

# طراحی و شبیه‌سازی حسگر ضریب شکست مبتنی بر بازتاب دهنده پلاسمونی براگ

محمد واحدی\*، مجتبی مرادخانی؛  
دانشگاه علم و صنعت، دانشکده فیزیک

دریافت: ۹۸/۱۱/۱۲ پذیرش: ۹۹/۱۱/۱۵

## چکیده

در این مقاله، یک حسگر پلاسمونی ضریب شکستی مبتنی بر ساختار موجبر فلز-دی الکتریک-فلز و با به کارگیری یک بازتاب دهنده براگ پیشنهاد شده و از شبیه‌سازی دوبعدی با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان FDTD استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از یک بازتاب دهنده براگ در کنار یک تشدیدگر مستطیلی، می‌توان به حساسیت و فاکتور شایستگی  $1320 \text{ nm/RIU}$  و  $45/5 \text{ RIU}^{-1}$  در حسگر طراحی شده دست یافت. نشان داده شده است که با استفاده از بازتاب دهنده براگ می‌توانیم فاکتور شایستگی را تا حدود دو برابر و همچنین حساسیت را تا حدود ۵۰ درصد افزایش دهیم.

**واژگان کلیدی:** پلاسمونیک، حسگر، بازتاب دهنده براگ، روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD)

## مقدمه

یکی از مشکلاتی که محققان در پیاده‌سازی عملی ادوات پلاسمونی با آن روبرو هستند، هندسه پیچیده 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 فوتونیک دارد، بازتاب دهنده‌های مبتنی بر توری براگ<sup>۱</sup> هستند. به علت عملکرد خوب این بازتابنده‌ها در حوزه 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<sup>۲</sup> ارائه شد [۱]. تا دهه اخیر از حسگرهای پلاسمونی مبتنی بر هندسه کرشمن در بسیاری از زمینه‌های مختلف

\*نویسنده مسئول mvahedi@iust.ac.ir

<sup>۱</sup> Bragg grating

<sup>۲</sup> C. Nylander

مثل مهندسی پزشکی [۲]، صنایع غذایی [۳]، بیولوژی [۴] و... استفاده می‌شد. اما این حسگرها یک مشکل عمده دارند آن هم اندازه 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 هندسه 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 دوره چهارم و پنجم توری براگ، یک فاصله بیشتر از نیم دوره براگ ایجاد شده است [۸]. برای ساختار پیشنهادی، بالاترین حساسیت به طور تقریبی برابر  $1300 \text{ nm}/RIU$  و بالاترین فاکتور کیفیت برابر  $20 RIU^{-1}$  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 حساسیت  $1425 \text{ nm}/RIU$  و بالاترین فاکتور کیفیت  $Q$ ، ۶۹ حاصل شد.

ساختاری که در این مقاله پیشنهاد می‌شود متشکل از یک بازتاب دهنده پلاسمونی براگ است که به موجبر اصلی و 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 می‌توان حساسیت و فاکتور شایستگی را افزایش داد. در این ساختار  $w$  معرف عرض موجبر،  $d_1$  و  $d_2$  دوره براگ،  $g_1$  و  $g_2$  ارتفاع دندان‌های براگ،  $L_1$  و  $L_2$  ابعاد تشدیدگر و  $t$  نیز گاف بین تشدیدگر و بازتاب دهنده براگ می‌باشد. داخل موجبر اصلی، بازتاب دهنده براگ و تشدیدگر، از هوا پر شده است و فلز مورد استفاده در حسگر نیز نقره است. نحوه عملکرد این ساختار به این گونه است که در یک بازه طول موجی، به علت وجود بازتاب دهنده براگ، عبور کامل خواهیم داشت و تشدیدگر مستطیلی نیز در طول موج‌های مشخصی دارای مدهای تشدید خواهد بود. حال اگر با تغییر دوره براگ، باعث جابه جایی طول موج به سمت طول موج‌های تشدید کاواک شویم، شاهد کاهش در پهنای  $FWHM$  طول موج‌های تشدید خواهیم بود.

### بررسی نظری ساختار

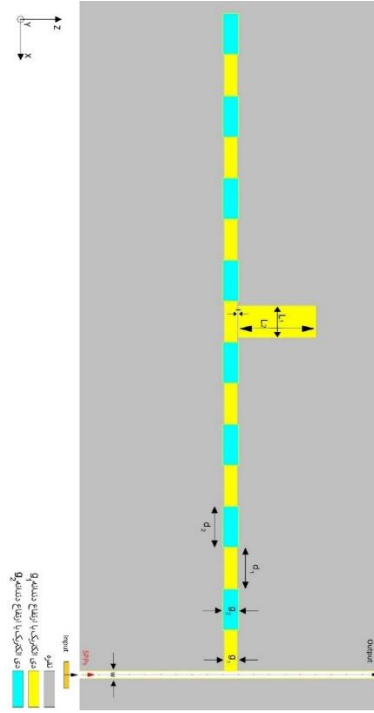
همان‌طور که در کریستال‌های فوتونیک، با استفاده از آرایه‌ای از دی الکتریک‌ها که دارای ضرایب شکست متفاوت نسبت به موجبر اصلی هستند، گاف باند فوتونیک<sup>۴</sup> ایجاد می‌شود، در پلاسمونیک نیز با تغییر ابعاد موجبر، ضریب شکست مؤثر دچار تغییر می‌شود، بنابراین می‌توانیم گاف باند ایجاد کنیم. رابطه (۱) پهنای باند فوتونیک براگ را نشان می‌دهد [۱۰]:

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

<sup>۳</sup> Metal-Insulator-Metal

<sup>۴</sup> Photonic Bandgap

در این رابطه  $n_{eff,1}$  و  $n_{eff,2}$  به ترتیب نشان دهنده ضرایب شکست مؤثر در دی‌الکتریک ۱ و دی‌الکتریک ۲ هستند و  $\omega_B$  فرکانس میانی طول موج براگ را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمایی از ساختار پیشنهادی حسگر مبتنی بر بازتاب دهنده براگ (خاکستری: نقره، زرد: دی‌الکتریک با ارتفاع دندانه  $g_1$  و آبی: دی‌الکتریک با ارتفاع دندانه  $g_2$ ).

طبق این رابطه هر چه اختلاف ضرایب شکست بیشتر باشد، پهنای گاف باند طول موج براگ بیشتر می‌شود. همچنین می‌توان طول موج مرکزی براگ را از شرط تداخل سازنده براگ که به صورت زیر تعریف می‌شود به دست آورد:

$$k_1 d_1 + k_2 d_2 = m\pi \quad m=1,2,3,\dots \quad (2)$$

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 رابطه (۲) به صورت رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$n_{eff,1} d_1 + n_{eff,2} d_2 = \frac{m \lambda_B}{2} \quad (3)$$

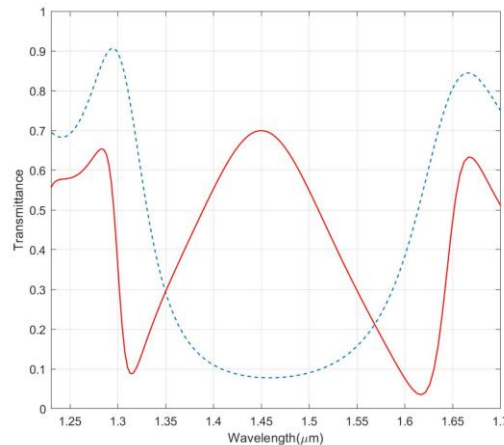
برای محاسبه  $n_{eff,1}$  و  $n_{eff,2}$  می‌توان از رابطه پاشندگی برای موج‌های فلز-دی‌الکتریک-فلز استفاده کرد [۱۱]:

$$(4) \quad \frac{\omega}{2c} \sqrt{n_{eff}^2 - \epsilon_1} g = - \frac{\sqrt{n_{eff}^2 - \epsilon_2} \epsilon_1}{\sqrt{n_{eff}^2 - \epsilon_1} \epsilon_2}$$

که اگر  $g_2=100nm$  و  $g_1=80nm$  باشد و  $\epsilon_1 = 1$  و  $\epsilon_2 = \epsilon_\infty - \left(\frac{\omega_p}{\omega_{free\ space}}\right)^2$  ،  $\epsilon_\infty = 3.7$  و  $\omega_p = 1.39 \times 10^{14} Hz$  تابع دی الکتریک نقره در طول موج  $1550 nm$  باشند،  $n_{eff,1}$  و  $n_{eff,2}$  از رابطه (۴) به ترتیب برابر با  $۱,۳۷$  و  $۱,۲۰$  به دست می آید؛ بنابراین طول موج مرکزی براگ برای  $d_1=d_2=285nm$  برابر با  $\lambda_B = 1464.5 nm$  خواهد بود.

### نتایج شبیه سازی

برای انجام شبیه سازی، از نرم افزار RSoft استفاده شد. به این منظور، شبیه سازی دو بعدی FDTD با استفاده از شرایط مرزی لایه جاذب PML استفاده شد. سلولهای مورد استفاده در شبیه سازی FDTD برابر با  $\Delta x = \Delta z = 2 nm$  انتخاب شد. همچنین گامهای زمانی برابر با  $c\Delta t = 1 nm$  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 می دهد. همچنین به منظور مقایسه، طیف حاصل از ساختاری که ساختار براگ در موجبر اصلی تعبیه شده است و پارامترهای مشابهی با ساختار دارد، نیز نشان داده شده است.



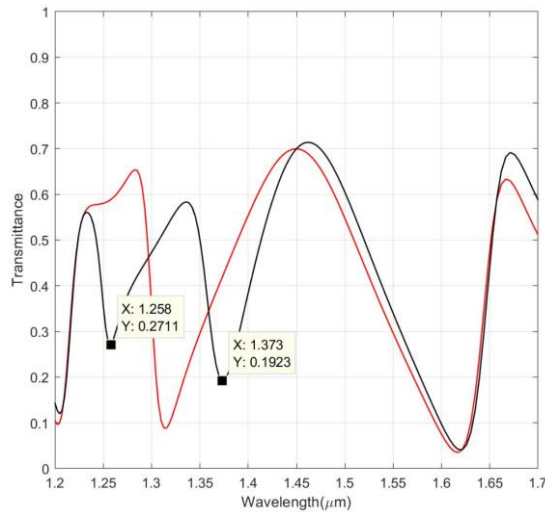
شکل ۲. قرمز رنگ (پیوسته): طیف عبور ساختار با بازتاب دهنده براگ و بدون تشدیدگر مستطیلی، آبی رنگ (خط چین): طیف عبور بازتاب دهنده براگ تعبیه شده در موجبر اصلی. پارامترهای مورد استفاده:  $w=50nm$  ،  $g_1=80nm$  ،  $g_2=100nm$  و  $d_1=d_2=285nm$

مطابق با شکل (۲) همان طور که انتظار می رود، هنگامی که دندانها در موجبر اصلی واقع شده اند، عبور در یک بازه طول موجی به کمترین میزان خود رسیده است و هنگامی که بازتاب دهنده براگ به حالت افقی به موجبر اصلی تزویج شده باشد به طور تقریبی در همان بازه عبور خواهیم داشت.

### بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر طیف عبوری ساختار

در شکل (۳) طیف عبور ساختار شکل (۱) به ازای پارامترهای  $w = 50 nm$  ،  $g_1 = 80 nm$  ،  $g_2 = 100 nm$  ،

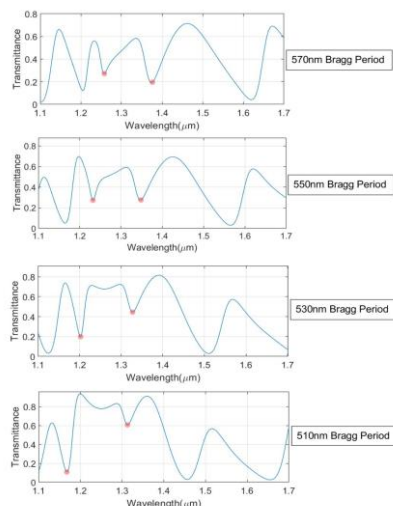
مقایسه، طیف ساختار بدون تشدیدگر مستطیلی نیز در این شکل رسم شده است.  $t = 10 \text{ nm}$  و  $L_2 = 500 \text{ nm}$ ،  $L_1 = 200 \text{ nm}$ ،  $d_1 = d_2 = 285 \text{ nm}$  رسم شده است؛ همچنین به منظور



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

همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود به ازای اضافه شدن تشدیدگر مستطیلی، دو مد تشدید در طول موج  $1258 \text{ nm}$  و  $1373 \text{ nm}$  در طیف عبور ایجاد می‌شود که پهنای  $FWHM$  آنها به ترتیب  $38 \text{ nm}$  و  $43 \text{ nm}$  است. مقدار پهنای  $FWHM$  برای هر دو مد تشدید مقدار بزرگی است و فاکتور شایستگی را کاهش می‌دهد. بنابراین برای کاهش پهنای طیفی، بدون تغییر سایر پارامترها، دوره براگ را کاهش می‌دهیم تا بازه طول موجی براگ به سمت طول موج‌های تشدید تشدیدگر مستطیلی جابه‌جا شود.

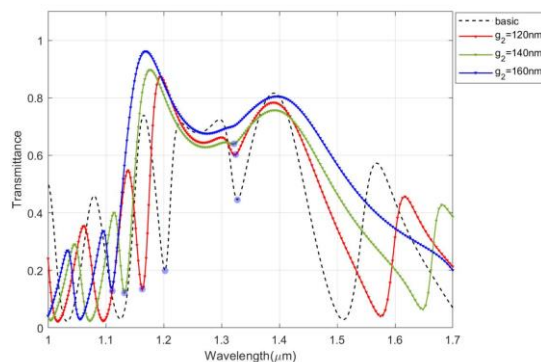
در شکل (۴) نتایج این تحلیل به نمایش گذاشته شده است. در این شکل در نقاطی که با رنگ قرمز مشخص شده، طول موج‌های تشدید تشدیدگر مستطیلی قرار دارند؛ که با جابه‌جا شدن بازه طیفی براگ، مقدار کمی به سمت طول موج‌های کم‌تر جابه‌جا می‌شوند، اما پهنای دره طول موج‌های تشدید، کاهش چشم‌گیری داشته است. کم‌ترین میزان پهنای  $FWHM$  در دوره براگ  $530 \text{ nm}$  ایجاد شده، که برای مد اول ( $1200 \text{ nm}$ )  $26 \text{ nm}$  و برای مد دوم ( $1327 \text{ nm}$ )  $31 \text{ nm}$  به دست آمده است. اگر به طور مستقیم تشدیدگر مستطیلی را به موجبر اصلی تزویج کنیم، پهنای  $FWHM$  برای طول موج‌های تشدید  $120 \text{ nm}$  به دست می‌آید که پهنای بسیار بزرگی به حساب می‌آید و برای کاربردهای حسگری مناسب نیست (برای اختصار نمودار آورده نشده است).



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

در نتیجه با اضافه شدن بازتاب دهنده براگ به موجبر اصلی شاهد کاهش در پهنای طیفی طول موج‌های تشدیدی در کاواک مستطیلی هستیم. علت فیزیکی پدیده مشاهده شده، رقابت بین ساختار براگ و تشدیدگر مستطیلی تزویج شده است. ساختار براگ بازه طول موجی مشخصی را بازتاب می‌کند. اما در حضور تشدیدگر تزویج شده، طول موج‌های خاصی که قبلاً بازتاب می‌شدند، امکان عبور می‌یابند و دو دره در طیف ظاهر می‌شود. حالا با جابه‌جا کردن بازه انعکاسی براگ نسبت به طول موج‌های تشدیدی تشدیدگر تزویج شده، می‌توان کاری کرد که پهنای دره تشدیدی مربوط به تشدیدگر کاهش یابد.

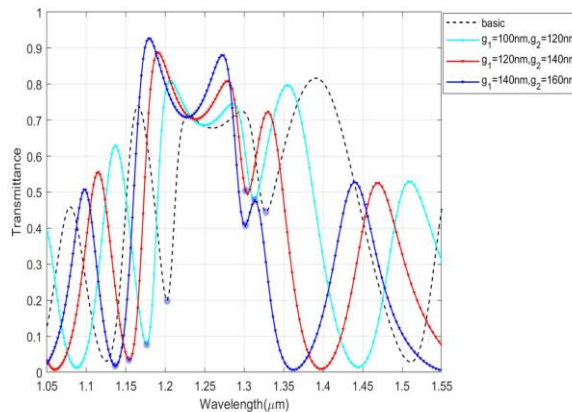
در ادامه به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر طیف عبوری ساختار خواهیم پرداخت. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای ساختار بر روی مشخصه‌های عبور ساختار پیشنهادی، ابتدا تأثیر میزان ارتفاع دندانه‌ها را بررسی می‌کنیم. به این منظور، ارتفاع دندانه‌ها را با گام  $20\text{ nm}$  افزایش می‌دهیم و سایر پارامترها را به صورت  $w = 50\text{ nm}$ ،  $d_1 = d_2 = 265\text{ nm}$ ،  $L_1 = 200\text{ nm}$ ،  $L_2 = 500\text{ nm}$  و  $t = 10\text{ nm}$  ثابت در نظر می‌گیریم. نتایج مطابق شکل (۵) به دست آمده است.



شکل ۵. طیف عبور ساختار پیشنهادی به ازای ارتفاع دندانه‌های متفاوت

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع دندانه‌ها، مد اول به سمت طول موج‌های کم‌تر جابه‌جا می‌شود، اما مد دوم متحمل جابه‌جایی کمی شده و عمق دره آن از دست می‌رود. همچنین پهنای  $FWHM$  برای مد اول به طور تقریبی ثابت باقی می‌ماند. بنابراین با استفاده از ارتفاع دندانه‌ها می‌توانیم طول موج مد تشدید اول را در طول موج‌های کم‌تر از طول موج حالت اولیه تنظیم کنیم.

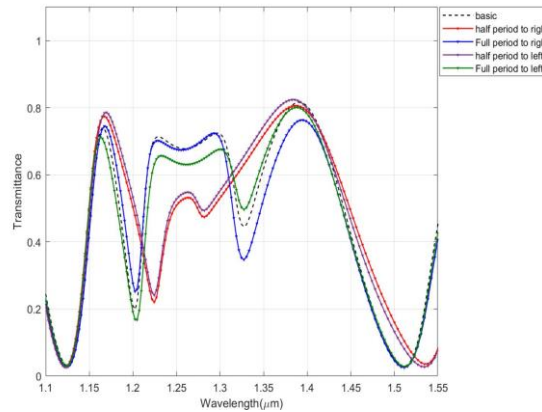
پارامترهای بعدی که مورد بررسی قرار می‌دهیم افزایش  $g_1$  و  $g_2$  با گام  $20\text{ nm}$  است، به طوری که  $g_2 - g_1 = 20\text{ nm}$  باشد. شکل (۶) منحنی عبور ساختار به ازای افزایش این پارامترها را نشان می‌دهد.



شکل ۶. طیف عبور ساختار به ازای تغییر مقدار  $g_1$  و  $g_2$

در شکل (۶) مشاهده می‌شود که با افزایش دو پارامتر  $g_1$  و  $g_2$  به صورت همزمان، پهنای بازه طول موجی براگ کاهش می‌یابد، که به خاطر کاهش اختلاف  $n_{eff}$ ‌ها در دی‌الکتریک‌های ۱ و ۲ است؛ همچنین طیف به طور کلی به سمت طول موج‌های کم‌تر جابه‌جا می‌شود. برای مد اول در پهنای دره اندکی افزایش مشاهده می‌شود ولی برای مد دوم شاهد کاهش در این پهنای هستیم؛ اما در  $g_1 > 140\text{ nm}$  و  $g_2 > 160\text{ nm}$  به خاطر کاهش اثر بازه براگ، شاهد محو شدن طول موج تشدید مد دوم هستیم.

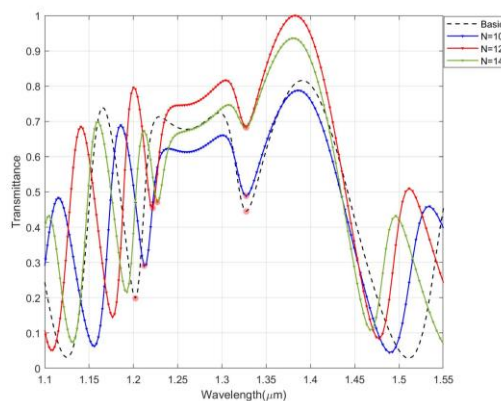
پارامتر بعدی که به بررسی آن خواهیم پرداخت، جبهه‌جایی تشدیدگر مستطیلی بین دی‌الکتریک‌های براگ است. پارامترها به صورت  $w = 50\text{ nm}$ ،  $L_1 = 200\text{ nm}$ ،  $L_2 = 500\text{ nm}$  و  $t = 10\text{ nm}$  در نظر گرفته شده‌اند و تشدیدگر مستطیلی در هر آنالیز در وسط دی‌الکتریک‌ها در نصف دوره و یک دوره کامل به سمت چپ و راست جبهه‌جایی می‌شود و طیف آن بررسی شده است. شکل (۷) منحنی عبور ساختار به ازای تغییرات اعمالی در این حالت را نشان می‌دهد.



شکل ۷. منحنی عبور ساختار به ازای جابه‌جایی تشدیدگر مستطیلی

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

پارامتر بعدی تعداد دوره‌های تکرار بازتاب دهنده براگ  $N$  است، در تمامی ساختارهای قبلی  $N = 8$  بوده است. حال، با افزایش تعداد دوره‌های تکرار به بررسی طیف حاصل از ساختار می‌پردازیم و سایر پارامترها را به صورت  $g_1 = 80 \text{ nm}$ ،  $w = 50 \text{ nm}$ ،  $t = 10 \text{ nm}$  و  $L_2 = 500 \text{ nm}$ ،  $L_1 = 200 \text{ nm}$ ،  $d_1 = d_2 = 265 \text{ nm}$  هندسه اولیه، مکان تشدیدگر را همواره در وسط دوره میانی بازتاب دهنده براگ در هر آنالیز قرار دادیم. شکل (۸) منحنی عبور ساختار را به ازای تغییرات تعداد تکرار دوره براگ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش  $N$ ، بازه طول موجی براگ تقریباً ثابت باقی می‌ماند، اما طول موج مد اول کمی به سمت طول موج‌های بیش‌تر جابه‌جا می‌شود و میزان عمق دره نیز کاهش می‌یابد، که به خاطر افزایش اتلاف ناشی از افزایش طول مؤثر ناحیه فلزی اتفاق می‌افتد. در مورد مد دوم، طول موج تشدید بدون تغییر باقی می‌ماند، ولی میزان عمق دره کاهش می‌یابد. همچنین میزان پهنای  $FWHM$  هر دو مد تشدید با افزایش تعداد تکرار بازتاب دهنده براگ کاهش می‌یابد.



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



## بررسی عملکرد حسگری ساختار پیشنهادی

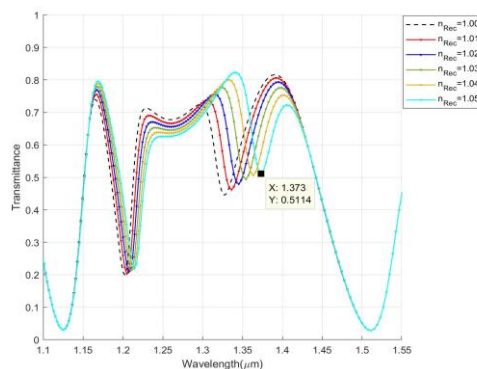
در این بخش قصد داریم با تغییر ضریب شکست محیط تشدیدگر مستطیلی و همچنین بازتاب دهنده براگ جابه‌جایی طول موج های تشدید را مورد بررسی قرار دهیم و فاکتورهای مهم در کارایی حسگر پیشنهادی را به دست بیاوریم. حسگرهای پلاسمونی غالباً بر مبنای تغییرات ضریب شکست محیط نمونه عمل می‌کنند که منجر به جابه‌جایی طول موج 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:

$$S = \frac{\Delta\lambda_R}{\Delta n} \quad (5)$$

در این رابطه  $\lambda_R$  طول موج تشدید و  $n$  نشان دهنده 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 ( $FOM^\Delta$ ) است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$FOM = \frac{S}{\Delta\lambda_{FWHM}} \quad (6)$$

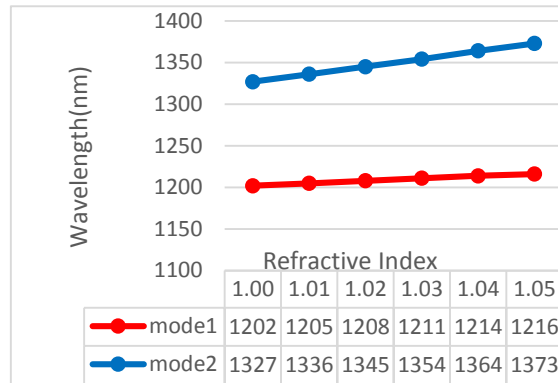
شایستگی حسگر میزان حساسیت حسگر را به نسبت پهنای طول موج تشدید نشان می‌دهد. هر چه پهنای طول موج تشدید کم‌تر باشد، قابلیت تشخیص تغییرات طول موج تشدید بیشتر خواهد شد [۱۲]. هندسه بهینه در بررسی‌های قبلی به ازای پارامترهای  $w = 50nm$ ،  $g_1 = 80nm$ ،  $d_1 = d_2 = 265nm$ ،  $L_1 = 200nm$  و  $t = 10nm$  و  $N = 8$  به دست آمده است. ابتدا ضریب شکست محیط تشدیدگر مستطیلی را از ۱،۰۰ تا ۱،۰۵ تغییر می‌دهیم و منحنی عبور را به ازای تغییرات در ضریب شکست به دست می‌آوریم. نتایج مطابق با شکل (۹) به دست آمد.



شکل ۹. منحنی عبور ساختار به ازای تغییرات در ضریب شکست تشدیدگر مستطیلی ( $n_{Rec}$ )

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

<sup>Δ</sup> Figure of Merit



شکل ۱۰. 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:

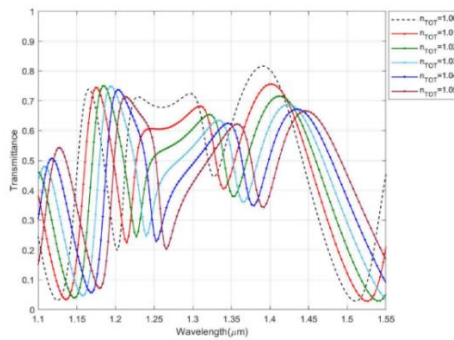
$$S_{mode1} = 260nm / RIU$$

$$S_{mode2} = 920 nm / RIU$$

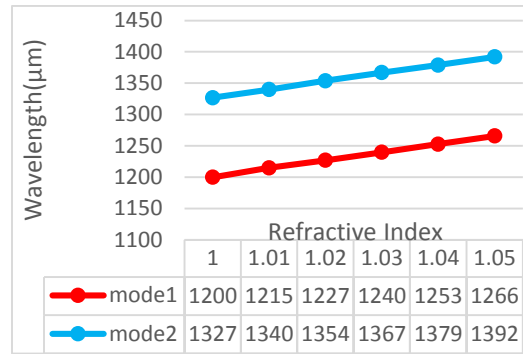
$$FOM_{mode1} = 9.2RIU^{-1}$$

$$FOM_{mode2} = 30.66RIU^{-1}$$

مطابق با نتایج بالا، حساسیت و فاکتور شایستگی برای مد اول بسیار پایین است ولی برای مد دوم نتایج قابل قبولی حاصل شده است. حال با تغییر ضریب شکست در هر دوی بازتاب دهنده براگ و تشدیدگر مستطیلی به منحنی عبور ساختار می‌پردازیم و جابه‌جایی طول موج را به ازای تغییرات ضریب شکست هر دو محیط بازتاب دهنده براگ و تشدیدگر مستطیلی به دست می‌آوریم. منحنی عبور ساختار در شکل (۱۱) رسم شده است.



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



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

پهنای  $FWHM$  به طور میانگین برای مد اول  $29\text{ nm}$  و برای مد دوم  $33\text{ nm}$  به دست آمده است. بنابراین حساسیت و فاکتور شایستگی مطابق زیر به دست می‌آید:

$$S_{mode1} = 1320\text{ nm} / RIU$$

$$S_{mode2} = 1300\text{ nm} / RIU$$

$$FOM_{mode1} = 45.5RIU^{-1}$$

$$FOM_{mode2} = 39.4RIU^{-1}$$

به منظور مقایسه، حساسیت ساختار را بدون در نظر گرفتن دندان‌های بازتاب دهنده براگ در حالتی که فقط ضریب شکست تشدیدگر مستطیلی تغییر کند و در حالتی که ضریب شکست هر دوی تشدیدگر مستطیلی و موجبر بدون دندان‌های براگ دچار تغییر شوند را نیز به دست 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  $1.05$  تا  $1.00$  تغییر داده شده است. نتایج این تحلیل به صورت جدول زیر به دست آمده است.

جدول ۱. مقایسه ساختار با بازتاب دهنده براگ و بدون بازتاب دهنده براگ

فاکتور شایستگی ( $RIU^{-1}$ )	حساسیت (nm/RIU)	مد تشدیدی	نوع ساختار
16.41	558	مد اول	ساختار بدون بازتاب دهنده براگ - تغییر ضریب شکست در تشدیدگر مستطیلی
10.69	618	مد دوم	
35.21	1230	مد اول	ساختار بدون دندان براگ - تغییر ضریب شکست در هر دوی تشدیدگر مستطیلی و موجبر بدون دندان
20.26	1260	مد دوم	
9.2	260	مد اول	ساختار با بازتاب دهنده براگ - تغییر ضریب شکست در تشدیدگر مستطیلی
30.66	920	مد دوم	
45.5	1320	مد اول	ساختار با بازتاب دهنده براگ - تغییر ضریب شکست در هر دوی بازتاب دهنده براگ و تشدیدگر مستطیلی
39.4	1300	مد دوم	

مطابق با جدول (۱) می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با به‌کارگیری هندسه پیشنهادی قادر خواهیم بود حساسیت و فاکتور شایستگی مدهای تشدید را به طور قابل قبولی افزایش دهیم.

نکته‌ای که باید مدنظر قرار داد این است که با اعمال تغییر ضریب شکست به منطقه 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 محاسبه دقیق بهبود عملکرد حسگر، در جدول (۱)، حسگر طراحی شده با ساختار معادلی که بازتاب دهنده براگ ندارد مقایسه شده است. در حالتی که ساختار با بازتاب دهنده براگ است و تغییرات ضریب شکست به تشدیدگر مستطیلی اعمال می‌شود، نسبت به حالتی که ساختار بدون دندان‌های بازتاب دهنده براگ است و تغییرات ضریب شکست برای تشدیدگر مستطیلی اعمال می‌شود، مد اول حساسیت و فاکتور شایستگی کمتری را نشان می‌دهد (مقایسه مورد های ۵ و ۱)، اما برای مد دوم، هر دوی این پارامترها افزایش یافته‌اند (مقایسه مورد های ۶ و ۲). اما می‌توان گفت ساختار هندسه پیشنهادی از حساسیت و فاکتور شایستگی قابل قبولی برای هر دو مد تشدید در حالتی که هر دوی تشدیدگر مستطیلی و بازتاب دهنده براگ دچار تغییرات ضریب شکست می‌شوند از خود نشان می‌دهد (مورد های ۷ و ۸)؛ که نسبت به حالت بدون بازتاب دهنده براگ (مورد های ۳ و ۴) نیز این موضوع دیده می‌شود. جمع بندی تغییرات در جدول (۲) آورده شده است.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله، ساختار جدیدی مبتنی بر بازتاب دهنده 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  $1320 \text{ nm/RIU}$  و  $45.5 \text{ RIU}^{-1}$  می‌باشند که در یک ساختار بازتاب دهنده براگ در کنار یک تشدیدگر مستطیلی قرار داده شد. همان‌طور که در جدول (۲) جمع‌بندی شده است، در بعضی موارد تا حدود سه برابر با استفاده از بازتاب دهنده 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 نتیجه تغییرات ضریب شکست با شدت بیشتری در خروجی قابل مشاهده است.

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

درصد تغییر فاکتور شایستگی نسبت به ساختار مشابه (%)	درصد تغییر حساسیت نسبت به ساختار مشابه (%)	مد تشدید	نوع ساختار
-43.9	-53.4	مد اول	ساختار با بازتاب دهنده براگ - تغییر ضریب شکست در تشدیدگر مستطیلی
186.8	48.9	مد دوم	
29.2	7.32	مد اول	ساختار با بازتاب دهنده براگ - تغییر ضریب شکست در هر دوی بازتاب دهنده براگ و تشدیدگر مستطیلی
94.5	3.18	مد دوم	

### 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.