طولانی^۴ می‌شود. در تقریب مد LP، نتیجه‌گیری شده است که برای یک لایه انتخابی با

2 Corres
3 Delvillar
4 Long period fiber grating

* رایانامه نویسنده مسئول: Mvahedi@iust.ac.ir

1 Fiber optic sensors



پلی‌الکترولیت چندلایه همگن، عمق نفوذ میدان میرای باریکه هدایت‌شده به پوسته حداقل ۴۸۱ نانومتر است. با این حال، آن‌ها فقط یک ضریب شکست خاص لایه (۱/۳۵) را روی تار گزارش کردند که عمومیت ندارد [۱۹].

ما در کارهای اخیر خود برای بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد حسگر یک مدل نظری جدیدی (یک روش پله‌ای) ارائه کردیم [۲۰-۲۱]. در مقاله حاضر، با استفاده از همین مدل (روش پله‌ای و تئوری جفت‌شدگی مد) اثر ضخامت لایه جاذب بر حساسیت حسگر فیبر نوری نازک شده برای ضرایب شکست مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور، برای بررسی وابستگی حساسیت به ضخامت لایه، دو حالت برای ضرایب شکست وجود دارد؛ یک حالت مربوط به ضریب شکست لایه بزرگ‌تر از تار و یک حالت مربوط به ضریب شکست لایه کوچک‌تر از تار. به منظور بررسی این اثر، ابتدا در بخش دوم مبنای تار نوری نازک شده مرور شده و سپس در بخش سوم در مورد مدل ارائه‌شده (روش پلکانی) توضیحاتی ارائه خواهد شد. در بخش چهارم تأثیر ضخامت لایه جاذب بر حساسیت حسگر ارائه‌شده و در مورد نتایج حاصل از روش پلکانی بحث می‌شود.

۲- مبانی نظری تار نوری نازک شده

برای یافتن مدهای تار نوری باید معادله هلمهولتز در دستگاه مختصات استوانه‌ای حل شود. جواب‌های این معادله به توابع بسل منجر می‌شوند. تارهای نوری در حالت تقریب موج‌بر ضعیف از مدهای قطبیده خطی (LP) پشتیبانی می‌کنند. در این تقریب وابستگی عرضی میدان مدی با رابطه زیر داده می‌شود [۲۱]:
که در آن r, ϕ پارامترهای مربوط به دستگاه مختصات استوانه‌ای، a شعاع هسته تار، J_l و K_l توابع بسل تعمیم‌یافته از مرتبه l هستند. U ثابتی هست که توسط رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{CO}^2 - n_{CL}^2}, \quad W = \sqrt{V^2 - U^2}$$

و n_{CL}, n_{CO} به ترتیب ضرایب شکست هسته و پوسته تار است. در طی فرایند نازک‌سازی تار، وقتی شعاع هسته کاهش یافته و ضرایب شکست هسته و پوسته دستخوش تغییر می‌شوند، پارامتر V تغییر یافته و میدان مدی گسترش می‌یابد. انتشار در قسمت نازک‌شده موجب تغییر فاز باریکه عبوری در داخل تار نوری می‌شود. به‌طور کلی، تغییر فاز نور به شکل مدها و ضرایب شکست دو محیط و همچنین شعاع ناحیه نازک‌شده وابسته است. تداخل بین تک مد تار اصلی و دو یا چند مد قسمت نازک شده باعث ظهور نوسانات دوره‌ای در طیف عبوری از ناحیه نازک شده می‌شود.

ضریب شکست مناسب، ضخامت بهینه‌ای برای هر ترکیبی از ضرایب شکست محیط و لایه وجود دارد [۱۳]. علاوه بر این، گروه هراندز^۱ حسگر هیدروژن تار نوری با پاسخ سریع بر اساس لایه های پالادیوم و طلا ساختند. آن‌ها از تار نوری با ساختار تک‌مد-چندمد-تک‌مد استفاده کردند که لایه نشانی نانویی پالادیوم و طلا روی آن انجام شده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که پاسخ سیگنال حسگر با افزایش ضخامت فیلم لایه نازک افزایش می‌یابد [۱۴]. بعد از آن گروه رئوفی^۲ حسگر تار نوری مبتنی بر طول موج را برای آشکارسازی PH ساختند و نشان دادند که حساسیت حسگر با افزایش تعداد لایه‌ها تا حدود ۵-۶ لایه بهبود می‌یابد ولی با افزایش تعداد لایه‌ها به بیش از ۶ لایه کاهش حساسیت رخ می‌دهد. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش ضخامت لزوماً باعث افزایش حساسیت نمی‌شود و ضخامت بهینه‌ای وجود دارد که بعد از آن، حساسیت حتی می‌تواند کاهش یابد [۱۵]. گروه لینکسو نیز افزایش حساسیت حسگر برحسب ضریب شکست را بر اساس ساختار تار تک‌مد-چندمد-تک‌مد با لایه نازک مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها حساسیت حسگر را با ضخامت‌های مختلف لایه و ضرایب شکست مختلف از ۱/۳۱ تا ۱/۳۵ مقایسه کردند و نشان

$$\psi(r, \varphi) = \begin{cases} \frac{A}{J_l(U)} J_l\left(\frac{Ur}{a}\right) (\cos l\varphi); & r < a \\ \frac{A}{K_l(W)} K_l\left(\frac{Wr}{a}\right) (\sin l\varphi); & r > a \end{cases} \quad (1)$$

دادند که با افزایش ضخامت لایه، حساسیت حسگر افزایش می‌یابد. اما آن‌ها ضرایب شکست بزرگ‌تر لایه نسبت به تار را مطالعه نکردند [۱۶]. گروه ساکارو^۳ روی بهبود حساسیت در تار با ساختار تک‌مد-چندمد-تک‌مد و لایه نشانی فیلم نازک فعالیت داشتند.

$$\frac{U J_l'(U)}{J_l(U)} = \frac{W K_l'(W)}{K_l(W)} \quad (2)$$

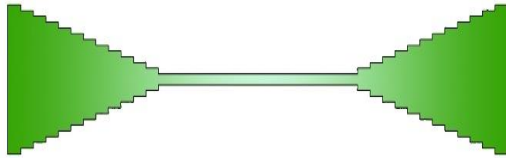
آن‌ها دو حسگر با ۱۸ لایه و ۹ لایه را با هم مقایسه کرده و نتیجه گرفتند که حساسیت حسگر با ۱۸ لایه از حسگر دوم بیشتر است [۱۷]. گروه ویسوکینسکی هم لایه جاذب حسگر تار نوری CO_2 را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش ضخامت لایه حسگر، پاسخ حسگر افزایش می‌یابد. اما آن‌ها فقط به ضخامت‌های بالای یک میکرومتر متمرکز شدند و ضخامت‌های کمتر را مورد بررسی قرار ندادند [۱۸]. سرانجام، چن و همکارانش برای سنجش رطوبت از میکرو تار نوری U شکل با لایه نانو متخلخل پلی‌الکترولیت استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که میکرو تار ۱۰ لایه نسبت به میکرو تار یک لایه حساسیت به رطوبت بیشتری دارد. این انتظار می‌رود؛ زیرا در شرایط محیطی با لایه نشانی

1 Hernandez

2 Raoufi

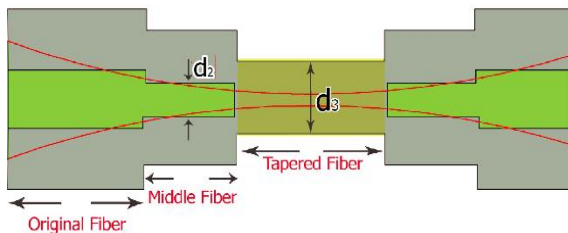
3 Socorro

دارد، تغییر شدیدی در مقدار V ایجاد نشده و تار نوری به صورت تک مد باقی مانده است؛ بنابراین کل ناحیه گذار با یک تار نوری شبیه سازی شده و یک مدل سه قسمتی برای شبیه سازی تار نوری نازک شده ارائه می گردد.



شکل (۲): مدل تقریب پله ای برای تغییر قطر تار نوری نازک شده.

همان گونه که در شکل (۳) مشاهده می شود سه تار مختلف در نظر گرفته شده است که تار اولی همان تار اصلی با قطر هسته $9 \mu\text{m}$ و قطر پوسته $125 \mu\text{m}$ است، تار میانی، تاری با قطر هسته d_2 و تار آخری، تار نازک شده می باشد که با قطرهای مختلفی (d_3) نازک سازی آن انجام می شود.



شکل (۳): شبیه سازی ساده سه مرحله ای از تار نوری نازک شده.

حال با استفاده از روش پله ای و بر اساس طرحواره نشان داده شده در شکل (۳) می توان حساسیت حسگر را مورد بررسی قرار داد. به منظور بررسی حساسیت، ابتدا نحوه انتقال توان مدی از تار به تار دیگر را محاسبه نمود. یکی از مهم ترین پارامترهای مرتبط با موجبر تار نوری، بخشی از توان منتقل شده به هسته یا پوسته تار نوری است. توان مربوط به هسته و پوسته تار نوری به صورت زیر داده می شود:

بعد از ساده سازی می توان روابط زیر را به دست آورد [۲۱]:

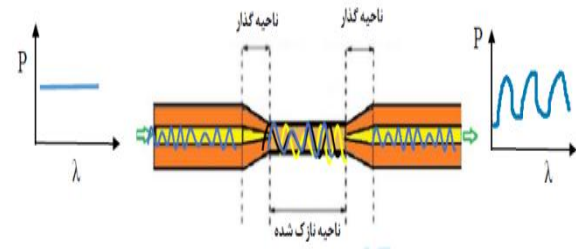
$$P_{core} = const. \int_0^a \int_0^{2\pi} |\psi|^2 r dr d\phi \quad (۳)$$

$$P_{clad} = const. \int_a^\infty \int_0^{2\pi} |\psi|^2 r dr d\phi \quad (۴)$$

$$P_{core} = A\pi a^2 \left[1 - \frac{J_{l-1}(U)J_{l+1}(U)}{J_l^2(U)} \right] \quad (۵)$$

برای تارهای نازک شده با قطر کوچک، هسته تقریباً در ناحیه نازک شده ناپدید شده و در پوسته ادغام می شود و ساختار حاصل یک تار نوری با پوسته هوا است که ضریب شکست هسته آن برابر با مقداری است که بین ضریب شکست های هسته و پوسته تار اصلی قرار دارد؛ بنابراین، عدد V برای تار نازک شده به دست آمده به دلیل اختلاف ضریب شکست بزرگ بین هسته و پوسته آن $(60 \lesssim V \lesssim 10)$ برای $2/5 \mu\text{m} > a > 15 \mu\text{m}$ به مقادیر بزرگ تر منتقل می شود؛ بنابراین، در ناحیه نازک شده با یک تار چند مدی روبرو می شویم که با کوپل شدن نور مناسب به قسمت ورودی، مدهای آن می توانند برانگیخته شوند.

به منظور بررسی انتشار نور، تار نوری نازک شده و قسمت های مختلف آن در شکل (۱) نشان داده شده است. مطابق شکل ۱، تار نوری نازک شده دارای سه قسمت است: تار نوری اصلی، ناحیه گذار و ناحیه نازک شده. تار اصلی یک تار تک مد (LP_{01}) است که از طریق ناحیه گذار به تار نازک شده (چند مد) متصل می شود. شکل نازک سازی، مدهایی که در ناحیه نازک شده تحریک می شوند را تعیین می کند. برای نازک سازی تار دو حالت وجود دارد که آدیاباتیکی و غیر آدیاباتیکی نامیده می شوند. در نازک سازی آدیاباتیکی، گذار به قدری روان است که حداقل توان در ناحیه گذار اتلاف می شود و مد LP_{01} به عنوان مد اصلی در تار اصلی، در ناحیه نازک شده به حضور خود ادامه می دهد. در حالت غیر آدیاباتیکی، گذار به صورت ناگهانی اتفاق می افتد و توان بیشتری در ناحیه گذار از دست می رود، به طوری که شانس زیادی برای مدهای بالاتر برای تحریک در ناحیه نازک شده وجود دارد.



شکل (۱): طرحواره تار نوری نازک شده و قسمت های مختلف آن.

۳- روش پلکانی^۱

برای درک سازوکار تغییر مدها در تار نوری نازک شده، همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، فرض می کنیم که قطر تار به صورت پله ای تغییر می کند. می توان این طور در نظر گرفت که در هر گام، تاری با یک V خاص وجود دارد که تعداد مدها را تعیین می کند. این مدها که مدهای موضعی نامیده می شوند، نقش حالت میانی را ایفا می کنند که سبب انتقال نور به ناحیه نازک شده می شوند. در ناحیه گذار (تا موقعی که هسته وجود

¹ Staircase Method

ضخامت لایه جاذب، از موج‌بری استفاده شده است که در آن n_1 ضریب شکست هسته تار، n_2 ضریب شکست لایه جاذب و n_3 ضریب شکست هوا است.

در این شبیه‌سازی، تار انتخاب شده تار تک مدی است که دارای مغزی با قطر $d=9\mu\text{m}$ و ضریب شکست $1/46$ و غلاف با قطر $d=125\mu\text{m}$ و ضریب شکست $1/453$ است.

با توجه به ساختار سه‌لایه‌ای معادلات بسل را می‌توان جداگانه در دو حالت مختلف حل کرد. یک حالت مربوط به ضریب شکست لایه جاذب بیشتر از ضریب شکست تار و حالت دیگر مربوط به زمانی است که ضریب شکست لایه کوچک‌تر از ضریب شکست تار باشد.

الف) وقتی ضریب شکست لایه بزرگ‌تر از تار باشد:

هنگامی که ضریب شکست لایه (n_2) بزرگ‌تر از ضریب شکست تار (n_1) باشد یعنی:

$$n_2 > n_1 > n_3$$

از آنجایی که مد مربوط به تار ورودی LP_{01} است بنابراین با توجه به تقارن، مدهای ایجاد شده در ناحیه نازک شده از نوع LP_{0m} هستند. با در نظر گرفتن این شروط و حل معادلات بسل، می‌توان عبارات زیر را در نواحی مختلف به دست آورد:

$$\psi(\rho, \varphi) = \begin{cases} AJ_0(\varepsilon\rho) & \rho < a \\ BJ_0(\gamma\rho) + CY_0(\gamma\rho) & a < \rho < b \\ DK_0(\delta\rho) & b < \rho \end{cases} \quad (10)$$

که در آن پارامترهای ε به صورت $(\varepsilon^2 = k^2 n_1^2 - \beta^2)$ به صورت γ به صورت $(\gamma^2 = k^2 n_2^2 - \beta^2)$ و δ به صورت $(\delta^2 = \beta^2 - k^2 n_3^2)$ به ثابت انتشار β ، عدد موج k و ضرایب شکست n_1, n_2, n_3 مرتبط هستند.

با در نظر گرفتن شرایط مرزی و پیوستگی توابع و مشتق آن‌ها در مرز می‌توان ضرایب مربوط به رابطه (۱۰) را محاسبه نموده و در نتیجه توابع در نواحی مختلف به دست می‌آیند. با مشخص شدن توابع در نواحی مختلف، می‌توان با استفاده از روابط (۸) و (۹) توان کوپل شده به مدهای مختلف و در نتیجه حساسیت حسگر را مورد بررسی قرار داد.

نمودار حساسیت بر حسب ضخامت لایه با ضریب شکست $n=2/7$ (به‌عنوان مثالی از ضرایب شکست لایه بزرگ‌تر از تار) و همچنین $d=12\mu\text{m}$ (قطر ناحیه نازک شده) در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان گونه که از شکل (۴) مشاهده می‌شود نقاط بهینه‌ای برای حساسیت وجود دارد.

$$P_{clad} = A\pi a^2 \left[\frac{K_{l-1}(W)K_{l+1}(W)}{K_l^2(W)} - 1 \right] \quad (6)$$

با توجه به روابط (۵) و (۶) می‌توان توان کل مربوط به تار نوری را به صورت زیر به دست آورد.

$$P_{tot} = P_{clad} + P_{core} \quad (7)$$

$$P_{tot} = A\pi a^2 \frac{V^2}{U^2} \left[\frac{K_{l-1}(W)K_{l+1}(W)}{K_l^2(W)} \right]$$

توان جفت شده از تاری به تار دیگر را می‌توان با همپوشانی انتگرال میدان ورودی و مدهای تار خروجی بر اساس رابطه زیر به دست آورد:

$$P_m = \left(\frac{1}{2\omega\mu_0} \right) \beta_m \left| \int \psi_m(\rho) E_{in}(\rho) z \right. \\ \left. = 0 \right| \rho d\rho \quad (8)$$

در آن $\psi_{lm}, \beta_m, E_{in}$ به ترتیب میدان ورودی، ثابت انتشار مد و پروفایل مد تار نوری متناظر با مد LP_{lm} هستند.

برای به دست آوردن حساسیت، مجموع انتگرال مدهای تار نوری نازک شده در خارج از تار نوری مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sum_m |c_m|^2 \int_a^\infty |\psi_m(\rho)|^2 \rho d\rho \quad (9)$$

که در آن $c_m = \int \psi_m(\rho) E_{in}(\rho \delta z = 0) \rho d\rho$ و a شعاع تار است.

فرایند محاسبه حساسیت تار نازک شده به صورت زیر است:

۱- با استفاده از معادله (۸)، توان جفت شده از بخش اولیه تار به بخش میانی تار محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه بخش میانی تار نیز مانند بخش نخست تار، یک تار تک مد است بنابراین فقط یک جفت‌شدگی LP_{01} - LP_{01} وجود دارد و مد دیگری تحریک نمی‌شود.

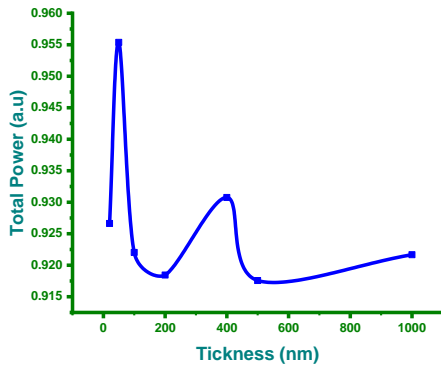
۲- با استفاده از معادله (۸)، توان جفت شده از بخش میانی تار به بخش نازک شده تار محاسبه می‌شود که در آن LP_{01} مد مربوط به بخش میانی به مد LP_{0m} مد مربوط به بخش نازک شده جفت می‌شود.

۳. برای به دست آوردن حساسیت سیستم، مجموع انتگرال مدهای تار نازک شده در خارج از تار مطابق رابطه (۹) حساب می‌شود (از شعاع تار تا بینهایت انتگرال گیری می‌شود).

۴- بررسی تأثیر ضخامت لایه جاذب بر حساسیت

حسگر

ضخامت لایه جاذب به‌عنوان یک پارامتر مؤثر می‌تواند تأثیر قابل توجهی در حساسیت حسگر داشته باشد. به‌منظور بررسی اثر



شکل (۶): توان مؤثر جفت شده به مدهای اول و دوم

ب) وقتی ضریب شکست لایه کوچک تر از تار باشد: وقتی ضریب شکست لایه جاذب کوچک تر از ضریب شکست تار باشد:

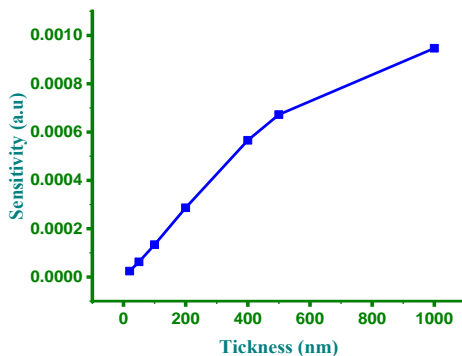
$$n_1 > n_2 > n_3$$

با در نظر گرفتن این شرط و حل معادلات بسل، می توان عبارات زیر را در نواحی مختلف به دست آورد:

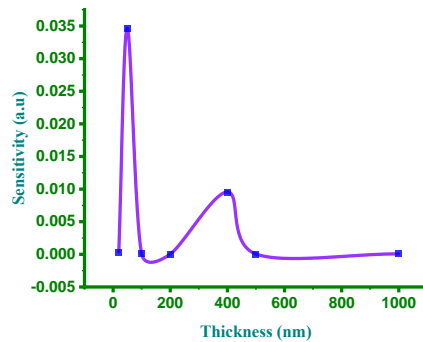
$$\psi(\rho, \varphi) = \begin{cases} AJ_0(\varepsilon\rho) & \rho < a \\ BI_0(\gamma\rho) + CK_0(\gamma\rho) & a < \rho < b \\ DK_0(\delta\rho) & b < \rho \end{cases} \quad (11)$$

با در نظر گرفتن شرایط مرزی و پیوستگی توابع و مشتق آنها در مرز می توان ضرایب مربوط به رابطه (۱۱) را محاسبه نموده و در نتیجه مشابه حالت قبل، حساسیت و توان مدهای مختلف را محاسبه کرد.

نمودار حساسیت برحسب ضخامت لایه با ضریب شکست نمودار حساسیت برحسب ضخامت لایه با ضریب شکست $n=1/35$ و $d=12\mu\text{m}$ (قطر ناحیه نازک شده) در شکل (۷) نشان داده شده است. همان گونه که از شکل مشاهده می شود حساسیت با افزایش ضخامت لایه جاذب رفتاری به صورت افزایشی دارد.



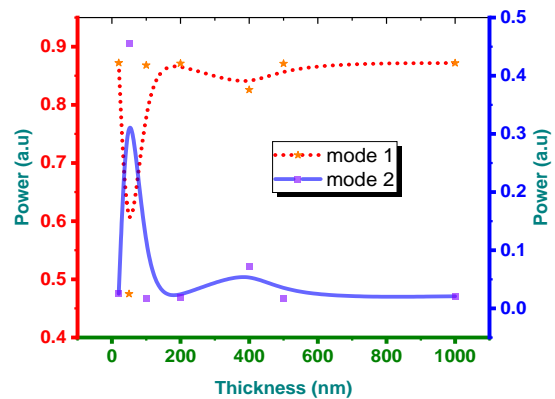
شکل (۷): حساسیت برحسب ضخامت لایه جاذب با $n=1/35$



شکل (۴): حساسیت برحسب ضخامت لایه جاذب با $n=2/7$.

علت رفتار مشاهده شده در شکل (۴) وجود مدهای غلاف (لایه جاذب) و تزویج قوی با این مدها در ضخامت های خاصی است که منجر به بیشینه های مشاهده شده در این شکل می شود. اگر لایه ای با ضریب شکست بالاتر از ضریب شکست پوسته روی یک تار قرار گیرد، خود لایه جاذب به عنوان موج بر عمل می کند و اگر ضخامت افزایش یابد، مدهای بیشتری در این موج بر قرار می گیرند.

برای روشن شدن تأثیر رقابت مد در منحنی حساسیت، مقدار توان کوپل شده به دو مد اول و کل توان کوپل شده در شکل ۵ داده شده است. در این حالت ضریب شکست $n=2/7$ و قطر تار نازک شده به اندازه $d_2=4\mu\text{m}$ و $d_3=18\mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است. همان طور که مشهود است، طیف حساسیت شکل (۴) مسیر توان مد دوم در شکل (۵) را دنبال می کند.



شکل (۵): توان مؤثر جفت شده برای مدهای اول و دوم به خارج از تار نازک شده

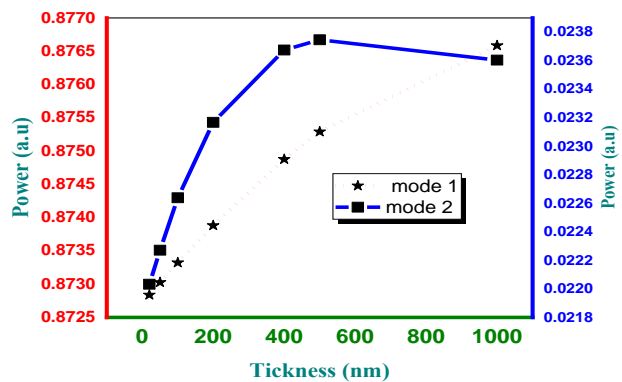
توان مؤثر جفت شده به مدهای اول و دوم در خارج از تار در شکل (۶) نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است مجموع توان کوپل شده به مدهای اول و دوم نیز رفتاری مشابه توان کوپل شده به مد دوم را دارد و این نیز به دلیل ارتباط حساسیت با مدهای مرتبه بالاتر است که گستردگی فضایی بیشتری دارند و تأثیر فراوانی در حساسیت حسگر دارند.

لایه جاذب بر حساسیت حسگر برای بازه وسیعی از ضرایب شکست مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که تأثیر ضخامت لایه جاذب بر حساسیت حسگر قابل ملاحظه بوده و بستگی به ضریب شکست لایه جاذب دارد. وقتی که ضریب شکست لایه کوچک‌تر از تار باشد، با افزایش ضخامت، حساسیت حسگر بیشتر می‌شود اما هنگامی که ضریب شکست لایه بزرگ‌تر از ضریب شکست تار باشد در نمودار حساسیت بر حسب ضخامت، نقاط بهینه‌ای وجود دارد که در این نقاط حساسیت بیشینه است.

۶- مراجع

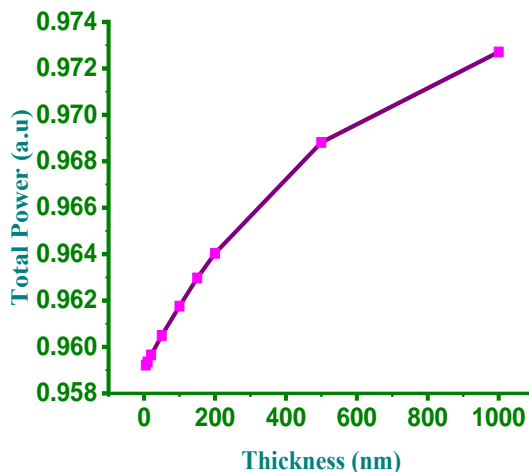
- [1] A. Malekzadeh, "Combination of phase and frequency correlation in Brillouin dynamic sensor to achieve spatial resolution in the range of millimeters in more than 17 km of optical fiber in Persian," *Journal of Applied Electromagnetism*. vol. 23, pp. 1-7, 2021.
- [2] Y. Shahamat, "Mid-infrared plasmonically induced absorption and transparency in a Si-based structure for temperature sensing and switching applications," *Optics Communications*. vol. 430, pp. 227-233, 2019.
- [3] N. Rasouli, "Design and Simulation of a Novel Surface Plasmon Based Bio-Nanosensor for Detection of DNA Hybridization in Persian," *Journal of Passive Defence Science and T*. vol. 11, pp. 275-278, 2020.
- [4] Z. Najafi, "The role of refractive index gradient on sensitivity and limit of detection of microdisk sensors," *Optics Communications*. vol. 374, pp. 29-33, 2016.
- [5] A. Riahi, "Simulation and Fabrication of Tapered Fiber Optics Hydrogen Sensor in Persian," *Journal of Applied Electromagnetic*. vol. 6, pp. 15-21, 2018.
- [6] R. Verma, "Modeling of tapered fiber-optic surface plasmon resonance sensor with enhanced sensitivity," *IEEE Photonics Technology Letters*. vol. 22, pp. 1786-1788, 2007.
- [7] F.S. Roslan, "Relative Humidity Sensor based on Tapered Plastic Optical Fibre with Full-and Spiral-Patterned Agarose Gel Coating," *IEEE Student Conference on Research and Development (SCOREd)*. IEEE, 2020.
- [8] C.D. Singh, "A theoretical study of tapered, porous clad optical fibers for detection of gases," *Sensors and Actuators B: Chemical*. vol. 92, pp. 44-48, 2003.
- [9] A. Syuhada, "Single-Mode Modified Tapered Fiber Structure Functionalized with GO-PVA Composite Layer for Relative Humidity Sensing," *Photonic Sensors*. pp. 1-11, 2020.
- [10] R.K. Verma, "Sensitivity enhancement of a lossy mode resonance based tapered fiber optic sensor with an optimum taper profile," *Journal of Physics D: Applied Physics*. vol. 415302, 2018.
- [11] A. M. Aris, "Enhanced relative humidity sensing based on a tapered fiber bragg grating with zinc

به‌منظور توجیه این رفتار توان جفت شده به مدهای اول و دوم را مورد بررسی قرار می‌دهیم. همان گونه که از شکل (۸) مشاهده می‌شود توان جفت شده به مدهای اول و دوم به‌صورت افزایشی است که رفتاری مشابه حساسیت را دارد.



شکل (۸): توان جفت شده به مدهای اول و دوم

توان مؤثر جفت شده به مدهای اول و دوم توجیه رفتار را کامل‌تر می‌کند. همان گونه که از شکل (۹) مشاهده می‌شود نمودار مربوط به توان مؤثر جفت شده به مدها بر حسب ضخامت لایه جاذب افزایشی است و رفتاری کاملاً شبیه به رفتار حساسیت دارد.



شکل (۹): توان مؤثر جفت شده به مدهای اول و دوم

۵- نتیجه‌گیری

به طور خلاصه، در این مقاله، یک مدل جدید بر اساس روش پله‌ای و تئوری جفت‌شدگی مد برای تجزیه و تحلیل پاسخ نوری یک تار نازک شده پیشنهاد و بررسی شده است. به دلیل جلوگیری از محاسبات پیچیده در روش‌هایی مانند المان محدود (FEM) یا FDTD، از روش پله‌ای (SCM) استفاده شده است که از سادگی بالایی نسبت به روش‌های دیگر برخوردار بوده و نیازی به محاسبات قوی ندارد. این مدل به‌منظور بررسی تأثیر ضخامت

- [18] K. Wysocki, "Study on the sensing coating of the optical fibre CO₂ sensor," *Sensors*. vol. 15, pp. 31888-31903, 2015.
- [19] G. Y. Chen, "Ultra-fast hygrometer based on U-shaped optical microfiber with nanoporous polyelectrolyte coating," *Scientific reports*. Vol. 7, pp. 1-7, 2017.
- [20] A. Riahi, "Investigation of the effect of the taper geometry on the sensitivity of tapered-fibre gas sensors," *Journal of Modern Optics*. vol. 67, pp. 1259-1266, 2020.
- [21] A. Riahi, "Theoretical investigation of the effect of the geometry on the sensitivity of tapered-fiber sensors based on staircase concatenation method," *Journal of Modern Optics*. vol. 69, pp. 1-7, 2022.
- [22] A. Ghatak, "Introduction to fiber optics", Cambridge university press, 1998.
- oxide nanostructure-embedded coatings," *Advanced Science Letters*. vol. 23, pp. 5452-5456, 2017.
- [12] J. M. Corres, "Design of humidity sensors based on tapered optical fibers," *Journal of Lightwave Technology*. vol. 24, pp. 4329-4336, 2006.
- [13] D. Villar, "Influence on cladding mode distribution of overlay deposition on long-period fiber gratings," *JOSA A*. vol. 23, pp. 651-658, 2006.
- [14] D. D. Monzón-Hernández, "Fast response fiber optic hydrogen sensor based on palladium and gold nanolayers," *Sensors and Actuators B: Chemical*. vol. 136, pp. 562-566, 2009.
- [15] N. Raoufi, "Wavelength dependent pH optical sensor using the layer-by-layer technique," *Sensors and Actuators B: Chemical*. vol. 169, pp. 374-381, 2012.
- [16] L. L. Xue, "Sensitivity enhancement of RI sensor based on SMS fiber structure with high refractive index overlay," *Journal of lightwave technology*. vol. 30, pp. 1463-1469, 2012.
- [17] A. Socorro, "Sensitivity enhancement in a multimode interference-based SMS fibre structure coated with a thin-film: Theoretical and experimental study," *Sensors and Actuators B: Chemical*. vol. 190, pp. 363-369, 2014.