طراحی و شبیهسازی حسگر ضریب شکست مبتنی بر بازتاب دهندهٔ پلاسمونی براگ

محمد واحدى\*، مجتبى مرادخانى؛ دانشگاه علم و صنعت، دانشکدهٔ فیزیک

دریافت: ۹۸/۱۱/۱۲ یذیرش: ۹۹/۱۱/۱۵

چكىدە

در این مقاله، یک حسگر پلاسمونی ضریب شکستی مبتنی بر ساختار موجبر فلز-دی الکتریک- فلز و با به کارگیری یک بازتاب دهندهٔ براگ پیشنهاد شده و از شبیه سازی دوبعدی با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزهٔ زمان FDTD استفاده شده است. نتایچ نشان می دهند که با استفاده از یک بازتاب دهندهٔ براگ در کنار یک تشدیدگر مستطیلی، می توان به حساسیت و فاکتور شایستگی ۱۳۲۰ nm/RIU و ۲۰ ۴۵/۵ RIU در حسگر طراحی شده دست یافت. نشان داده شده است که با استفاده از بازتاب دهندهٔ براگ می توانیم فاکتور شایستگی را تا حدود دو برابر و همچنین حساسیت را تا حدود ۵۰ درصد افزایش دهیم.

واژگان کلیدی: پلاسمونیک، حسگر، بازتاب دهندهٔ براگ، روش تفاضل محدود در حوزهٔ زمان (FDTD)

#### مقدمه

یکی از مشکلاتی که محققان در پیادهسازی عملی ادوات پلاسمونی با آن روبرو هستند، هندسهٔ پیچیدهٔ ساختارهای ارائه شده میباشد. عموم ساختارهای با منحنی دایرهای از نظر ساخت با مشکلاتی روبرو هستند. استفاده از المانهای مستطیلی و مربعی از این جهت مرجح است و تنها مشکلی که این المانها به عنوان تشدیدگر دارند، حساسیت و فاکتور شایستگی پایین آنها است. برای رفع این مشکل، میتوان از انواع بازتاب دهندهها استفاده کرد. یکی از این بازتاب دهندهها که کاربرد زیادی در طراحی ادوات فوتونیکی دارد، بازتاب دهندههای مبتنی بر توری براگ<sup>۱</sup> هستند.

به علت عملکرد خوب این بازتابندهها در حوزهٔ فوتونیک، اخیراً در بعضی کاربردهای پلاسمونی مثل طراحی حسگرها هم به کار گرفته شدهاند. امواج پلاسمونی روی سطح فلزات جایگزیده هستند که باعث میشود به تغییرات ضریب شکست محیط اطراف سطح فلزات بسیار حساس باشند. از این خاصیت میتوان در جهت طراحی حسگرهای بسیار حساس استفاده نمود. در سال ۱۹۸۲ اولین نمونه از حسگرهای پلاسمونی که بر اساس هندسه کرشمن طراحی شده بود توسط نایلندر ۲ ارائه شد [۱]. تا دههٔ اخیر از حسگرهای پلاسمونی مبتنی بر هندسهٔ کرشمن در بسیاری از زمینههای مختلف

\*نویسندهٔ مسئول mvahedi@iust.ac.ir

<sup>v</sup> Bragg grating <sup>v</sup> C. Nylander مثل مهندسی پزشکی [۲]، صنایع غذایی [۳]، بیولوژی [۴] و... استفاده می شد. اما این حسگرها یک مشکل عمده دارند آن هم اندازهٔ بسیار بزرگ این نوع سنسورها بوده که برای مجتمع سازی قابلیت استفاده را نداشت. اما در سالهای بعد با گسترش علم نانو و میکرو، ساختارهای متنوعی مثل توریهای زیر طول موجی [۵]، موجبرهای پلاسمونی [۶]، نانو ذرات [۷] وارد علم نانوپلاسمونیک شدند و در مقایسه با هندسهٔ کرشمن، قابلیت بالایی در فشرده سازی جهت استفاده در مدارات مجتمع نوری بودند. به عنوان مثال، در سال ۲۰۱۶، شینیان کو و همکارانش حسگری را بر مبنای موجبر توری براگ ارائه دادند که ساختاری متشکل از یک موجبر فلز-دی الکتریک-فلز (*MIM*<sup>۳</sup>) است که درون آن با دی الکتریکهای مستطیلی شکل برش خورده و بین دورهٔ چهارم و پنجم توری براگ، یک فاصلهٔ بیشتر از نیم دوره براگ ایجاد شده است [۸]. برای ساختار پیشنهادی، بالاترین حساسیت به طور تقریبی برابر *I300 nm/RIU* و بالاترین فاکتورکیفیت برابر <sup>1</sup>-یارای ساختار پیشنهادی، بالاترین حساسیت به طور تقریبی برابر *I300 nm/RIU* و بالاترین فاکتورکیفیت برابر <sup>1</sup>-برای ساختار پیشنهادی، بالاترین حساسیت به طور تقریبی مرابر *I300 nm/RIU* و بالاترین فاکتورکیفیت برابر الار بالا به دست آمده است. حسگر دیگری در سال ۲۰۱۸ توسط منگ و همکارش ارائه شد [۹]. این حسگر ساختار توری مشابهی با ساختار حسگر قبلی دارد، با این تفاوت که تشدیدگری مستطیلی به آن تزویج شده است. برای این ساختار بالاترین

ساختاری که در این مقاله پیشنهاد میشود متشکل از یک بازتاب دهندهٔ پلاسمونی براگ است که به موجبر اصلی و FWHM تشدیدگری مستطیلی شکل تزویج شده است (شکل ۱). با استفاده از چنین ساختاری قادر خواهیم بود، پهنای FWHM طول موج تشدید کاواک مستطیلی را کاهش دهیم و در نتیجه می توان حساسیت و فاکتور شایستگی را افزایش داد. در این ساختار W معرف عرض موجبر، Ib و 2b دورهٔ براگ، Ig و 2g ارتفاع دندانههای براگ،  $I_1$  و 2L ابعاد تشدیدگر و t نیز کاف بین ساختار W معرف عرض موجبر، Ib و 2b دورهٔ براگ، Ig و 2g ارتفاع دندانههای براگ، ارا و  $L_2$  و این ساختار W معرف عرض موجبر، Ib و 2b دورهٔ براگ، Ig و 2g ارتفاع دندانههای براگ، ارا و  $L_2$  و این ساختار W معرف عرض موجبر، Ib و 2b دورهٔ براگ، Ig و 2g ارتفاع دندانههای براگ، با و و  $L_1$  به این تشدیدگر و t نیز و فاز مورد است استد دو بازتاب دهندهٔ براگ میباشد. داخل موجبر اصلی، بازتاب دهندهٔ براگ و تشدیدگر، از هوا پر شده است و فاز مورد استفاده در حسگر نیز نقره است. نحوهٔ عملکرد این ساختار به این گونه است که در یک بازهٔ طول موجی، به و فاز مورد استفاده در حسگر نیز نقره است. نحوهٔ عملکرد این ساختار به این گونه است که در یک بازهٔ طول موجی، به معلت وجود بازتاب دهندهٔ براگ میباشد. داخل موجبر اصلی، بازتاب دهندهٔ براگ و تشدیدگر، از هوا پر شده است مو موج و مورد استفاده در حسگر نیز نقره است. نحوهٔ عملکرد این ساختار به این گونه است که در یک بازهٔ طول موجی، به موجود بازتاب دهندهٔ براگ، عبور کامل خواهیم داشت و تشدیدگر مستطیلی نیز در طول موجهای مشخصی دارای مدهای تشدیدی خواهد بود. حال اگر با تغییر دوره براگ، باعث جابه جایی طول موج به سمت طول موج های تشدیدی مدهای تشدیدی خواهیم بود.

# بررسی نظری ساختار

همان طور که در کریستال های فوتونیکی، با استفاده از آرایه ای از دی الکتریک ها که دارای ضرایب شکست متفاوت نسبت به موجبر اصلی هستند، گاف باند فوتونیکی<sup>۴</sup> ایجاد می شود، در پلاسمونیک نیز با تغییر ابعاد موجبر، ضریب شکست مؤثر دچار تغییر می شود، بنابراین می توانیم گاف باند ایجاد کنیم. رابطهٔ (۱) پهنای باند فوتونیکی براگ را نشان می دهد [۱۰]:

$$\Delta \omega_g = \omega_B \frac{4}{\pi} \sin^{-1} \left( \frac{n_{eff,2} - n_{eff,1}}{n_{eff,2} + n_{eff,1}} \right)$$
(1)

<sup>r</sup> Metal-Insulator-Metal

<sup>†</sup> Photonic Bandgap

در این رابطه  $n_{eff_{91}}$  و دیالکتریک ۲ هستند  $n_{eff_{92}}$  و دیالکتریک ۲ هستند و این رابطه  $n_{eff_{91}}$  و دیالکتریک ۲ هستند و  $\omega_B$  و  $\omega_B$  فرکانس میانی طول موج براگ را نشان میدهد.



**شکل ۱.** نمایی از ساختار پیشنهادی حسگر مبتنی بر بازتاب دهندهٔ براگ (خاکستری: نقره، زرد: دیالکتریک با ارتفاع دندانهٔ g1 و آبی: دیالکتریک با ارتفاع دندانهٔ g2).

که در این رابطه،  $k_1$  و  $k_2$  به ترتیب اعداد موج در دیالکتریک ۱ و ۲ هستند. در نتیجه طول موج مرکزی براگ با استفاده از رابطهٔ (۲) به صورت رابطهٔ زیر محاسبه خواهد شد.

$$n_{eff,1}d_1 + n_{eff,2}d_2 = \frac{m\lambda_B}{2}$$
(\*)

برای محاسبهٔ  $n_{eff.1}$  و  $n_{eff.2}$  می توان از رابطه پاشندگی برای موجبرهای فلز-دی الکتریک-فلز استفاده کرد[۱۱].

(۴)

$$\frac{\omega}{2c}\sqrt{n_{eff}^2-\varepsilon_1}g = -\frac{\sqrt{n_{eff}^2-\varepsilon_2}\varepsilon_1}{\sqrt{n_{eff}^2-\varepsilon_1}\varepsilon_2}$$

 $\omega_p = 1.39 \times 10^{14} Hz$  و  $\varepsilon_{\infty} = 3.7$  )،  $\varepsilon_2 = \varepsilon_{\infty} - (\frac{\omega_p}{\omega_{freespace}})^2$  و  $g_1 = 1.39 \times 10^{14} Hz$  و  $g_2 = 100 nm$  و  $g_1 = 80 nm$  از رابطهٔ (۴) به ترتیب برابر با ۱٫۳۷ و ۱٫۳۷ بهدست neff.1 بهدست می آید؛ بنابراین طول موج مرکزی براگ برای  $h_B = 1464.5 nm$  برابر با  $h_1 = d_2 = 285 nm$  می آید؛ بنابراین طول موج مرکزی براگ برای ا

# نتايج شبيهسازى

برای انجام شبیه سازی، از نرم افزار RSoft استفاده شد. به این منظور، شبیه سازی دو بعدی FDTD با استفاده از شرایط  $\Delta x = \Delta z = 2 \ nm$  برای ایه جاذب ML استفاده شد. سلولهای مورد استفاده در شبیه سازی FDTD برابر با  $\Delta x = \Delta z = 2 \ nm$  انتخاب شد. همچنین گامهای زمانی برابر با  $\Delta t = 1 \ nm$  است، که در این رابطه c سرعت نور در خلاء، در نظر گرفته شده است.

شکل (۲) طیف حاصل از ساختار را بدون تشدیدگر مستطیلی نشان میدهد. همچنین به منظور مقایسه، طیف حاصل از ساختاری که ساختار براگ در موجبر اصلی تعبیه شده است و پارامترهای مشابهای با ساختار دارد، نیز نشان داده شده است.



شکل ۲. قرمز رنگ (پیوسته): طیف عبور ساختار با بازتاب دهنده براگ و بدون تشدیدگر مستطیلی، آبی رنگ (خط چین): طیف عبور بازتاب دهندهٔ مو الماطری اورامترهای مورد استفاده: g2=100nm ،g1=80nm ،w=50nm و g2=285nm g

مطابق با شکل (۲) همان طور که انتظار میرود، هنگامی که دندانهها در موجبر اصلی واقع شدهاند، عبور در یک بازهٔ طول موجی به کم ترین میزان خود رسیده است و هنگامی که بازتاب دهندهٔ براگ به حالت افقی به موجبر اصلی تزویج شده باشد به طور تقریبی در همان بازهٔ عبور خواهیم داشت.

### بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر طیف عبوری ساختار

 $g_2 = 100 \ nm$  ،  $g_1 = 80 \ nm$  ،  $w = 50 \ nm$  (۱) المترهای  $m_1 = 80 \ nm$  ،  $m_2 = 50 \ nm$  ،  $m_2 = 100 \ nm$  ،  $m_2 = 1000 \ nm$  ،  $m_2 = 100 \ nm$  ،  $m_2$ 

و  $t = 10 \, nm$  و  $L_2 = 500 \, nm$  ،  $L_1 = 200 \, nm$  ،  $d_1 = d_2 = 285 \, nm$  منظور  $L_2 = 500 \, nm$  ،  $L_1 = 200 \, nm$  ،  $d_1 = d_2 = 285 \, nm$  مقايسه، طيف ساختار بدون تشديدگر مستطيلى نيز در اين شكل رسم شده است.



شکل ۳. مشکی رنگ: منحنی عبور ساختار پیشنهادی، قرمز رنگ: منحنی عبور ساختار بدون تشدیدگر مستطیلی

همان طور که در شکل (۳) دیده می شود به ازای اضافه شدن تشدیدگر مستطیلی، دو مد تشدیدی در طول موج nm 82 و nm 43 nm و 1258 nm مقدار پهنای FWHM آنها به ترتیب 38 nm و 43 است. مقدار پهنای FWHM آنها به ترتیب 38 nm و ما 43 است. مقدار پهنای طیفی برای هر دو مد تشدیدی مقدار بزرگی است و فاکتور شایستگی را کاهش می دهد. بنابراین برای کاهش پهنای طیفی، بدون تغییر سایر پارامترها، دورهٔ براگ را کاهش می دهیم تا بازهٔ طول موجی براگ به سمت طول موجهای تشدیدی تشدیدی تشدیدی می موجهای تشکیری تفکی معنان می موجهای تشدیدی معرفی می موجهای تشدیدی موجهای تشدیدی موجهای تشدیدی معرفی می موجهای تشدیدی موجه می موجهای تشدیدی مقدار برای موجه می موجه می موجه می موجه مول موجی براگ به موجه می موجهای تشدیدی تشدیدی معرفی موجها موجه مول موجه موجه مو

در شکل (۴) نتایج این تحلیل به نمایش گذاشته شده است. در این شکل در نقاطی که با رنگ قرمز مشخص شده، طول موجهای تشدیدیِ تشدیدگر مستطیلی قرار دارند؛ که با جابهجا شدن بازهٔ طیفی براگ، مقدار کمی به سمت طول موجهای کم تر جابهجا می شوند، اما پهنای درهٔ طول موجهای تشدیدی، کاهش چشم گیری داشته است. کم ترین میزان پهنای FWHM در دورهٔ براگ nm 530 ایجاد شده، که برای مد اول ( mn 1200) nm 26 و برای مد دوم ( m 1327) m 31 به دست آمده است. اگر به طور مستقیم تشدیدگر مستطیلی را به موجبر اصلی تزویج کنیم، پهنای FWHM برای طول موجهای تشدید m کنیم، پهنای FWHM برای طول موجهای تشدید m برای کاربردهای حسگری مناسب نیست (برای اختصار نمودار آورده نشده است).



شکل ۴. منحنی عبور ساختار پیشنهادی به ازای تغییر دورهٔ براگ

در نتیجه با اضافه شدن بازتاب دهندهٔ براگ به موجبر اصلی شاهد کاهش در پهنای طیفی طول موجهای تشدیدی در کاواک مستطیلی هستیم. علت فیزیکی پدیدهٔ مشاهده شده، رقابت بین ساختار براگ و تشدیدگر مستطیلی تزویج شده است. ساختار براگ بازهٔ طول موجی مشخصی را بازتاب می کند. اما در حضور تشدیدگرِ تزویج شده، طول موجهای خاصی که قبلاً بازتاب می شدند، امکان عبور می یابند و دو دره در طیف ظاهر می شود. حالا با جابه جا کردن بازهٔ انعکاسی براگ نسبت به طول موجهای تشدیدی تشدیدگر تزویج شده، می توان کاری کرد که پهنای درهٔ تشدیدی مربوط به تشدیدگر کاهش یابد.

در ادامه به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر طیف عبوری ساختار خواهیم پرداخت. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای ساختار بر روی مشخصههای عبور ساختار پیشنهادی، ابتدا تأثیر میزان ارتفاع دندانهها را بررسی می کنیم. به این منظور، ارتفاع دندانهها را با گام 20 nm افزایش میدهیم و سایر پارامترها را به صورت w = 50 nm، این منظور، ارتفاع دندانهها را با گام 20 nm افزایش میدهیم و سایر پارامترها را به صورت w = 50 nmاین منظور، ارتفاع دندانهها را با گام 20 nm افزایش میدهیم و سایر پارامترها را به صورت w = 50 nmاین منظور، ارتفاع دندانهها را با گام 20 nm افزایش میدهیم و سایر پارامترها را به صورت w = 50 nmاین منظور، ارتفاع دندانهها را با گام 20 nm افزایش میدهیم و سایر پارامترها را به صورت w = 50 nmاین منظور، ارتفاع دندانهها را با گام 20 nm افزایش میدهیم و سایر پارامترها را به صورت تا مورت w = 50 nmاین منظور، ارتفاع دندانه از با گام 20 nm افزایش میدهیم و سایر پارامترها را به صورت تا می 20 nm



شکل۵. طیف عبور ساختار پیشنهادی به ازای ارتفاع دندانههای متفاوت

همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود با افزایش ارتفاع دندانه ها، مد اول به سمت طول موجهای کم تر جابه جا می شود، اما مد دوم متحمل جابه جایی کمی شده و عمق درهٔ آن از دست می رود. همچنین پهنای FWHM برای مد اول به طور تقریبی ثابت باقی می ماند. بنابراین با استفاده از ارتفاع دندانه ها می توانیم طول موج مد تشدیدی اول را در طول موجهای کم تر از طول موج حالت اولیه تنظیم کنیم.

پارامترهای بعدی که مورد بررسی قرار میدهیم افزایش  $g_1$  و  $g_2$  با گام nm 20 nm است، به طوری که  $g_1$  وارمترهای بعدی که مورد بررسی قرار میدهیم افزایش این پارامترها را نشان میدهد.



شکل ۶. طیف عبور ساختار به ازای تغییر مقدار g1 و g2

در شکل (۶) مشاهده می شود که با افزایش دو پارامتر  $g_1$  و  $g_2$  به صورت همزمان، پهنای بازه طول موجی براگ کاهش می یابد، که به خاطر کاهش اختلاف  $n_{eff}$  ها در دی الکتریکهای ۱ و ۲ است؛ همچنین طیف به طور کلی به سمت طول موجهای کم تر جابه جا می شود. برای مد اول در پهنای درهٔ اندکی افزایش مشاهده می شود ولی برای مد دوم شاهد کاهش موجهای کم تر جابه جا می شود. برای مد اول در پهنای درهٔ اندکی افزایش مشاهده می شود ولی برای مد دوم شاهد کاهش در این پهنا هستیم؛ اما در جابه جا می شود. برای مد اول در پهنای درهٔ اندکی افزایش مشاهده می شود ولی برای مد دوم شاهد کاهش موجهای کم تر جابه جا می شود. برای مد اول در پهنای درهٔ اندکی افزایش مشاهده می شود ولی برای مد دوم شاهد کاهش در این پهنا هستیم؛ اما در  $g_1 > 140 \text{ nm}$  و  $g_2 > 160 \text{ nm}$  موج تشدیدی مد دوم هستیم.

 $w = 50 \ nm$  پارامتر بعدی که به بررسی آن خواهیم پرداخت، جابه جایی تشدیدگر مستطیلی بین دی الکتریک های براگ است. پارامتر ها به صورت  $m = 50 \ nm$  ,  $g_1 = 50 \ nm$  ,  $d_1 = d_2 = 265 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $d_1 = d_2 = 265 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $d_1 = d_2 = 265 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $d_1 = d_2 = 265 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $d_1 = d_2 = 265 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_1 = 10 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 80 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 100 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_1 = 100 \ nm$  ,  $g_2 = 100 \ nm$  ,  $g_$ 



با توجه به شکل (۷) در نصف دوره و دورهٔ کامل سمت راست و چپ طیف مشابهای بهدست آمده است، البته اندکی تغییر در میزان عبور درهها دیده میشود، ولی میتوان گفت که در صورت جابهجایی به صورت یک دورهٔ کامل و همین طور نصف دوره، طیف مشابهای بهدست میآید.

پارامتر بعدی تعداد دورههای تکرار بازتاب دهندهٔ براگ Nاست، در تمامی ساختارهای قبلی 8 = N بوده است. حال، با افزایش تعداد دورههای تکرار به بررسی طیف حاصل از ساختار میپردازیم و سایر پارامترها را به صورت mm = 50 mm به 2 = 80 mm state دورههای تکرار به بررسی طیف حاصل از ساختار میپردازیم و سایر پارامترها را به صورت mm = 50 mm state دوره مای تکرار به بررسی طیف حاصل از ساختار میپردازیم و سایر پارامترها را به صورت mm = 50 mm state دوره مای تکرار به بررسی طیف حاصل از ساختار میپردازیم و سایر پارامترها را به صورت mm = 50 mm state دوره مای تعداد دوره مای  $L_2 = 500 mm$  state  $L_1 = 200 nm$  state  $L_1 = 265 nm$  state  $L_1 = 265 mm$  state  $L_1 = 265 mm$  state  $L_1 = 265 mm$  state  $L_1 = 200 nm$  state  $L_1 = 265 mm$  state  $L_1 = 200 nm$  state  $L_1 = 265 mm$  state  $N_1$  state  $N_2$  state  $N_1$  state  $N_2$  state  $N_1$  state  $N_2$  state



شکل ۸. طیف عبور ساختار به ازای تغییرات در تعداد تکرار ساختار براگ

### بررسى عملكرد حسكرى ساختار پيشنهادى

در این بخش قصد داریم با تغییر ضریب شکست محیط تشدیدگر مستطیلی و همچنین بازتاب دهندهٔ براگ جابهجایی طول موج های تشدیدی را مورد بررسی قرار دهیم و فاکتورهای مهم در کارایی حسگر پیشنهادی را به دست بیاوریم. حسگرهای پلاسمونی غالباً بر مبنای تغییرات ضریب شکست محیط نمونه عمل میکنند که منجر به جابهجایی طول موج تشدید میشود. این حسگرها دارای دو پارامتر بسیار مهم جهت بررسی عملکردشان هستند. پارامتر اول حساسیت حسگر (*S*) است که رابطهای به صورت زیر دارد:

$$S = \frac{\Delta \lambda_R}{\Delta n} \tag{(a)}$$

در این رابطه  $\lambda_R$  طول موج تشدید و n نشان دهندهٔ ضریب شکست محیط میباشد. واحد حساسیت ( nm/RIU) است و به معنی این است که به ازای یک واحد تغییرات ضریب شکست چه مقدار جابهجایی در طول موج تشدید خواهیم داشت. پارامتر بعدی فاکتور شایستگی حسگر ( $FOM^{\circ}$ ) است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$FOM = \frac{S}{\Delta \lambda_{FWHM}}$$
(5)

شایستگی حسگر میزان حساسیت حسگر را به نسبت پهنای طول موج تشدید نشان میدهد. هر چه پهنای طول موج تشدید کمتر باشد، قابلیت تشخیص تغییرات طول موج تشدید بیشتر خواهد شد [۱۲].

 $d_1 = d_2 = 265nm$ ,  $g_1 = 80nm$ , w = 50nm مندسه ازای پارامترهای به ازای پارامترهای  $M = d_2 = 265nm$ ,  $g_1 = 80nm$  محیط m محیط تشدیدگر مستطیلی را از t = 10nm,  $L_1 = 200nm$  و N = 8 و N = 8 و N = 8 و  $L_1 = 200nm$  بهدست محیط تشدیدگر مستطیلی را از از ۱٫۰۰ تا ۱٫۰۰ تغییر میدهیم و منحنی عبور را به ازای تغییرات در ضریب شکست بهدست میآوریم. نتایج مطابق با شکل (۹) بهدست آمد.



 $(n_{
m Rec})$  منحنی عبور ساختار به ازای تغییرات در ضریب شکست تشدیدگر مستطیلی ( $n_{
m Rec}$ )

با توجه به شکل (۹) با افزایش ضریب شکست، مکان هر دو مد تشدیدی جابهجا شده است. نمودار این تغییرات برای هر دو مد در شکل (۱۰) آورده شده است.

<sup>a</sup> Figure of Merit



شکل۱۰. نمودار جابهجایی طول موج مدهای تشدیدی به ازای تغییرات در ضریب شکست تشدیدگر مستطیلی

مطابق با نمودار (۱۰) حساسیت حسگر و فاکتور شایستگی حسگر به صورت زیر هستند:

 $S_{mode1} = 260nm / RIU$  $S_{mode2} = 920 nm / RIU$  $FOM_{mode1} = 9.2RIU^{-1}$  $FOM_{mode2} = 30.66RIU^{-1}$ 



شکل ۱۱. منحنی عبور ساختار به ازای تغییرات ضریب شکست هر دو محیط بازتاب دهندهٔ براگ و تشدیدگر مستطیلی



**شکل ۱۲.** نمودار جابهجایی طول موج مدهای تشدیدی به ازای تغییرات در ضریب شکست بازتاب دهندهٔ براگ و تشدیدگر مستطیلی

پهنای FWHM به طور میانگین برای مد اول nm 29 و برای مد دوم 33 nm بهدست آمده است. بنابراین حساسیت و فاکتور شایستگی مطابق زیر بهدست میآید:

 $S_{mode1} = 1320 nm / RIU$  $S_{mode2} = 1300 nm / RIU$  $FOM_{mode1} = 45.5RIU^{-1}$  $FOM_{mode2} = 39.4RIU^{-1}$ 

به منظور مقایسه، حساسیت ساختار را بدون در نظر گرفتن دندانههای بازتاب دهندهٔ براگ در حالتی که فقط ضریب شکست تشدیدگر مستطیلی تغییر کند و در حالتی که ضریب شکست هر دوی تشدیدگر مستطیلی و موجبر بدون دندانههای براگ دچار تغییر شوند را نیز بهدست آوردیم تا با ساختار پیشنهادی مقایسه شود. تمامی مقادیر پارامترها غیر از تغییراتی که در جدول آمدهاند ثابت فرض شده و ضریب شکست محیط مورد مطالعه در جدول از ۱٫۰۰ تا ۱٫۰۵ تغییر داده شده است. نتایج این تحلیل به صورت جدول زیر بهدست آمده است.

فاکتور شایستگی (RIU <sup>-1</sup> )	حساسيت (nm/RIU)	مد تشدیدی	نوع ساختار
16.41	558	مد اول	ساختار بدون بازتاب دهندهٔ براگ – تغییر
10.69	618	مد دوم	ضریب شکست در تشدیدگر مستطیلی
35.21	1230	مد اول	ساختار بدون دندانه براگ - تغییر ضریب
20.26	1260	مد دوم	شکست در هر دوی تشدید کر مستطیلی و موجبر بدون دندانه
9.2	260	مد اول	ساختار با بازتاب دهندهٔ براگ - تغییر ضریب
30.66	920	مد دوم	شکست در تشدیدگر مستطیلی
45.5	1320	مد اول	ساختار با بازتاب دهندهٔ براگ - تغییر ضریب
39.4	1300	مد دوم	تشکست در هر دوی باردب دهنده برات و تشدیدگر مستطیلی

جدول ١. مقایسهٔ ساختار با بازتاب دهندهٔ براگ و بدون بازتاب دهندهٔ براگ

مطابق با جدول (۱) میتوان نتیجه گیری کرد که با به کار گیری هندسه پیشنهادی قادر خواهیم بود حساسیت و فاکتور شایستگی مدهای تشدیدی را به طور قابل قبولی افزایش دهیم.

نکتهای که باید مدنظر قرار داد این است که با اعمال تغییر ضریب شکست به منطقهٔ بیشتری از حسگر، حساسیت و فاکتور شایستگی افزایش نشان میدهند که این لزوماً به معنی بهبود عملکرد حسگر نیست و این نکته در مقالات متعددی مورد دقت قرار نگرفته است. به این منظور و برای محاسبهٔ دقیق بهبود عملکرد حسگر، در جدول (۱)، حسگر طراحی شده با ساختار معادلی که بازتاب دهندهٔ براگ ندارد مقایسه شده است. در حالتی که ساختار با بازتاب دهندهٔ براگ است و تغییرات ضریب شکست به تشدیدگر مستطیلی اعمال میشود، نسبت به حالتی که ساختار با بازتاب دهندهٔ براگ است دهندهٔ براگ است و تغییرات ضریب شکست برای تشدیدگر مستطیلی اعمال میشود، مد اول حساسیت و فاکتور شایستگی کمتری را نشان میدهد (مقایسهٔ موردهای ۵ و ۱)، اما برای مد دوم، هر دوی این پارامترها افزایش یافتهاند (مقایسهٔ موردهای ۶ و ۲). اما میتوان گفت ساختار هندسه پیشنهادی از حساسیت و فاکتور شایستگی قابل قبولی برای هر دو مد تشدیدی در حالتی که هر دوی تشدیدگر مستطیلی و بارتاب دهندهٔ براگ دچار تغییرات ضریب شکست میشوند از خود نشان میدهد (موردهای ۷ و ۸) ؛که نسبت به حالت دهندهٔ براگ دچار تغییرات ضریب شکست

# نتيجهگيرى

در این مقاله، ساختار جدیدی مبتنی بر بازتاب دهندهٔ براگ برای استفاده به عنوان حسگر پلاسمونی که دارای ابعاد بسیار کوچک و عملکرد مناسبی است، پیشنهاد شد. نتایج شبیهسازیها نشان میدهند که حسگر پیشنهاد شده باعث افزایش حساسیت و فاکتور شایستگی ساختار پلاسمونی میشود و بیشترین حساسیت و فاکتور شایستگی به دست آمده به ترتیب ۱۳۲۰ nm/RIU و <sup>1-</sup>۱۳۲۰ میباشند که در یک ساختار بازتاب دهندهٔ براگ در کنار یک تشدیدگر مستطیلی قرار داده شد. همان طور که در جدول (۲) جمع بندی شده است، در بعضی موارد تا حدود سه برابر با استفاده از بازتاب دهندهٔ براگ میتوانیم فاکتور شایستگی را افزایش دهیم (مد دوم برای حالت تغییر ضریب شکست در تشدیدگر مستطیلی). همچنین حساسیت را میتوان تا حدود ۵۰ درصد با استفاده از این بازتاب دهنده افزایش داد. دلیل فیزیکی این اتفاق این هست که هم عملکرد ساختار براگ و هم عملکرد تشدیدگر مستطیلی در اثر تغییر ضریب شکست به صورت مستقل تحت تأثیر قرار میگیرد. بنابراین نتیجهٔ تغییرات ضریب شکست با شدت بیشتری در خروجی قابل مشاهده است.

درصد تغییر فاکتور شایستگی نسبت به ساختار مشابه (٪)	درصد تغییر حساسیت نسبت به ساختار مشابه (/.)	مد تشدیدی	نوع ساختار
-43.9	-53.4	مد اول	ساختار با بازتاب دهندهٔ براگ - تغییر
186.8	48.9	مد دوم	ضریب شکست در تشدیدگر مستطیلی
29.2	7.32	مد اول	ساختار با بازتاب دهندهٔ براگ - تغییر
94.5	3.18	مد دوم	صریب سکست در هر دوی باریاب دهنده براگ و تشدیدگر مستطیلی

جدول ۲. تغییرات حساسیت و فاکتور شایستگی ساختارهای مختلف در حضور بازتاب دهندهٔ براگ نسبت به ساختار مشابه بدون بازتاب دهندهٔ براگ

### منابع

1. C. Nylander, B. Liedberg and T. Lind, J.S.A, "Gas detection by means of surface plasmon resonance," vol. 3, pp. 79-88, 1982.

2. M. Piliarik, H. Vaisocherová, and J. Homola, "Surface plasmon resonance biosensing,"in Biosensors and Biodetection: Springer, 2009, pp. 65-88.

3. D. R. Shankaran, K. V. Gobi and N. Miura, J.S.A.B.C, "Recent advancements in surface plasmon resonance immunosensors for detection of small molecules of biomedical, food and environmental interest," vol. 121, no. 1, pp. 158-177, 2007.

4. J. Homola, J.C.r, "Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species," vol. 108, no. 2, pp. 462-493, 2008.

5. W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, J. n, "Surface plasmon subwavelength optics," vol. 424, no. 6950, p. 824, 2003.

6. L. Liu, Z. Han, and S. He, J.O.E, "Novel surface plasmon waveguide for high integration," vol.13, no. 17, pp. 6645-6650, 2005.

7. J. N. Anker, W. P. Hall, O. Lyandres, N. C. Shah, J. Zhao, and R. P. Van Duyne, "Biosensing with plasmonic nanosensors," in Nanoscience and Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals: World Scientific, 2010, pp. 308-319.

8. S. Qu et al, "Detuned plasmonic Bragg grating sensor based on a defect metal-insulator-metal waveguide," vol. 16, no. 6, p. 784, 2016.

9. Z.-M. Meng and F. J. P. Qin, "Realizing prominent Fano resonances in metal-insulator-metal plasmonic Bragg gratings side-coupled with plasmonic nanocavities," vol. 13, no. 6, pp. 2329-2336, 2018.

10. B. Osting, J. A. M. L, "Bragg structure and the first spectral gap," vol. 25, no. 11, pp. 1926-1930, 2012.

11. J. Dionne, L. Sweatlock, H. Atwater, and A. J. P. R. B. Polman, "Plasmon slot waveguides: Towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization," vol. 73, no. 3, p. 035407, 2006.

12. M. R. Rakhshani and M. A. J. I. S. J. Mansouri-Birjandi, "High-sensitivity plasmonic sensor based on metal-insulator-metal waveguide and hexagonal-ring cavity," vol. 16, no. 9, pp. 3041-3046, 2016.