

## حسگر فیبر نوری بر اساس رزونانس پلاسمون سطح

مهران کریمیان ریزی<sup>۱</sup>

وحید رنجبر عین‌الدین<sup>۲</sup>

محمد عادل<sup>۳</sup>

حسیب بگری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی پزشکی، دانشگاه تبریز، ایران، mehrankarimian97@ms.tabrizu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی پزشکی، دانشگاه تبریز، ایران، v.ranjbar98@ms.tabrizu.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی بیومکانیک، دانشگاه تبریز، ایران، mohammad.adeli97@ms.tabrizu.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشجو کارشناسی ارشد، مهندسی افزارهای میکرو و نانوالکترونیک، دانشگاه تبریز، ایران h.beglari97@ms.tabrizu.ac.ir

**چکیده:** یک حسگر شاخص انکسار فیبر نوری میکرو ساختار، با استفاده از فیلم طلائی نانومقیاس بر اساس رزونانس پلاسمون سطح (SPR)، توسط روش المان محدود (FEM) پیشنهاد شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج عددی نشان می‌دهد که حساسیت متوسط ۱۵،۹۳۳ نانومتر / واحد شاخص شکست (RIU) با شاخص انکسار آنالیت در محدوده ۱،۴۰ تا ۱،۴۳ و حداکثر حساسی ۲۸،۶۰۰ nm/RIU و رزولوشن سنسور  $RIU \times 10^{-8} \times 3.5$  است. سنسور شاخص انکسار فیبر نوری میکرو ساختار، برخی از تغییرات در سنسور فیبر D شکل را انجام می‌دهد، در مقایسه با سنسور فیبر متداول D شکل، حساسیت بیشتری دارد و از سنسور SRR سنتی، ساده تر تولید می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** فیبر نوری میکرو ساختار، رزونانس پلاسمون سطح، حسگر

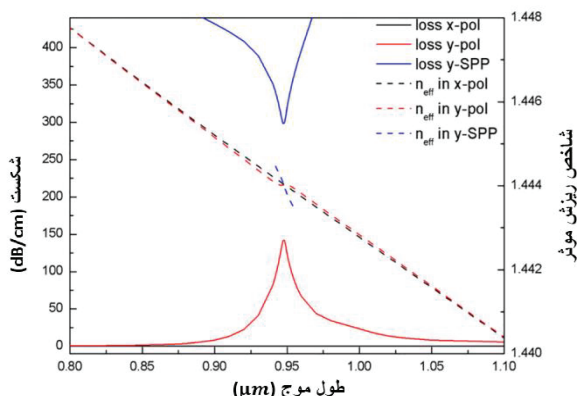
### ۱. مقدمه

هسته هدایت شده باید به سطح فلز نفوذ کند. چند روش برای دستیابی به آن وجود دارد. روش‌های معمول این است، ساخت فیلم فلزی بر روی سطح داخلی سوراخ‌های هوا فیبر نوری یا پر کردن سیم‌های فلزی، از طریق این طرح‌ها، حسگر SPR فیبر نوری می‌تواند تحقق یابد. با این حال، به دلیل ضخامت پوشش ناهموار، ساخت این طرح بسیار چالش برانگیز است. بنابراین، سنسور فیبر ساختار میکرو ساختار D پیشنهاد شده است، و سنسورهای SPR فیبر کریستال فوتونیک D دارای تعداد زیادی کاربرد در شاخص انکساری آنالیت هستند. در سال ۲۰۱۲، یک سنسور فیبر نوری فوتونی بر اساس SPR توسط تیان و همکاران پیشنهاد شده است. حساسیت می‌تواند به مقدار  $7300 \text{ nm/RIU}$  برسد. حسگر D شکل با حساسیت  $7700 \text{ nm/RIU}$  توسط Gangwar و همکاران در سال ۲۰۱۶ ارائه شد. [۱۴-۱۵]

در این مقاله برخی از تغییرات در سنسور SPR D شکل گرفته

تکنولوژی رزونانس پلاسمون سطح (SPR) تکنولوژی جدیدی است که در دهه ۱۹۹۰ ساخته شده است و به طور گسترده در حوزه سنجش استفاده می‌شود. هنگامی که نور بر روی سطح فلز رخ می‌دهد و فرکانس آن مطابق با فرکانس الکترون آزاد از سطح فلز است، پدیده SPR رخ می‌دهد [۱-۳]. فیبر نوری میکرو ساختار بسیاری از ویژگی‌های عالی، مانند اتلاف کم، منطقه حالت بزرگ، دو طرفه شدن بالا را دارا می‌باشد [۴-۹]. و بسیاری از دستگاه‌ها بر اساس فیبرهای نوری میکرو ساختار یافته، از جمله سنسورها، توزیع کننده طول موج، اسپکتروم پلاریزاسیون، فیلترهای لیزر فیلتر قطبی و غیره طراحی و اجرا شده‌اند [۱۰-۱۳]. در سال‌های اخیر، سنسورهای فیبر نوری با ساختار میکرو سازگار بر اساس SPR با توجه به عملکرد حساس بالا، توجه زیادی را به خود جلب کرده است.

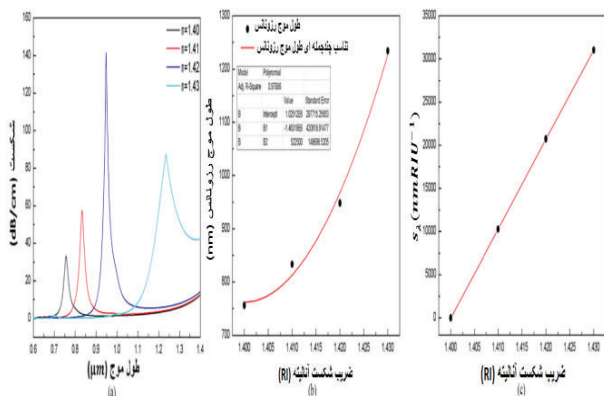
برای به دست آوردن حسگر SPR فیبر نوری میکرو ساختار، نور



شکل ۲- ضریب شکست و ریزش موثر سنسور پیشنهاد شده با آنالیت RI n=1.4

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \lambda^2}{\lambda^2 - b_i^2} \quad (1)$$

که  $\lambda$  طول موج نور حادثه است که واحد آن میکرومتر است. و  
 $a_2 = 0.4079426$        $a_1 = 0.6961663$   
 $b_1 = 0.0684043 \mu\text{m}$ ,  $a_3 = 0.4079426$   
 $b_3 = 9.896161 \mu\text{m}$ ,  $b_2 = 0.1162414 \mu\text{m}$   
 (۱) طول موجی بین ۰,۳۷ تا ۲,۲ میکرو متر است.



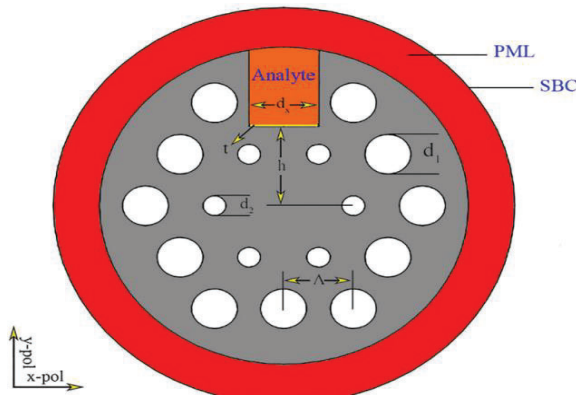
شکل ۳ - (a) تغییرات پیک‌های از دست رفته، (b) منحنی اتصالات عددی طول موج رزونانس و (c) منحنی حساسیت با RIهای مختلف تجزیه‌کننده

شده است. حسگر شاخص انکسار فیبر نوری با میکروساختار شیار با فیلم طلای نانو مقیاس بر اساس رزونانس پلاسمون سطح پیشنهاد شده است. حساسیت متوسط  $15.933 \text{ nm}/RIU$  است که شاخص انکساری آنالیت از  $1.40$  به  $1.43$  و حداکثر حساسیت  $28.600 \text{ nm}/RIU$  می‌باشد. ساخت فیبر نوری میکرو ساختار می‌تواند تو سط فن آوری نانو ما شینکاری AFM تهیه شود [۱۶].

## ۲. ساختار و مدل سازی نظری:

سطح مقطعی از سنسور فیبر نوری میکرو ساختار شیار، در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که می‌بینیم، فیبر نوری میکرو ساختار شامل دو لایه حفره های هوا است. قطر سوراخ های هوا بزرگ  $d_1 = 2 \mu\text{m}$  است و قطر سوراخ های هوا کوچک  $d_2 = 1.2 \mu\text{m}$  است. محدوده شبکه(توری)  $\Lambda = 3$  است. شیار در قسمت بالای فیبر وجود دارد. عرض شیار  $d_x = 3 \mu\text{m}$  است. فاصله از مرکز فیبر نوری به شیار  $h = 4$  میکرون است. یک فیلم طلایی پایین شیار را پوشش می‌دهد و ضخامت فیلم طلایی  $t = 35 \text{ nm}$  است.

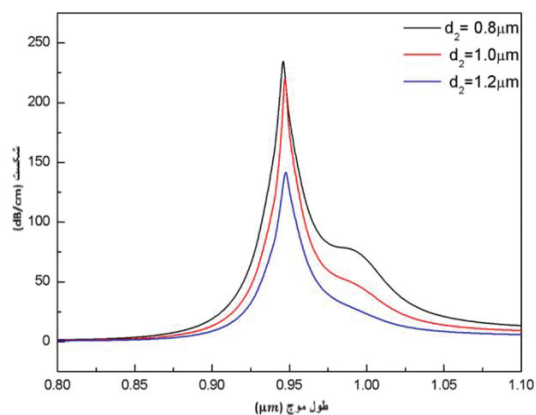
روش تجزیه و تحلیل عناصر محدود (FEM) برای تجزیه و تحلیل ویژگی های سنسور SPP میکرو ساختار فیبر نوری توسط نرم افزار COMSOL Multiphysics استفاده می‌شود. لایه همگرا و شرایط مرزی پراکنده (SBC) برای جذب انرژی استفاده می‌شود. در شکل ۱، منطقه قرمز نشان دهنده لایه PML است، مایع آنالیزر در ناحیه نارنجی پر شده است، مواد پس زمینه سیلیکون خالص است که بخش خاکستری شکل ۱ است. پراکندگی رنگی آن را می‌توان با معادله Sellmeier محاسبه کرد [۱۷] که به صورت زیر تعریف می‌شود:



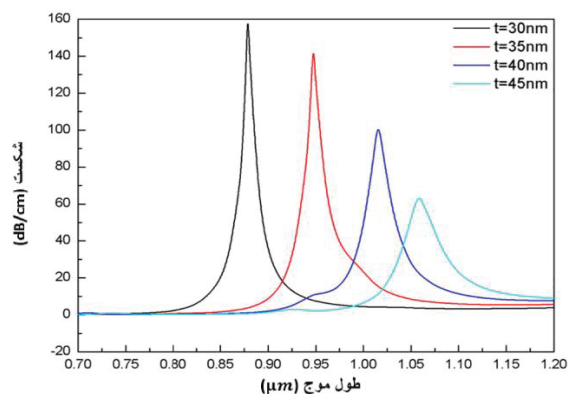
شکل ۱. سطح مقطع سنسور فیبر نوری و میکرو ساختار کانال

جدول ۱: تغییرات موج و طول موج رزونانس با RI های مختلف

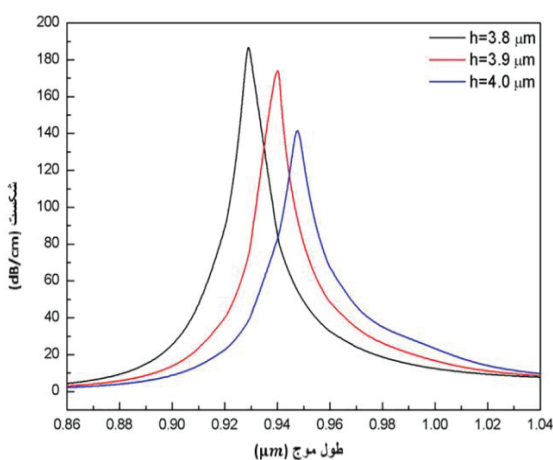
آنالیزر				
RI	1.43	1.42	1.41	1.40
طول موج (nm)	1234	948	833	756
شکست (dB/cm)	87.72	142.34	57.56	33.22



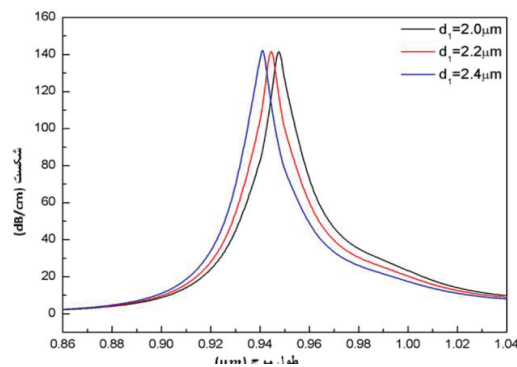
شکل ۶- طیف از دست دادن با قطر سوراخ کوچک تغییر می کند  $d_2=0.8\mu m$  زمانی که RI آنالیت است در  $n=1.42$



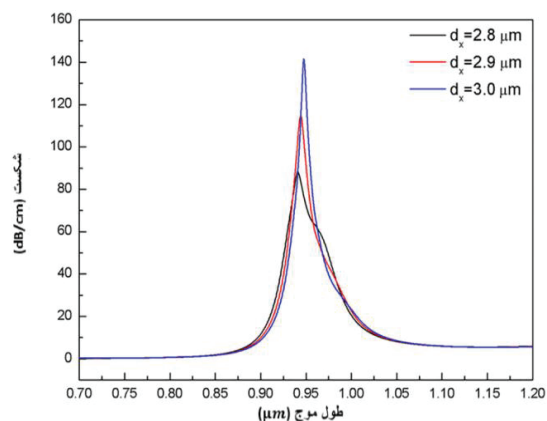
شکل ۴- طیف از دست دادن با ضخامت متفاوت فیلم طلا تغییر می کند زمانی که RI آنالیت  $n=1.42$  باشد.



شکل ۷- تاثیر بر پیک های از دست رفته توسط ارتفاع های مختلف از شیار به ناحیه هسته با RI آنالیت  $n=1.42$



شکل ۵- طیف افت با قطر بزرگ سوراخ  $d_1=20\mu m, 2.4\mu m$  تغییر می کند زمانی که RI آنالیت  $n=1.42$



شکل ۸- تاثیر طیف از دست دادن توسط عرض مختلف شیار در شکل ۸ با تحلیل RI مورد بحث قرار گرفته است  $n=1.42$

جدول ۲: خصوصیات سنسورهای فیبر نوری مبتنی بر SPR

حساسیت ( RIU ) / nm	تشخیص محدوده RI	ساختار نوری و مرجع
2900	1.33-1.34	سنسور فیبر نوری فوتونیک D-شکل [۲۲]
5500	1.37-1.41	سنسور PCF آنته خابی پوشش داده شده [۲۱]
7300	1.33-1.3	سنسور فیبر نوری فوتونیک D-شکل [۱۴]
7700	1.43-1.46 ]	سنسور فیبر نوری فوتونیک D-شکل [۱۵]
15,933	1.40-1.43	سنسور فیبر فوتونیک شکل شیار (کار ما)

موثر حالت است [۱۸].  
برای هسته فیبر و حالت SPP، معادلات اتصال بین دو حالت می‌تواند بیان شود:

$$\frac{dE_1}{dz} = i\beta_1 E_1 + ikE_2$$

$$\frac{dE_2}{dz} = ikE_1 + i\beta_2 E_2$$

که  $E_1$ ،  $E_2$  جزء میدان الکتریکی دو حالت اتصال است،  $\beta_1$  و  $\beta_2$  ثابت انتشار در دو حالت است،  $k$  قدرت استحکام اتصال است و  $z$  فاصله انتشار است [۱۹].

شکل ۲ ضریب شکست و ریزش موثر سنسور پیشنهادی را با ضریب شکست انحلال  $n = 1.42$  نشان می‌دهد. همانطور که می‌بینیم، هنگامی که شرایط تطابق فاز راضی است، رزونانس سطح پلاسمون از بین خواهد رفت، و اوج تلفات حالت  $y$ -pol به تدریج افزایش می‌یابد و از دست دادن حالت  $y$ -SPP شروع به کاهش می‌کند. در ضمن، شاخص ریزش موی حالت  $y$ -SPP و  $y$ -pol جهش را نشان می‌دهد، که نشان می‌دهد که برخی از انرژی‌های حالت هسته به فیلم طلائی منتقل می‌شود. اما برای حالت  $x$ -pol هیچ تناقضی وجود ندارد.

### ۳. نتایج شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل

حساسیت حسگرها پارامتر مهمی است که می‌توان آن را با شیفت رزونانس و یا تغییر شاخص انکساری آنالیت (ماده مورد تجزیه) محاسبه نمود. حساسیت سنسور  $\Delta n$  را می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

$$S_\lambda (nmRIU^{-1}) = \Delta \lambda_{speak} / \Delta n \quad 5$$

که در آن  $\Delta \lambda_{speak}$ ، میزان جابه جایی طول موج رزونانس و  $\Delta n$  نیز تغییر آنالیت RI است.

شکل ۳ (الف) میزان شیفت نقطه ی پیک تلفات را با تغییر شاخص های انکساری مختلف آنالیت از ۱،۴۰ تا ۱،۴۳ نشان می‌دهد. واضح است که طول موج رزونانس با افزایش مقدار RI آنالیت به رنگ قرمز شیفت پیدا می‌کند. نتایج برازش عددی در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است. ضریب تعیین تعدیل شده ۰،۹۷۹۸۶ است. داده های دقیق تر در جدول ۱ نشان داده می‌شوند. شیب منحنی، حساسیت حسگر را نشان می‌دهد و منحنی حساسیت با مقادیر مختلف RI آنالیت در شکل ۳ (c)

جریان الکتریکی طلا توسط Drude-Lorentz محاسبه می‌شود که مدل، آن را می‌توان به عنوان زیر بیان کرد [۱۸]:

$$\epsilon_m = \epsilon_\infty - \frac{\omega_D^2}{\omega(\omega + j\gamma_D)} - \frac{\Delta\epsilon \cdot \Omega_L^2}{(\omega^2 - \Omega_L^2) - j\Gamma_L\omega} \quad (2)$$

که  $\epsilon_m$  تابش نسبی طلا است،  $\epsilon_\infty$  محدودیت مجاز در فرکانس بالا است،  $\epsilon_\infty = 5.9673$ ، فرکانس پلاسمون  $\omega_D/2\pi = 2013.6THz$ ،  $\omega_D/2\pi = 15.92THz$  فرکانس خنثی شده است. فاکتور وزن را می‌توان با  $\Delta\epsilon = 1.09$ ،  $\Omega_L$  و  $\Gamma_L$  نشان داد است. عرض طیفی اصطلاح نوسانی لورنتز به ترتیب و فرکانس  $\Omega_L/2\pi = 650.07THz$ ؛  $\Gamma_L/2\pi = 104.76THz$  است. دست دادن حالت تعریف شده است:

$$L = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} Im(n_{eff}) \times 10^4 \quad (3)$$

که واحدهای از دست دادن و طول موج به ترتیب  $dB/cm$  و میکرومتر هستند، و  $Im(n_{eff})$  بخشی خیالی از شاخص ریزش

نشان داده شده است.

رزولوشن حسگر به صورت زیر تعریف می شود:

$$R = \Delta n \Delta \lambda_{\min} / \Delta \lambda_{\text{speck}} \quad (6)$$

که در آن، مقدار  $\Delta n$  میزان تغییر شاخص انکساری مایع در آنالیت است.  $\Delta \lambda_{\min}$  حداقل میزان رزولوشن طیفی است و با در نظر گرفتن مقدار  $\Delta \lambda_{\min} = 0.1$  نانومتر،  $\Delta \lambda_{\text{speck}}$  میزان جابه جایی پیک رزونانس خواهد بود. سپس مقدار رزولوشن حسگر برابر با  $RIU 3.5 \times 10^{-8}$  محاسبه می شود.

نسبت سیگنال به نویز (SNR)، پارامتر مهم دیگری برای اندازه گیری مشخصات حسگر است. این مقدار را می توان با استفاده از شایستگی عددی (FOM) به دست آورد، که به صورت تعریف می شود:

$$FOM = \frac{S_{\lambda}}{FWHM} \quad (7)$$

که در آن مقدار FWHM، عرض کامل در نیمه ی حداکثر طیف است.  $R_k$  نیز میزان حساسیت حسگر است.

شکل ۴ تغییرات طیف تلفات را در ضخامت های مختلف فیلم طلا نشان می دهد که در آن مقدار RI آنالیت برابر با  $n = 1.42$  است. همان طور که می بینیم، مقدار پیک تلفات به تدریج کاهش یافته و مقدار FWHM با افزایش ضخامت فیلم طلا، افزایش می یابد. با این حال، تحقیقات نشان می دهد که حساسیت حسگر پیشنهادی به دلیل محدودیت عمق پوست در پلاسمون های سطح کاهش یافته است [۲۰]. در اینجا، ضخامت فیلم طلا برابر با ۳۵ نانومتر انتخاب شده است تا از حساسیت و SNR خوب، اطمینان پیدا کنیم.

شکل ۵، تغییرات طیف تلفات را با تغییر قطر حفره های بزرگ  $d_1 = 2.0 \mu\text{m}$  و  $2.4 \mu\text{m}$  نشان می دهد که در آن مقدار RI آنالیت برابر با  $n = 1.42$  است. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، مقدار پیک تلفات تغییرات اندکی داشته و طول موج رزونانس با افزایش مقدار قطر حفره بزرگ  $d_1$ ، به سمت منحنی آبی رنگ شیفت پیدا می کند.

شکل ۶ تغییرات طیف تلفات را با تغییر قطر حفره های کوچک  $d_2 = 0.8 \mu\text{m}$  و  $1 \mu\text{m}$  نشان می دهد که در آن، مقدار RI آنالیت  $n = 1.42$  است. نتایج نشان می دهد که مقدار پیک تلفات کاهش یافته و طول موج رزونانس نیز با افزایش قطر  $d_2$  دارای شیفت ناچیزی در قرمز است؛ زیرا نور دارای نشتی کمتری به روکش است و با افزایش قطر حفره های کوچک، به

تدریج کاهش می یابد.

تأثیر ارتفاع های مختلف، از شیار تا سطح هسته با مقدار RI آنالیت  $n = 1.42$  در شکل ۷ نشان داده شده است. واضح است که مقدار پیک تلفات کاهش یافته و طول موج رزونانس نیز با افزایش مقدار  $h$ ، شیفت به قرمز می یابد. از آنجا که ارتفاع شیار تا هسته افزایش می یابد، برای حالت هسته و جفت شدن فیلم طلا سخت تر شده و انرژی بیش-تری در سطح هسته نگهداری می شود تا میزان تلفات کاهش یابد.

علاوه بر این، تأثیر طیف تلفات با عرض شیارهای مختلف و با مقدار RI آنالیت  $n = 1.42$  در شکل ۸ مورد بحث قرار گرفته است. همانطور که عرض شیار افزایش می یابد، مقدار پیک تلفات نیز کاهش یافته و طول موج رزونانس به قرمز شیفت می یابد؛ زیرا با افزایش عرض شیار، سطح اتصال (جفت شدگی) بین هسته و فیلم طلا افزایش یافته و میزان تلفات نیز افزایش می یابد.

حسگر پیشنهادی با برخی از حسگرهای قبلی مقایسه شده و داده های خاص در جدول ۲ نشان داده شده است.

#### ۴. ذن نتیجه گیری

در این مقاله، یک حسگر شاخص انکساری فیبر نوری با شیارهای میکروساختار همراه با فیلم طلای نانو و براساس رزونانس پلاسمون سطح پیشنهاد شده است. ویژگی های حسگر توسط FEM و SBC تجزیه و تحلیل شده است. حسگر پیشنهادی می تواند آنالیت را در محدوده  $1.40$  تا  $1.43$  اندازه گیری کند.

نتایج شبیه سازی عددی نشان می دهد، زمانی که قطر حفره های بزرگ هوایی  $d_1 = 2.0 \mu\text{m}$ ، قطر حفره های کوچک هوایی  $d_2 = 1.2 \mu\text{m}$ ، ضخامت فیلم طلا  $t = 35 \text{ nm}$ ، مقدار ارتفاع از هسته تا شیار  $h = 4.0 \mu\text{m}$  و عرض شیار  $d_x = 3 \mu\text{m}$  باشد، حداکثر میزان حساسیت، بالای  $RIU 28,600$  است و رزولوشن حسگر  $RIU 3.5 \times 10^{-8}$  و ضریب تعیین تعدیل شده هم  $0.97986$  است. در مقایسه با حسگرهای موجود در گزارش های قبلی، حسگر پیشنهادی دارای میانگین حساسیت بالایی می باشد. نمونه ی حسگر پیشنهاد شده، به سادگی تولید و استفاده می شود و در زمینه ی حساسیت زیستی قابل رقابت می باشد.

۵. مرجع
- [15] Rahul Kumar Gangwar, V.K. Singh, Highly sensitive surface plasmon resonance based D-shaped photonic crystal fiber refractive index sensor, *Plasmonics* (2016) 1–6.
- [16] P. Peng, et al., Combined AFM nano-machining and reactive ion etching to fabricate high aspect ratio structures, *J. Nanosci. Nanotechnol.* 10 (11) (2010) 7287.
- [17] I.H. Malitson, Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica\*, *J. Optical Soc. Am.* 55 (1965) 1205–1208.
- [18] Alexandre Vial, et al., Improved analytical fit of gold dispersion: application to the modeling of extinction spectra with a finite-difference time-domain method, *Phys. Rev. B Condensed Matter* 71 (8) (2005) 85416.
- [19] Z. Zhang, Y. Shi, B. Bian, J. Lu, Dependence of leaky mode coupling on loss in photonic crystal fiber with hybrid cladding, *Optics Express* 16 (3) (2008) 1915–1922.
- [20] J. Homola, Present and future of surface plasmon resonance biosensors, *Anal. Bioanal. Chem.* 377 (3) (2003) 528–539.
- [21] Xia Yu, et al., A selectively coated photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensor, *J. Optics* 12 (1) (2010) 015005.
- [22] N. Luan, et al., Surface plasmon resonance sensor based on D-shaped microstructured optical fiber with hollow core, *Optics Express* 23 (7) (2015) 8576–8582.
- [1] Jiří Homola, S.S. Yee, G. Gauglitz, Surface plasmon resonance sensors: review, *Sensors Actuators B Chem.* 54 (1–2) (1999) 3–15.
- [2] B.D. Gupta, R.K. Verma, Surface plasmon resonance-based fiber optic sensors: principle, probe designs, and some applications, *J. Sensors* 2009 (2) (2009) 12.
- [3] E.K. Akowuah, et al. A highly sensitive photonic crystal fibre (PCF) surface plasmon resonance (SPR) sensor based on a bimetallic structure of gold and silver. *IEEE, International Conference on Adaptive Science & Technology, IEEE, 2012, 121-125.*
- [4] M.J. Gander, et al., Experimental measurement of group velocity dispersion in photonic crystal fibre, *Electron. Lett.* 35 (1) (1999) 63–64.
- [5] N.A. Mortensen, et al., Improved large-mode-area endlessly single-mode photonic crystal fibers, *Optics Lett.* 28 (6) (2003) 393.
- [6] C. Jacobsen, et al., Low-loss photonic crystal fibers for transmission systems and their dispersion properties, *Optics Express* 12 (7) (2004) 1372–1376.
- [7] Meisong Liao, et al., A highly non-linear tellurite microstructure fiber with multiring holes for supercontinuum generation, *Optics Express* 17 (18) (2009) 15481.
- [8] A. Ortigosablanch, et al., Highly birefringent photonic crystal fibers, *Optics Lett.* 25 (18) (2000) 1325–1327.
- [9] K. Saitoh, et al., Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion, *Optics Express* 11 (8) (2003) 843–852.
- [10] Yuanyuan Wang, et al., A super narrow band filter based on silicon 2D photonic crystal resonator and reflectors, *Optics Commun.* 363 (2016) 13–20.
- [11] Shijie Zheng, M. Ghandehari, J. Ou, Photonic crystal fiber long-period grating absorption gas sensor based on a tunable erbium-doped fiber ring laser, *Sensors Actuators B Chem.* 223 (2016) 324–332.
- [12] Mohammad Reza Almasian, K. Abedi, A proposal for optical WDM using embedded photonic crystal ring resonator with distributed coupling, *Phys. E: Low-dimensional Systems Nanostruct.* 79 (2016) 173–179.
- [13] Wen Ying Yao, et al., Flat-topped hollow laser beams can be obtained by using the multi-core photonic crystal fiber mixed with GeO<sub>2</sub>, *Optik – Int. J. Light Electron. Optics* 126 (23) (2015) 3761–3766.
- [14] Ming Tian, et al., All-solid D-shaped photonic fiber sensor based on surface plasmon resonance, *Optics Commun.* 285 (6) (2012) 1550–1554.