



تحلیل و بررسی تزویج کننده‌های نوری با استفاده

از روش انتشار پرتو در حوزه زمان

محمد صادق ابریشمیان

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

صندوق پستی: ۱۳۵۵-۱۶۳۱۵

msabrish@eedt.kntu.ac.ir

نصرت ... گرانپایه

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

صندوق پستی: ۱۳۵۵-۱۶۳۱۵

granpaye@eedt.kntu.ac.ir

توکل پاکیزه

مرکز تحقیقات مخابرات ایران

صندوق پستی: ۳۹۶۱-۱۴۱۵۵

pakizeh@eedt.kntu.ac.ir

تزویج کننده‌ها به دو نوع کلی تزویج کننده‌های فیبری و موجبر تیغه عایقی^۲ تقسیم می‌شوند.

از دیدگاه عملکردی نیز تزویج کننده‌ها همگام و یا غیرهمگام هستند [۱]. در تزویج کننده‌های همگام دو موجبر در حالت مجزا دارای ثابت انتشار برابر هستند، ولی در تزویج کننده‌های غیرهمگام این برابری وجود ندارد. تزویج کننده‌های فیبری با استفاده از فیبرهای نوری ساخته می‌شوند. در نوع جدید این نوع تزویج کننده‌ها از گریٹینگ نیز در ناحیه تزویج استفاده شده که قابلیت‌های خاصی را به آنها اضافه کرده است. تزویج کننده‌های موجبری با استفاده از موجبرهای تیغه عایقی ساخته می‌شوند. در این نوع از تزویج کننده‌های نوری دو موجبر تیغه عایقی با مشخصات مناسب در کنار هم قرار می‌گیرند. تزویج کننده‌های موجبری به خاطر ساختارشان برای مدارات مجتمع نوری مناسب هستند.

تئوری مود تزویج شده^۳ یکی از روشهای معمول تحلیل تزویج کننده‌های نوری است. این روش بوسیله Marcuse [۱] به صورت گسترده بکار گرفته شده و توسعه داده شده است. روش تمام موج^۴ روشی دقیق است ولی با پیچیده شدن

چکیده: این مقاله تحلیل و بررسی انتشار پالس در تزویج کننده‌های نوری تیغه عایقی را با استفاده از روش انتشار پرتو در حوزه زمان (TD-BPM) برای اولین بار ارائه می‌کند. در این مقاله TD-BPM در کنار تفاضل محدود (FD) با شمای تعمیم یافته داگلاس (GD) به عنوان یک روش مؤثر و سریع جهت بررسی انتشار پالس نوری در ساختار تزویج کننده‌های نوری معرفی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: انتشار پرتو، پالس نوری، تزویج کننده جهتی، FDTD-BPM، موجبر تیغه عایقی.

۱- مقدمه

تزویج کننده‌های نوری یکی از قطعات مهم در مدارات مجتمع نوری و پرکاربرد در سیستمهای مخابرات نوری هستند. وظیفه تزویج کننده نوری، تزویج نور از یک موجبر به موجبرهای دیگر است.

تزویج کننده‌های نوری در سیستمهای WDM^۱، لیزرها و همچنین سیستمهای پردازش نور مورد استفاده قرار می‌گیرند.

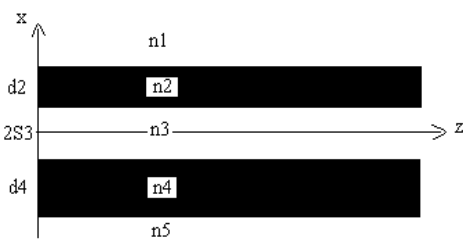
^۲ Slab Waveguide: SW

^۳ Coupled-Mode Theory: CMT

^۴ Full Wave

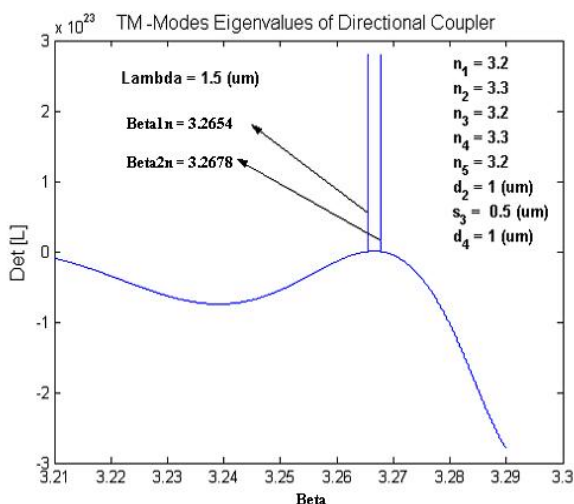
^۱ Wavelength-Division Multiplexing: WDM

میدانهای نواحی مختلف که بصورت توابع نمایی است، اعمال می شود (ساختار دو بُعدی فرض می شود). با اعمال شرایط مرزی یک معادله ماتریسی بدست می آید. برای محاسبه ثابتهای انتشار باید معادله مذکور با استفاده از کامپیوتر حل شود. مودهایی که از این طریق بدست می آیند به مودهایی مرکب^۷ معروفند. از آنجاکه کل ساختار از دو موجبر تشکیل شده است، مودهایی مرکب، مودهایی کل ساختار تزویج کننده محسوب می شوند.



شکل ۱: ساختار یک تزویج کننده نوری جهتی موجبری.

ثابتهای انتشار نرمالیزه شدهی مودهایی مرکب کاپلر جهتی برای مودهایی TM و TE به ترتیب در شکلهای ۲ و ۳ نشان داده شده اند. نمودارها وضعیت دترمینان ماتریس حاصله از معادلات شرایط مرزی $Det[L]^*$ را مشخص می کنند. برای هر نوع مود (TE یا TM) دو مقدار ویژه محاسبه می شود، که یکی مربوط به آرایش زوج و دیگری مربوط به آرایش فرد میدان است.



شکل ۲: محاسبه مقادیر ویژه یک تزویج کننده جهتی به روش دقیق، برای مودهایی TM.

ساختار، استفاده از آن مشکل است. تئوری مود تزویج شده با ایجاد یک سری تقریبهها، تحلیل ساختار را ساده تر می نماید. روشهای مذکور که تحلیلی و نیمه تحلیلی قلمداد می شوند معمولاً در اعمال پارامترها و تغییرات هندسی ساختارها با محدودیت مواجه هستند. همچنین با این روشها نمی توان مسئله انتشار پالس نوری را مورد بررسی قرار داد. بنابراین با در دسترس بودن کامپیوترهای مناسب، روشهای عددی برای تحلیل ساختارهای نوری مورد توجه هستند. روشهایی از قبیل تفاضل محدود حوزهی زمان^۵ و روش انتشار پرتو^۶، روشهای مناسب و شناخته شدهای برای تحلیل و بررسی ساختارهای موجبری و قطعات غیرفعال نوری هستند. حافظه و سرعت تحلیل دو فاکتور مهم در بکارگیری روشهای عددی هستند. روش FDTD جامع تر از BPM است. روش BPM نسبت به FDTD حجم حافظه کمتری را اشغال می کند و از سرعت بالاتری نیز در تحلیل برخوردار است. این دو فاکتور برای شبیه سازی ادوات نوری بسیار حائز اهمیت هستند. با افزودن قابلیت آنالیز حوزه زمانی به BPM، روش TD-BPM که مزایای BPM و همچنین تحلیل در حوزه زمان را داراست، یک روش سریع و مؤثر خواهد بود [۴-۲].

در این مقاله، در بخش ۲ تئوری تزویج کننده های نوری موجبری جهتی معمولی مورد بررسی قرار می گیرد، در این بخش نحوه کویلاژ نور از یک موجبر تیغه عایقی به موجبر دیگر به دقت مطالعه می شود. بخش ۳ روش انتشار پرتو- تفاضل محدود را مورد بحث قرار می دهد و اشاره ای نیز به شمای تعمیم یافته داگلاس دارد. بخش ۴ نیز نتایج شبیه سازیهای کامپیوتری را شامل می شود. جمع بندی مقاله در بخش ۵ آورده شده است.

۲- تئوری تزویج کننده نوری

ساختار یک تزویج کننده نوری، شامل دو موجبر تیغه عایقی مجاور هم در شکل ۱ نشان داده شده است. برای تحلیل تمام موج مسئله باید از ترکیب امواج TE و TM استفاده کرد. در این حالت چهار ناحیه مرزی وجود دارد که شرایط آنها به بسط

^۷ Compound Modes

* $L: [L]. A=0$, است، شرایط مرزی است، $L: [L]. A=0$

^۵ Finite-Difference Time-Domain: FDTD

^۶ Beam Propagation Method: BPM

۳- روش انتشار پرتو تفاضل محدود در حوزه زمان

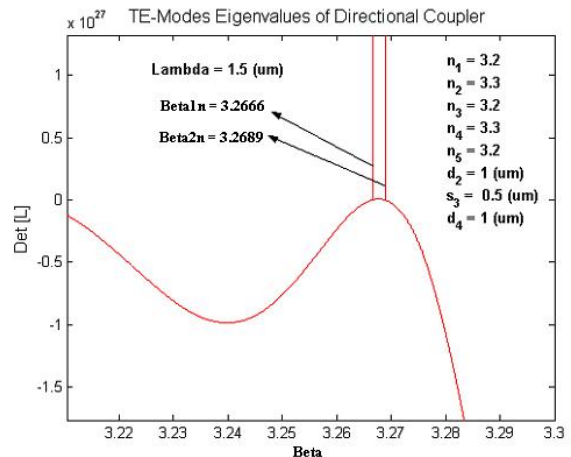
در این مقاله روش انتشار پرتو- تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD-BPM) به عنوان یک روش حل عددی برای تحلیل قطعات غیرفعال نوری مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. روش BPM با تفاضل محدود در حوزه زمان، مزیت‌هایی در کاهش زمان محاسبه و حافظه مورد نیاز، نسبت به روش FDTD دارد [۴-۶]. قابلیت حوزه زمان این روش آنرا از دیگر روشها جدا می‌کند. با این روش می‌توان انتشار پالس نوری را در ساختار مورد نظر مشاهده کرد. معادلات دیفرانسیلی در ساختار سلول بندی شده با یکی از الگوریتمهای تفاضل محدود به صورت گسسته نوشته می‌شود.

در سالهای اخیر TD-BPM برای آنالیز و شبیه‌سازی ساختارهای نوری توسعه داده شده است. این روش مشکلات BPM و FDTD را تا حدی حل می‌نماید. روش TD-BPM بر اساس تقریب تغییرات آرام پوش^۸ (SVEA) بنا نهاده شده است. روش مذکور قابلیت حل مسائل انعکاسی و تفرقی را به BPM می‌دهد. با استفاده از شمای ضمنی^۹ برای تقسیمات زمانی، گام زمانی این حالت بزرگتر از گام زمانی روش FDTD انتخاب می‌شود [۲-۶].

اگر در TD-BPM بنا بر روی تفاضل محدود باشد، شمای میانی FD برای تقریب مشتقهای فضایی از مرتبه دو بکار گرفته می‌شود. این حالت خطای تفکیک $O(\Delta^2)$ را نتیجه می‌دهد، که Δ عرض نمونه‌برداری در فضا است. اگر شمای تعمیم یافته داگلاس^{۱۰} (GD) برای مشتقهای فضایی از مرتبه دو بکار گرفته شود، خطای تفکیک از مرتبه $O(\Delta^4)$ خواهد بود [۷]. بنابراین ما شمای GD را برای TD-BPM بکار گرفته ایم. در ادامه به بررسی شمای GD در مختصات دکارتی خواهیم پرداخت.

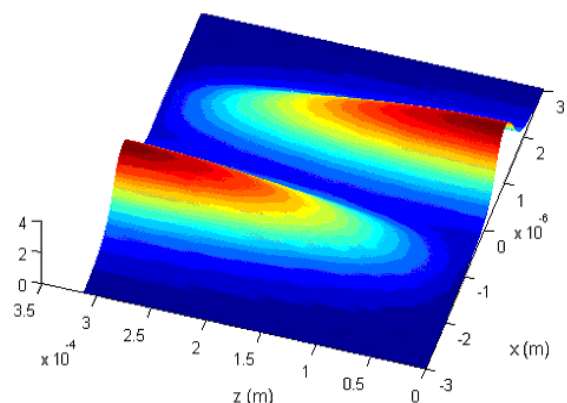
۳-۱- شمای تعمیم یافته داگلاس

در این قسمت سعی می‌شود که یک شرح کلی درباره شمای تعمیم یافته داگلاس (GD) جهت بکارگیری آن در روش انتشار پرتو- تفاضل محدود ارائه شود. جزئیات مربوط به نحوه



شکل ۳: محاسبه مقادیر ویژه یک تزویج کننده جهتی به روش دقیق، برای مدهای TE.

تحریک مود غالب یکی از موجبرها می‌تواند دو آرایش زوج و فرد را در تزویج کننده جهتی تحریک کند. جمع آثار این دو آرایش حالتی تزویج را به خوبی نشان می‌دهد. برای شکل‌های ۲ و ۳، موجبرهای تزویج کننده جهتی متقارن و یکسان فرض شده‌اند. طول موج محاسبات $\lambda = 1.5 \mu m$ است. برای مدهای TM مقادیر ویژه نرمالیزه برابر $\beta_{1n} = 3.2654$ و $\beta_{2n} = 3.2678$ بدست آمده و برای مود TE، $\beta_{1n} = 3.2666$ و $\beta_{2n} = 3.2689$ محاسبه شده‌اند. با توجه به مقادیر بدست آمده مشخص است که اختلاف بین مقادیر ویژه آرایشهای زوج و فرد ناچیز بوده و از مرتبه هزارم است. شکل ۴ نحوه تزویج سیگنال پیوسته نوری را با استفاده از جمع آثار دو مود زوج و فرد، نشان می‌دهد.



شکل ۴: تزویج سیگنال پیوسته نوری در یک تزویج کننده جهتی همگام.

⁸ Slowly-Varying Envelope Approx.: SVEA

⁹ Implicit Scheme

¹⁰ Generalized Douglas: GD

برای یک ساختار دو بُعدی در مختصات کارتزین، با فرض انتشار پوش میدان مود TE با تغییرات آرام رابطه (۵) به صورت زیر ساده می شود:

$$-2j \frac{\omega n^2}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \frac{\omega^2 n^2}{c^2} E \quad (6)$$

معادله (۶) را می توان با ADIM¹¹ در راستای x و z به دو معادله تقسیم کرد. گام انتشار در راستای z به صورت دو نیم گام در نظر گرفته شده که هر نیم گام معادل $\Delta z/2$ است. نیم گام اول از $z_0(l) \rightarrow z_0 + \Delta z/2(l+1/2)$ و نیم گام دوم نیز از $z_0 + \Delta z/2(l+1/2) \rightarrow z_0 + \Delta z(l+1)$ هستند [۲ و ۷]. شمای GD را می توان مستقیماً به مشتقهای دوم نسبت به x و z روابط فوق و بعد از بکارگیری شمای ضمنی ADIM جهت شکستن معادلات مذکور اعمال نمود. پس از کمی عملیات جبری، معادلات گسسته شده به فرم زیر در دو گام بدست می آیند:

$$\zeta_{x,i-1,j}^- E_{i-1,j}^{l+1/2} + \zeta_{x,i,j}^- E_{i,j}^{l+1/2} + \zeta_{x,i+1,j}^- E_{i+1,j}^{l+1/2} = \zeta_{z,i,j-1}^+ E_{i,j-1}^l + \zeta_{z,i,j}^+ E_{i,j}^l + \zeta_{z,i,j+1}^+ E_{i,j+1}^l \quad (7)$$

$$\zeta_{z,i,j-1}^- E_{i,j-1}^{l+1} + \zeta_{z,i,j}^- E_{i,j}^{l+1} + \zeta_{z,i,j+1}^- E_{i,j+1}^{l+1} = \zeta_{x,i-1,j}^+ E_{i-1,j}^{l+1/2} + \zeta_{x,i,j}^+ E_{i,j}^{l+1/2} + \zeta_{x,i+1,j}^+ E_{i+1,j}^{l+1/2} \quad (8)$$

با

$$\zeta_{\alpha,i,j}^\pm = \frac{j\omega n_{i,j}^2}{6c^2 \Delta t} \pm \frac{\omega^2 n_{i,j}^2}{48c^2} \pm \frac{1}{2\Delta \alpha^2} \quad (9)$$

$$\zeta_{\alpha,i,j}^\pm = \frac{5j\omega n_{i,j}^2}{3c^2 \Delta t} \pm \frac{5\omega^2 n_{i,j}^2}{24c^2} \mp \frac{1}{\Delta \alpha^2} \quad (10)$$

که α همان x یا z است.

روابط گسسته (۷) و (۸) ماتریسهای سه قطری را ایجاد می کنند که می توان از الگوریتم توماس برای محاسبه عکس آنها استفاده کرد [۲ و ۷].

۴- نتایج شبیه سازی

عملیات شبیه سازی در مرحله اول برای ساختار موجبر تیغه عایقی صورت گرفته است. شبیه سازی انتشار پالس نوری در یک موجبر دو بُعدی به ما کمک می کند که بتوانیم عملکرد الگوریتم بکار رفته و همچنین نواقص موجود در پیاده سازی

بدست آوردن معادلات تفاضل محدود آورده نمی شود. در یک مسئله دو بُعدی معادله فرنل به فرم زیر در نظر گرفته می شود:

$$\sigma \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \nu E \quad (1)$$

که $\sigma = 2jkn_0$ و $\nu = k^2 [n^2(x,z) - n_0^2]$ عدد موج فضای آزاد است، $n(x,z)$ نمایه ضریب شکست موجبر و n_0 ضریب شکست مرجع است.

با استفاده از سری تیلور، مشتق مرتبه دوم رابطه (۱) به صورت زیر بسط داده می شود [۷]:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{\delta^2 E}{\Delta x^2} - \frac{1}{12} \frac{\partial^4 E}{\partial x^4} \Delta x^2 + O(\Delta x^4) \quad (2)$$

که $\delta^2 E = E_{i+1} - 2E_i + E_{i-1}$ و Δx نیز تفاضل جزئی در جهت x است. در FD-BPM معمول، تنها ترم اول سمت راست معادله (۲) در نظر گرفته می شود که این باعث می شود خطای تقسیم بندی از مرتبه $O(\Delta x^2)$ باشد. در شمای GD، ترم دوم به صورت زیر دخالت داده می شود:

$$\frac{\partial^4 E}{\partial x^4} = \frac{M_{i+1} - 2M_i + M_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (3)$$

که $M_k = (\partial^2 E / \partial x^2)_k$ در x_k ارزیابی می شود. مشتقات دوم معادله فوق را می توان با معادله فرنل جایگزین کرد. با قرار دادن معادله (۱) در معادله (۲) و جایگزینی $\partial^4 E / \partial x^4$ معادله دیفرانسیل زیر را می توان بدست آورد:

$$\begin{aligned} \frac{(\delta^2 E)}{\Delta x^2} &= \frac{1}{12} \left(\sigma \frac{\partial E}{\partial z} \right)_{i+1} + \frac{5}{6} \left(\sigma \frac{\partial E}{\partial z} \right)_i \\ &+ \frac{1}{12} \left(\sigma \frac{\partial E}{\partial z} \right)_{i-1} - \frac{1}{12} (\nu E)_{i+1} \\ &- \frac{5}{6} (\nu E)_i - \frac{1}{12} (\nu E)_{i-1} + O(\Delta x^4) \end{aligned} \quad (4)$$

با پیاده سازی مشتق نسبت به z در معادله (۴)، شمای شش نقطه ای GD کامل می شود [۷].

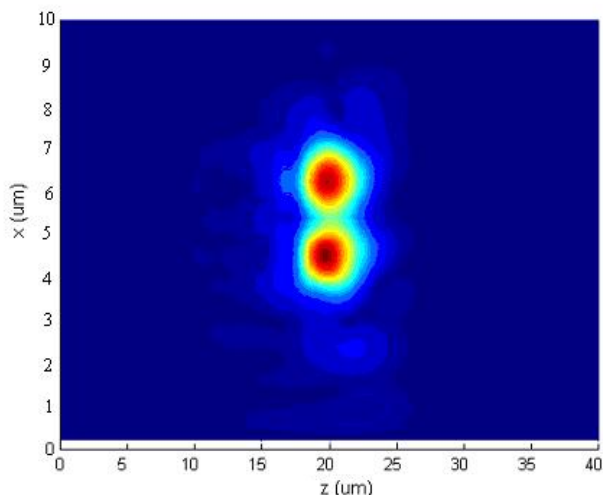
۳-۲- معادلات گسسته شده

معادله موج سیگنال پوش E که با سیگنال هارمونی با فرکانس زاویه ای ω مودله شده را می توان به صورت زیر نوشت [۲]:

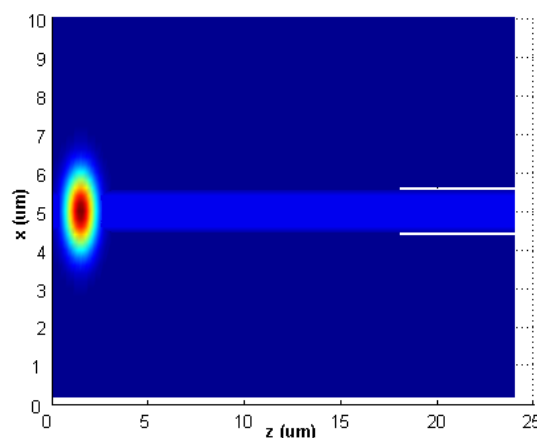
$$\frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - 2j \frac{\omega n^2}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = -\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\omega^2 n^2}{c^2} \mathbf{E} \quad (5)$$

¹¹ Alternating Direction Implicit Method: ADIM

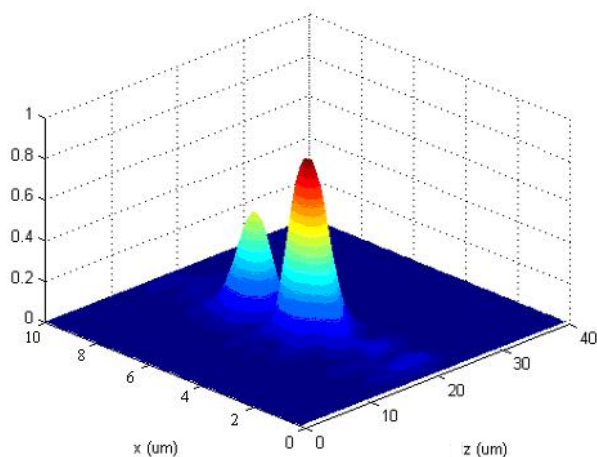
را بهتر بررسی کنیم. تحلیل موجبر تیغه عایقی ساده بوده و می توان از آن به عنوان مرجع در شبیه سازی کامپیوتری ساختارهای دیگر مورد نظر استفاده کرد و همچنین از درصد صحت و سقم جوابهای بدست آمده از پیاده سازی کامپیوتری عملیات شبیه سازی، اطمینان حاصل کرد. یکی از مسائل مهم در شبیه سازیهای کامپیوتری مسائل موجی و نوری مسئله تحریک ساختار است. فرم تحریک و نحوه اعمال آن دو پارامتر مؤثر و تعیین کننده در بررسی عملکردهای ساختارها هستند.



شکل ۵: نحوه توزیع نور در یک تزویج کننده نوری موجبری: تقسیم توان بین دو موجبر.



شکل ۴: تحریک یک موجبر تیغه عایقی با یک پالس گوسی.



شکل ۶: توزیع سه بُعدی میدان و انتشار پرتو در میانه مسیر برای یک تزویج کننده جهتی.

شکل ۶ توزیع سه بُعدی میدان های یک تزویج کننده جهتی در میانه مسیر انتشار پالس نوری را نشان می دهد. مشخص است که قسمتی از توان سیگنال موجبر تحریک هم شکل با پالس اصلی، به موجبر دوم تزویج شده است. برای این ساختار تقسیمات در جهت عرضی (x) برابر با $dx = 0.2 \mu m$ و در جهت انتشار (z) برابر با $dz = 0.1 \mu m$ در نظر گرفته شده است. ابعاد ناحیه حل $(Dz \times Dx)$ برابر $10 \mu m \times 40 \mu m$ است.

انتشار صحیح پرتو در ساختار به پارامترهای زیادی از قبیل طول موج کار، ابعاد ساختار، نحوه مش بندی، گسسته کردن ساختار و همچنین تحریک مناسب، وابسته است.

در این مقاله تحریک با استفاده از یک پالس نوری گوسی شکل در حوزه زمان و مطابق با آرایش مود غالب در راستای عرضی انجام می گیرد. یک نمونه از این پالس نوری که به عنوان تحریک در یک موجبر تیغه عایقی و در مختصات دو بُعدی در نظر گرفته شده است، در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۵ تقسیم توان سیگنال نوری بین دو موجبر مجاور در یک تزویج کننده جهتی همگام نشان داده شده است. با انتشار پالس نوری در یک موجبر، موجبر مجاور مانده توان آنرا از آن خود می کند. برای محدود کردن ناحیه حل و کم کردن خطای ناشی از آن می توان از شرایط مرزی جاذب استفاده کرد [۸-۹]. در این مقاله ابعاد به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده اند، بنابراین از شرایط مرزی جاذب استفاده نشده است.

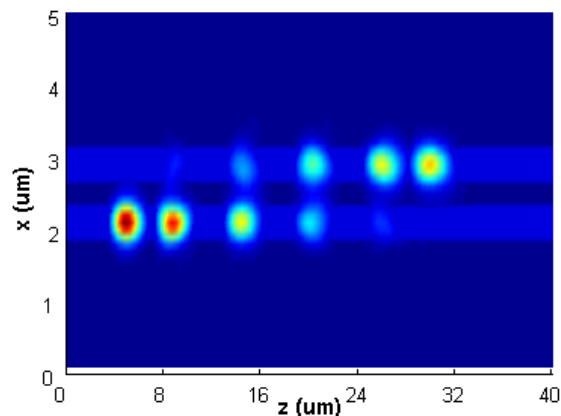
سازیهای کامپیوتری برای ساختارهای مختلف، به خوبی دقت و عملکرد مناسب این روش پیاده سازی شده را نشان می دهد.

۶- قدردانی

نویسندگان مقاله از مرکز تحقیقات مخابرات ایران به خاطر حمایت مالی پروژه تشکر و قدردانی می نمایند.

مراجع

- [1] D. Marcuse, *Theory of Dielectric Waveguides*. Academic Press, Ed. 2, 1991.
- [2] J. Shibayama, T. Takahashi, J. Yamauchi, and H. Nakano, "Efficient Time-Domain Finite-Difference Beam Propagation Methods for the Analysis of Slab and Circularly Symmetric Waveguides," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. LT-18, pp. 437-442, 2000.
- [3] H. M. Masoudi, M. A. AlSunaidi, and John M. Arnold, "Time-Domain Finite-Difference Beam Propagation Method," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 11, pp. 1274-1276, 1999.
- [4] H. M. Masoudi, M. A. AlSunaidi, and J. M. Arnold, "Efficient Time-Domain Beam Propagation Method for Modeling Integrated Optical Devices," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 19, pp. 759-771, 2001.
- [5] J. Shibayama, A. Yamahira, T. Mugita, J. Yamauchi, and H. Nakano, "A Finite-Difference Time-Domain Beam-Propagation Method for TE-and TM-Wave Analysis," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. LT-21, pp. 1709-1715, 2003.
- [6] D. Sullivan, J. Liu, and M. Kuzyk, "Three-Dimensional Optical Simulation Using the FDTD Method," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 48, pp. 1127-1133, 2000.
- [7] J. Yamauchi, J. Shibayama, O. Satio, O. Uchiyama, and H. Nakano, "Improved Finite-Difference Beam Propagation Method Based on the Generalized Douglas Scheme and Its Application to Semivectorial Analysis," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 14, pp. 2401-2406, 1996.
- [8] K. Satioh and M. Koshiba, "Approximate Scalar Finite-Element Beam Propagation Method with Perfectly Matched Layers for Anisotropic Optical Waveguides," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 19, pp. 786-792, 2001.
- [9] C. Vassallo and F. Collino, "Highly Efficient Absorbing Boundary Conditions for the Beam Propagation Method," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. 17, pp. 2389-2397, 1999.



شکل ۷: انتشار پالس گوسی و تزویج توان در یک تزویج کننده نامتقارن و غیرهمگام.

شکل ۷ انتشار پالس نوری و تزویج آن به موجبر مجاور یک تزویج کننده غیر همگام را به خوبی نشان می دهد. در تزویج کنندههای جهتی غیر همگام و نامتقارن امکان تزویج کامل توان از موجبر تحریک شده به موجبر مجاور وجود ندارد و سهمی از سیگنال نوری همیشه روی موجبر تحریک شده باقی می ماند. علت این سوئیچینگ ناقص توان، منطبق نشدن فازهای مودهای منتشره موجبرها بعد از طی مسیر در نظر گرفته شده برای ساختار است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله تحلیل تزویج کنندههای نوری با روش انتشار پرتو تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD-BPM) مورد بررسی قرار گرفتند. شبیه سازیها برای یک موجبر تیغه عایقی ساده، تزویج کننده جهتی همگام، تزویج کننده جهتی غیرهمگام انجام گرفته است. تحلیل موجبر تیغه عایقی ساده بوده و می توان از آن به عنوان مرجع در شبیه سازی کامپیوتری ساختارهای دیگر استفاده کرد. بعد از شبیه سازی انتشار پرتو گوسی در یک موجبر تیغه عایقی و تأیید صحت الگوریتم پیاده سازی شده، به تحلیل عددی ساختار تزویج کننده جهتی نوری هم گام و غیرهم گام پرداخته شد. با توجه به اینکه روش پیاده شده در حوزه زمان است، به راحتی می توان نحوه تزویج توان نوری از یک موجبر به موجبر مجاور را دنبال کرد. روش بکار برده شده، در مقایسه با روش FDTD به حافظه کامپیوتری و زمان محاسبات خیلی کمتری نیاز دارد. نتایج بدست آمده از شبیه