# مقایسه نتایج شبیهسازی بلور فوتونی با استفاده از روش FDTD دوبعدی بهبودیافته و FDTD سهبعدی

تهمينه جلالي احمد محمدي

 ۱ استادیار - گروه فیزیک - دانشگاه خلیج فارس - بوشهر - ایران jalali@pgu.ac.ir
۲ - استادیار - گروه فیزیک - دانشگاه خلیج فارس - بوشهر - ایران <u>mohammadi@pgu.ac.ir</u>

چکیده: با استفاده ازدادههای آزمایشگاهی، دقت روش تفاضل متناهی دامنه زمان FDTD دوبعدی بهبودیافته با روش FDTD سه بعدی مقایسه می گردد. برای این منظور از موجبر خمیده <sup>۹</sup>۰۰ بلور فوتونی بهینه استفاده شده است. با توجه به هندسهٔ موجبر بلور فوتونی، قطبش الکتریکی عرضی در نظر گرفته شده است. این دادهها از تکنیک End-Fire در آزمایشگاه به دست آمدهاند. با محاسبهی گذردهی موثر در الگوریتم یی نشان میدهیم که روش FDTD بهبودیافته دوبعدی توافق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی و شبیهسازی سه بعدی دارد. با توجه به سادگی الگوریتم و کارایی روش دوبعدی میتوان شبیهسازی ابزارهای بلور فوتونی را بر روی کامپیوترهای شخصی با سرعت قابل قبولی انجام داد. همچنین این روش قابل استفاده برای بلورهای فوتونی با هر ساختار و مادهای می اشد. بنابراین با در نظر گرفتن سرعت بالای روش دوبعدی در مقایسه با سه بعدی و امکان اجرای آن بر روی کامپیوترهای شخصی میتوان از این روش دوبعدی برای مطالعات بنیادی و بهینه سازی ابزارهای بلور و

كلمات كليدى: بلور فوتونى، روش تفاضل متناهى دامنه زمان، شبيهسازى، موجبر.

**تاریخ ارسال مقاله:** ۱۳۹۰/۶/۷ **تاریخ پذیرش مقاله:** ۱۳۹۱/۱۱/۲۸ **نام نویسندهی مسئول**: تهمینه جلالی **نشانی نویسندهی مسئول**: ایران – بوشهر – خیابان شهید ماهینی – دانشگاه خلیج فارس – دانشکدهی علوم

Downloaded from jiacee.com on 2025-08-24

#### ۱– مقدمه

با جایگزینی المانهای الکترونیکی توسط ابزارهای اپتیکی و به عبارت دیگر جایگزینی الکترون توسط فوتون میتوان به سرعت و ظرفیتهای بالاتر دسترسی پیدا کرد. در پی این تحول، علم اپتوالکترونیک به سرعت فراگیر شده و در جهت بهبود زندگی بشر به کار آمده است. در این میان بلورهای فوتونی پتانسیل بسیاری دارند که با اهمیتترین قسمت وسایل تشکیل دهنده مدارات مجتمع فوتونی، معادل با هر ابزار الكترونيكي رايج باشند. به همين دليل امروزه بلورهاي فوتوني خود را به عنوان شاخهای جدید و مورد علاقهی یژوهشگران در زمینههای بسیاری همچون اپتوالکترونیک، مخابرات، فیزیک و ... شناساندهاند. بلورهای فوتونی موادی با ساختار تناوبی در یک، دو و سه بعد هستند[۱]. در بلورهای فوتونی گاف نواری (بازه بسامد ممنوعه) وجود دارد که اجازه انتشار هیچ موجی را نمیدهد. وجود گاف نواری فوتونی در بازههای بسامدی مشخص، به همراه ایجاد نقصهای نقطهای یا خطی منجر به قابلیت تنظیم خواص اپتیکی بلورهای فوتونی شده است؛ و کاربرد این بلورها را در ابزارهای اپتیکی و فوتونی بسیاری چون لیزرهای میکروکاواک، سوئیچهای اپتیکی با سرعت بالا یا دیودهای گسیلندهی نور امکانپذیر میسازد. از گافهای انرژی در این بلورها برای ساخت آینهها، موجبرها و میکروکاواکهای با بازده بالا استفاده می شود و می توان مدارهای کامپیوتری تمام نوری در ابعاد مینیاتوری ساخت[۳-۱]. در حال حاضر از این ابزار قدرتمند در نمایشگرها، دیودهای نورافشان، سلولهای خورشیدی، حسگرهای نوری، لیزرهای دیودی و … استفاده میشود [۴]. کاواکهای بلور فوتونی نور را قویا در حجم کوچکی محبوس میکنند و کاربردهای بسیاری از جمله، برهم-كنش بين الكترون و فوتون، اپتيك غيرخطي، پردازش اطلاعات کوانتومی، لیزرهای با آستانه پایین و فیلترهای با دقت بالا، دارنـد [۵]. اخیراً بلورهای فوتونی مغناطیسی در انتشاردهندههای دورانی، ایزولاتورها و مبدلهای نوری فوق سریع برای پردازش لیزری تصویر نیز به کار برده شدهاند[۶].

در سالهای اخیر تحقیقات فراوانی بر روی بلورهای فوتونی دوبعدی به علت ساخت و بهینهسازی سادهتر آنها نسبت به بلور فوتونی کاملا سه بعدی انجام یافته است [۴و۳]. با توجه به هزینه بالای ساخت ابزارهای اپتیکی بر پایه بلور فوتونی ، نیازمند طراحی دقیق و مدلسازی این ابزارها به کمک تکنیکهای محاسباتی میباشیم. برای بررسی این گونه ساختارها روشهای محاسباتی متفاوتی مورد استفاده قرار می-گیرد. روش <sup>(</sup>FDTD تکنیک محاسباتی میباشد که در حوزههای مختلفی از جمله مهندسی، فیزیک و ... مورد استفاده قرار میگیرد. به منظور شبیهسازی آنتنها، مدارات الکترونیکی، نانوذرات، ابزارهای بلورهای فوتونی و... روش FDTD بررسی و استفاده شده است[۲۰۱]. از مزایای روش FDTD میتوان به سادگی به هنگام شدن الگوریتم و رفتار قابل کنترل واگرایی با در نظر گرفتن نقاط نمونه فضایی اشاره

کرد [۱۲]. موضوعی مهم در شبیه سازی به روش FDTD دقت بر روی مرزهای ماده است، که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. در روش FDTD تقسیم بندی مدل اغلب با شبکه بندی دکارتی انجام می-شود، که این شبکه های اعمال شده بر اجسام اختیاری انحنادار، منجر به سلول های مربعی نیمه پر با گذردهی دی الکتریک متفاوت می-شود[۱۱–۱۱]. در این جا از روش FDTD به بودیافته برای محاسبه و اعمال کردن گذردهی در الگوریتم یی استفاده نموده ایم. ساختار تناوبی بلور فوتونی نواحی مرزی بسیاری را نتیجه می دهد. در الگوریتم یی[۱۲] در ابعاد بزرگ، اثر مرزها از اهمیت کمی برخوردار است ولی در ابعاد خیلی کوچک این اثرات بسیار با اهمیت می باشد. به منظور فریب شکست داشته باشد. هر دو این موضوعات برای شبیه سازی هر نوع مسئلهی مرزی بسیار با اهمیت می باشد و مدل بسیار خوبی برای اعتبار سنجی کد FDTD به بودیافته است.

در این مقاله، نتایج اندازه گیری آزمایشگاهی عبور موجبر خمیده ۶۰<sup>۵</sup> بلور فوتونی [۱۴] با نتایج به دست آمده از شبیهسازی به روش FDTD دو و سه بعدی مقایسه شده است. ساختار مقاله بدین صورت است: ابتدا ساختار موجبر خمیده ۶۰<sup>۰</sup> بلور فوتونی معرفی می گردد. سپس روش FDTD سه بعدی و روش FDTD بهبودیافته دوبعدی ارایه میشود. نهایتا به تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از هر دو روش پرداخته و آنها را با دادههای آزمایشگاهی مقایسه می کنیم. در انتهای مقاله نتیجه گیری آمده است.

## ۲- موجبر خمیده ۶۰<sup>0</sup> بلور فوتونی

هر کدام از تغییرات در آرایش دورهای بلور منجر به خلق ابزاری جدید می گردد. هر بلور فوتونی دارای نواری ممنوعه میباشند، که با ایجاد نقص خطی در بلور فوتونی، نور مجاز به عبور با بعضی طول موج-های مشخص می شود. برههای بلور فوتونی دو بعدی نقش کنترل نور را بین بعد دوم و سوم دارند.



در موجبرهای معمولی، شعاع خمیدگی محدود به چندین میلی-متر میباشد، ولی موجبر در بلور فوتونی به دلیل این که نور قویا توسط ساختار تناوبی هدایت میشود، اجازه خمش نور را در ابعاد نانو، قابل مقایسه با طولموج، میدهد. به منظور داشتن گاف نواری ممنوعه پهن طول موج اعمالی ۱۵۵۰ نانومتر و فاکتور پرشدگی ۳۵٪ انتخاب شده است و بلور از مادهی ۱۵۵۰ نانومتر و فاکتور پرشدگی ۵۵٪ انتخاب شده ساختار شش وجهی و خمشی با زاویهی °۶۰ دارد. کل ساختار بسیار موچک و شامل ۴×۵ ثابت شبکه است. پهنای نواری این موجبر بهینه-سازی شده تا ۲۹٪ کل گاف نواری ممنوعه افزایش یافته و بیشینهی بازده عبور ۹۶٪ است(شکل ۱)[۱۳]. در این کار، با توجه به هندسهٔ موجبر بلور فوتونی، قطبش الکتریکی عرضی (<sup>۲</sup>ET) در نظر گرفته شده است.

#### ۳- روش عددی FDTD استاندارد

هنگامی که ابعاد ساختارها به طول موج اپتیکی (نانومتر) کاهش می یابد، اعتبار بسیاری از تقریب های محاسبات عددی معادله های الکترومغناطیسی از بین می رود. یکی از روش های مورد توجه، روش FDTD است [۱۲]. شبیه سازی طیف عبور موجبر بلور فوتونی به روش FDTD دوبعدی در مقالات بسیاری بررسی شده است. همچنین بعضی از مقالات به شبیه سازی سه بعدی طیف عبور پرداخته اند [۲–۳]. بعضی از مقالات به شبیه سازی سه بعدی طیف عبور پرداخته اند [۲–۳]. بعضی از مقالات به شبیه سازی سه بعدی طیف عبور پرداخته اند در ۲ به توجه به این که در سه بعد مدهای اتلافی نیز به حساب می آید، شبیه سازی سه بعدی طیف عبور به واقعیت نزدیک تر است. در دوبعد مد نقص در بلور بدون اتلاف منتشر می شود، در حالی که در سه بعد انتشار مدهای نقص محدود به انعکاس داخلی در صفحه می شوند.

در روش FDTD، فضای شبیهسازی به سلولهای مکعبی تقسیم می گردد و بر روی هر سلول مؤلفههای میدان الکتریکی و مغناطیسی با ترتیب خاصی قرار داده می شوند. سپس با به کارگیری تفاضل متناهی بر روی معادلات وابسته به زمان ماکسول، مجموعهای از روابط براي محاسبهي مؤلفههاي مختلف ميدان الكترومغناطيسي برحسب مقادیر مربوطه در زمان قبل به دست میآیند. در الگوریتم یی، ابت دا میدانهای مورد بحث با شرایط اولیهی مناسب مقداردهی می شوند و سپس در یک حلقهی زمانی مقادیر جدید برای هر مؤلفه با در اختیار داشتن میدان های الکتریکی و مغناطیسی مجاور در یک گام زمانی عقبتر به دست میآیند. پس از پایان یافتن زمان شبیهسازی، با در اختیار داشتن مقادیر میدان های الکتریکی و مغناطیسی در تمامی سلولها، می توان کمیتهای فیزیکی مورد نظر را محاسبه کرد. در روشهای عددی مثل FDTD برای شبیهسازی مسایل با مرزهای باز از شرط مرزی لایه ای جاذب ساختگی با عنوان لایه ی کاملا جور شده (PML<sup>r</sup>) استفاده می شود، تا بتوان فضای محاسباتی را کوتاه کرد. همچنین با استفاده از این لایههای PML از انعکاس امواج الکترومغناطیسی به درون ساختار از لبههای فضای محاسباتی جلوگيري مي شود.

در روش FDTD سهبعدی مورد استفاده از ساختاری با شبکه-بندی غیریکنواخت استفاده شده است. شبکه غیرهمگن سهبعدی با گرههای شبکه مختصات یک بعدی بدین صورت می باشند.

{
$$x_{i}, i = 1, N_{x}$$
}; { $y_{j}, j = 1, N_{y}$ }; { $z_{k}, k = 1, N_{z}$ } (1)

سلول و مراکز لبهها در فضای غیرخطی به صورت زیر معرفی میشود.

$$\begin{aligned} x_{i+1/2} &= x_{i} + \Delta x_{i} / 2 \\ y_{j+1/2} &= y_{j} + \Delta y_{j} / 2 \\ z_{k+1/2} &= z_{k} + \Delta z_{k} / 2 \end{aligned} \tag{Y}$$

میدان E و H در شبکه غیرخطی به صورت زیر نمایش داده می شوند:

$$\begin{split} & E_{x} \Big|_{i+l/2,j,k}^{n} \equiv E_{x} \left( x_{i+l/2}, y_{j}, z_{k}, n\Delta t \right) \\ & H_{x} \Big|_{i,j+l/2,k+l/2}^{n+l/2} \equiv H_{x} \left[ x_{i}, y_{j+l/2}, z_{k+l/2}, (n+l/2) \Delta t \right] \end{split}$$

$$\begin{split} &| \lim_{x_{i}} h_{y_{j}} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1/2} - E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n+1/2}}{\Delta t} \right) + J \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1/2} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n+1/2}}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) + J \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1/2} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) + J \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1/2} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) + J \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1/2} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) + J \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1/2} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n+1} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z} \left|_{i,j,k+l/2}^{n} + E_{z} \right|_{i,j,k+l/2}^{n}}{\Delta t} \right) \\ &+ \frac{\sigma_{i,j,k+l/2}}{2} \left( \frac{E_{z$$

که  $\sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{k} \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{k} \sum_{j=1}^{k} \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{k} \sum_{j=1}^{k} \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{k} \sum_{j=1}^{k}$ 

در حالت دوبعدی میدانها با دو قطبش الکتریکی عرضی و مغناطیسی عرضی تقسیم بندی می شوند. در این جا، با توجه به ساختار بلور فوتونی، معادلات ماکسول در دوبعد را برای حالت قطبش الکتریکی عرضی در نظر می گیریم. فضای شبیه سازی به سلول های مربعی و زمان نیز با پله زمانی گسسته تقسیم می گردد. سپس تابع روی مرزهای شبکه در هر پله زمان معرفی می شود. رابطه های پله ای زمان 2D-FDTD برای مدهای TE بدین صورت نوشته می شود.

۵۰ – ۱۹ – مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران-سال دهم-شماره اول-بهار و تابستان ۱۳۹۲ ( ا

Engineers Vol10- No.1 Spring & Summer

2013

ournal of Iranian

Association of Electrical

$$\mathbf{E}_{\mathbf{x}}\Big|_{i,j}^{n+1} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_{i,j} - \boldsymbol{\sigma}_{i,j}\,\Delta t/2}{\boldsymbol{\varepsilon}_{i,j} + \boldsymbol{\sigma}_{i,j}\,\Delta t/2} \mathbf{E}_{\mathbf{x}}\Big|_{i,j}^{n} + \frac{\Delta t}{\boldsymbol{\varepsilon}_{i,j} + \boldsymbol{\sigma}_{i,j}\,\Delta t/2} \frac{\mathbf{H}_{\mathbf{z}}\Big|_{i,j+1}^{n} - \mathbf{H}_{\mathbf{z}}\Big|_{i,j}^{n}}{\Delta y} \tag{(b)}$$

$$\mathbf{E}_{\mathbf{y}}|_{i,j}^{\mathbf{n}+1} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_{i,j} - \boldsymbol{\sigma}_{i,j} \Delta t/2}{\boldsymbol{\varepsilon}_{i,j} + \boldsymbol{\sigma}_{i,j} \Delta t/2} \mathbf{E}_{\mathbf{y}}|_{i,j}^{\mathbf{n}} - \frac{\Delta t}{\boldsymbol{\varepsilon}_{i,j} + \boldsymbol{\sigma}_{i,j} \Delta t/2} \frac{\mathbf{H}_{\mathbf{z}}|_{i+1,j}^{\mathbf{n}} - \mathbf{H}_{\mathbf{z}}|_{i,j}^{\mathbf{n}}}{\Delta \mathbf{x}}$$
( $\boldsymbol{\mathcal{F}}$ )

$$\mathbf{H}_{z}\Big|_{i,j}^{n+1/2} = \mathbf{H}_{z}\Big|_{i,j}^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \left( \frac{\mathbf{E}_{y}\Big|_{i+1,j}^{n} - \mathbf{E}_{y}\Big|_{i,j}^{n}}{\Delta x} - \frac{\mathbf{E}_{x}\Big|_{i,j+1}^{n} - \mathbf{E}_{x}\Big|_{i,j}^{n}}{\Delta y} \right)$$
(Y)

که در آن  $\mu$  ,  $\epsilon$  و  $\sigma$  تراوایی، گذردهی وابسته به مکان و رسانایی ماده هستند. بالانویس n پله زمان گسسته را نشان می دهد و زیرنویس i, j مکان نقاط شبکه در راستای x, y را نمایش می دهند.  $\Delta t$  نمو زمان و  $\Delta x$ ،  $\Delta y$  نمو مکان در راستای x,y بین دو نقطهی مجاور شبکه هستند. در مقاله حاضر  $\Delta r^{-2} + \Delta y^{-2}$  به عنوان پله زمانی انتخاب شده است، تا شرایط پایداری را ارضا کند و c سرعت نور در خلا است. در این کد از شرایط مرزی لایهی جور شده پیچشی <sup>\*</sup> CPML استفاده شده است[۲۲]. منبع موجبر با پروفایل زمانی بسته گاوسی  $c^{-2}/2\sigma^{-2}$  اعمال شده است، که  $\sigma$  پهنای پالس و زمانی بسته گاوسی تریز اس به گونهای انتخاب شده است که میدا با دامنهی تقریبا صفر شروع شود و پهنای آن گسترهی طول موج مورد نظر را



شکل (۲): سلول نیمه پر. الف) مرز عمود و ب) مرز موازی با مؤلفهی میدان الکتر یکی

#### ۴- روش عددی FDTD بهبودیافته

(ournal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol. 10- No.1 Spring & Summer 2013

سطوح دیالکتریک با شکل اختیاری، سلولهای FDTD نیمه پر تولید میکنند، که در روش معمولی این سلولها با سلولهای خالی یا کاملاً پر تقریب زده میشوند[۱۲]. بنابراین نمایش سلولها به صورت عددی با شکل واقعی جسم متفاوت و سبب خطا در محاسبات می-گردد. برای کاهش این گونه خطاها باید از شبکهی بسیار ریز استفاده کرد که باعث افزایش زمان پردازش و حافظهی مورد نیاز میگردد. یک روش کارا برای حل این مشکل، استفاده از گذردهی مؤثر برای سلول-های نیمه پر است[۱۰و۱۱]. زمانی که مرز عمود و موازی به مؤلفهی

$$\varepsilon_{\parallel} = f\varepsilon_2 + (1 - f)\varepsilon_1 \tag{A}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\perp} = \left(\frac{\mathbf{f}}{\boldsymbol{\varepsilon}_2} + \frac{(1-\mathbf{f})}{\boldsymbol{\varepsilon}_1}\right)^{-1} \tag{9}$$

که در آن f فاکتور پرشدگی سلول و  $f_1$ ،  $g_2$  به ترتیب گذردهی محیطهای ۱و۲ می اسند. فرض می کنیم که میدانهای الکتریکی تنها در حالتهای موازی و عمودی نسبت به مرز قرار دارند. همچنین از پیکربندیهایی که در آنها کمتر از نیمی از سلولها پر شده است، چشم پوشی کردهایم. مؤلفههای میدان از برهم نهی گذردهی مؤثر عمودی و موازی با توجه به زاویه بین میدان الکتریکی و مرز، برای سطوح انحنادار به دست میآیند. گذردهی مؤثر با متوسط گیری از زاویه میدان در یک سلول به صورت زیر به دست میآید.

 $\varepsilon_{eff} = \varepsilon_{\parallel} \cos^2 \theta + \varepsilon_{\perp} (1 - \cos^2 \theta)$  $(1 \cdot)$ که  $\theta \in [0, \pi/2]$  زاویه یا بین میدان الکتریکی و بردار عمود بر مرز است. متوسط زاویهی بین میدان الکتریکی و مرز از مرکز شعاع انحناء برای هر کدام از سلولها را محاسبه میکنیم. گذردهی مؤثر تصویر شده برای مؤلفههای x و y میدان الکتریکی سلولهای مختلف نیمه پر باید در نظر گرفته شود. در این روش نیازی به تغییر الگوریتم یی نیست و تنها با جایگزینی گذردهی با گذردهی مؤثر محاسبه شده می-توان آن را برای هر مؤلفه میدان در الگوریتم یے اعمال کرد. در مد TE، هر کدام از پلههای زمانی در معادلههای ماکسول، به ترتیب از و  $\mathcal{E}_{eff,v}$  و  $\mathcal{E}_{eff,v}$  برای محاسبه میدانها استفاده شده است. برای به  $\mathcal{E}_{eff,v}$ دست آوردن پاسخ بسامدی از تبدیل فوریهی گسسته برای تبدیل کمیتهای دامنه زمان به دامنه بسامد استفاده شده است. برای تحلیل میزان عبور در ساختار، توان شارش متوسط زمانی اندازه گیری می-گردد. همچنین با انتگرال گیری از بردار پوئین تینگ بر روی سطح، میزان عبور محاسبه شده است.



شکل (۳): پروفایل موج عبوری از موجبر خمیده <sup>°</sup>۶۰ بلور فوتونی که توسط نرم افزار SEMCADتولید شده است.

#### ۵- بررسی

به منظور اندازه گیری میزان عبور از موجبر بلور فوتونی در آزمایشگاه از تکنیک (EF) End-fire در گروه فوتونیک مخابراتی دانشگاه ETH استفاده شده است[۱۴]. در آزمایشگاه از منبع نوری با دو لیزر همدوس استفاده شده است. این دو لیزر در گسترهی طول-موجی nm-۱۶۳۰ میکنند. تار نوری متمرکز شده به موجبر جفت شده است و لیزرها نور را با قطبش TE به موجبر تزریق می کنند. بعد از انتشار نور از میان موجبر، سیگنال در خارج از موجبر به روش میکروسکوپی گردآوری و با توانسنج اندازه گیری شده است. فاکتور پرشدگی موجبر توسط دستگاه <sup>۵</sup>SEM اندازهگیری شده و در حدود ۳۶/۸٪ تعیین شده است[۱۴]. ابتدا موجبر قبل و بعد از بهینه-سازی شبیهسازی میگردد( شکل ۱). پروفایل موج عبوری میدان  $\mathrm{H}_{\mathrm{z}}$  از موجبر در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل (۴): مقایسه اندازهگیری و شبیهسازی دو و سه بعدی. جابجایی آبی ۴٪ بین اندازهگیری و شبیهسازی قابل مشاهده است.

نتایج اندازه گیری آزمایشگاهی با روش FDTD بهبودیافته دوبعدی و FDTD سه بعدی برای شبیهسازیهای بلور فوتونی مقایسه شده است. مقادیر به دست آمده در آزمایشـگاه بـا تکنیـک EF توافـق خوبی با شبیه سازی دو و سه بعدی دارند ( شکل ۴). در روش FDTD دوبعـدی، فضای محاسـباتی از سـلولهـای ۳۰۰× ۱۵۰ و ۲۴ لایـه CPML تشکیل شده است. رسانش در انتهای لایهی CPML را ۲/۲  $\Delta x = \Delta y =$ ۶۷ nm انتخاب کردهایم. گام تقسیمبندی فضایی است. چشمهی موجبر در وسط ورودی موجبر اصلی قرار گرفته است و پایین ترین مد TE برای برهی موجبر تولید شده است. پهنای بره، به اندازهی یک ردیف حفرههای حذف شده از موجبر بلور فوتونی است، که در شکل ۳ در ورودی موجبر بلور فوتونی دیده می شود. پلههای شبیهسازی ۴۰۰۰ مساوی با ۶/۱۹۴۸e<sup>-۱۲</sup> ضبط شده است. شبیه-سازی با کامپیوتر شخصی حدود ۴ ساعت طول کشیده است. شبیه-سازی تطابق بسیار خوبی در کیفیت عبور و رفتار پهنای نوار دارد که

در شکل ۴ به وضوح مشاهده می شود. قله های اضافی که در ناحیه ی 0/۲۵۵ - ۰/۲۶۶ ظاهر شدهاند، به واسطه برهمنهی امواج عبوری و انعکاسی در روی مرز خمیدگی میباشند که در مرز بلور انعکاس یافته-اند. مقدار اتلاف حدود ۴ dB برای اندازه گیری میـزان عبـور از مـوجبر خميده ۶۰° بلور فوتوني بهينه به دست آمده است. دقت الگوريتم داده شده در مرجع ۱۱ تائید شده است [۱۱].

شبیهسازی FDTD سه بعدی با استفاده از نرم افزار تجاری SEMCAD در فضای محاسباتی با ۲۵۶× ۲۰۲ ۲۲۲ سلول در شبکهی غیریکنواخت انجام شده است. به منظور به دست آوردن تعادل بین دقت شبیهسازی و منابع محاسباتی ده نقطه شبکه بر سلول واحد در نظر گرفته شده است. به منظور جفت شدن نور با موجبر بلور فوتونی، از موجبر مدلسازی شدہ بے عنوان تار نوری استفادہ مے-شود (شکل ۳). چندین آشکارساز شار توان در ابتدا و انتهای ساختار متصل شدهاند تا انتشار نور را ثبت کنند. لایههای PML شامل ۸ لایه با میزان انعکاس <sup>۶</sup>-۱۰ میباشند. محاسبات برای ۲۰۰ تناوب انجام یافته است که بر روی کلاستر حدود ۱۵ ساعت برای هر نقطهی بسامدی طول می کشد. این شبیه سازی برای این که کل بازه طول موجی را با دقت خوبی پوشش دهد، زمان بسیار زیادی نیاز دارد. پهنای نوار عبور در محدودهی ۰/۲۹ – ۰/۲۷ و قله مشخصه آن در بسامد حدود ۰/۲۵۴ می توان مشاهده کرد. میزان عبور کمتر نسبت به مدل دوبعدی واسطه پراکندگی میدان در بعد عمودی است. جابجایی کوچکی حدود ۲/۴ در بسامد قابل مشاهده است. این جابجایی بدین علت است که در شبیهسازی دوبعدی از ضریب گذردهی موثر و حفره-های نامعین استفاده شده است. در ساختار سه بعدی عمق حفرهها حدود m µm در نظر گرفته می شود، همان گونه که در ساختار واقعی در آزمایشگاه وجود دارد. توافق خوب بین شبیهسازی دو و سه بعدی ما را قانع میسازد تا از شبیهسازیهای دوبعدی برای مطالعات بنیادی ابزارهای بلور فوتونی دوبعدی استفاده شود. هنگامی توافق بهتـر اسـت که از مدلهای پدیدهای برای شبیهسازی دوبعدی استفاده شود تا اتلافها را به واسطه پراکندگی خارج از صفحه پوشش دهـد[۱۵و۱۵]. اگرچه مدل دوبعدی که برای بهینهسازی ساختار استفاده شده است، بسیار سریعتر از شبیهسازی کاملا سه بعدی است، ولی این شبیه-سازىها دقيقا ساختار واقعى را نشان نمىدهند. همچنين با توجه به روش FDTD بهبودیافته، میتوان از شبکهبندیهای درشتتر استفاده کرد که نیاز به منابع کامپیوتری کمتری دارد[۱۱].

### 8- نتىجەگىرى

در این مقاله، دادههای آزمایشگاهی با شبیهسازی روش FDTD دوبعدی بهبودیافته و روش FDTD سه بعدی استاندارد بـرای مـوجبر خميده <sup>6</sup> ۶۰<sup>°</sup> بلور فوتوني مقايسه شده است. روش FDTD دوبعدي بهبودیافته روشی ساده، کارا و سریع برای مدلسازی انتشار نور در محیط دیالکتریک با شکل اختیاری است. نتایج شبیهسازیهای ۲۱ مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران-سال دهم-شماره اول-بهار و تابستان ۱۳۹۲ ا

Journal of Iranian Association of Electrical and

Electronics

Engineers Vol10- No.1 Spring & Summer 2013

- [10] Mohammadi, A., Nadgaran, H. and Agio, M., "Contourpath effective permittivities for the two-dimensional finite-difference time-domain method," Opt. Express 13, 10367-10381, 2005.
- [11] Jalali, T., Rauscher, K., Mohammadi, A., Erni, D., Hafner, C., Baechtold, W., Shoushtari, M.Z., "Efficient effective permittivity treatment for the 2D-FDTD simulation of photonic crystals", J. Comput. Theor. Nanosci. 4(3), 644-648, 2007.
- [12] Taflove, A., Hagness, S., Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House, Norwood, MA 2005.
- [13] Rauscher, K., Erni, D., Smajic, J. and Hafner, C., "Improved transmission for 60° photonic crystal waveguide bends," Progr. in Electromagne. Research Symp. 43, 25-28, 2004.
- [14] Strasser, P., Stark, G., Robin, F., Erni, D., Rauscher, K., Wüest, R. and Jäckel, H., "Optimization of a 60° waveguide bend in InP-based 2D planar photonic crystals", J. Opt. Soc. Am. B, 25(1), 67-73, 2008.
- [1۵] تهمینه جلالی، " مدلسازی بره بلور فوتونیک سه بعدی با ثابت

[16] Ferrini, R., Houdre D. and Moosburger, J., "Radiation losses in planar photonic crystals: two-dimensional representation of hole depth and shape by an imaginary dielectric constant" Optical Socity of America, 20, 3, 469-478, 2003.

زيرنويسها

- <sup>1</sup> Finite Difference Time domain
- <sup>2</sup> Transverse Electric
- <sup>3</sup> Perfectly Matched Layer
- <sup>4</sup> Convolutional Perfectly Matched Layer
- <sup>5</sup> Scanning Electron Microscope

دوبعدی نشان داده است که زمان پردازش و حافظه مورد نیاز کاهش مییابد. موجبر خمیده <sup>۶۰</sup> بلور فوتونی بهینه با روش FDTD دو و سه بعدی شبیهسازی شده است که نتایج به دست آمده توافق بسیار خوبی را با دادههای آزمایشگاهی و یکدیگر نشان میدهد. با توجه به رفتار مشابه خمش عبور در هر دو روش شبیهسازی و این که محاسبات دوبعدی بسیار سریعتر است و قابل انجام بر روی کامپیوترهای شخصی میباشد، به نظر میرسد که شبیهسازی روش pTDT دوبعدی بهبودیافته برای طراحی و بهینهسازی ابزارهای بلور فوتونی بسیار مناسب است. همچنین این امکان را به کاربر میدهد که با کامپیوتر شخصی خود مدلسازی و محاسبات را انجام دهد.

#### سپاسگزاری

این کار با پشتیبانی معاونت پژوهشی دانشگاه خلیج فارس در قالب طرح پژوهشی با کد PGU/FS/20-1/1390/1298 انجام شده است. همچنین از همکاری دکتر ارنی و دکتر روشر برای دادههای آزمایشگاهی صمیمانه تشکر میکنیم.

#### مراجع

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.10- No.1 Spring & Summer 2013

 جوناپلوس، جان، مید، رابرت د.، وین، جوشا ن.، بلورهای فوتونیک قالبی برای شارش نور، ترجمهٔ زرگرشوشتری، مرتضی، جلالی، تهمینه، مؤسسه انتشارات دانشگاه شهید چمران ، ۱۳۸۶.

- [2] Manolatou, C., Johnson, S. G., Fan, S., Villenueve, P. R., Haus, H. A., Joannopoulos, J. D., "High-density integrated optics," J. Lightwave Technol., 17, 1682-1692, 1999.
- [3] Mekis, A., Chen, J. C., Kurland, I., Fan, S., Villeneuve, P. R., and Joannopoulos, J. D., "High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides," Phys. Rev. Lett, 77,3787-3790, 1996.
- [4] Schulz, S. A., O'Faolain, L., Beggs, D. M., White, T. P., Melloni, A. and Krauss, T. F., "Dispersion-engineered slow light in photonic crystals: A comparison," J. Opt. 12, 104004(10), 2010.
- [5] Hong-Wei, L. and Qiang, K., "Light Extraction Enhancement of GaN LED with a Two-Dimensional Photonic Crystal Slab," CHIN. PHYS. LETT, 28, 5, 054216(3), 2011.
- [6] Inoue M., Khanikaev A. B. and Baryshev A. V., "Nanomagnetophotonics,", Nanoscale magnetic materials and applications. Springer-Verlag, 2009.
- [7] Yang, P., Kattawar, W., Liou, K., Lu, J., Comparison of Cartesian grid configurations for application of the finitedifference time-domain method to electromagnetic scattering by dielectric particles", Appl. Opt., 43, 4611-4624, 2004.
- [8] Yu, W. an d R. Mittra, "On the modeling of periodic structures using the finite-difference time-domain algorithm," Microw. Opt. Technol. Lett., 24, 151–155, 2000.
- [9] Hajiaboli, A., Hojat-Kashani, F., "Simulation and Analysis of Inverted Patch Stacked Microstrip Antenna Using F.D.T.D. Method and Comparison with Moment Method", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, 1, 1,30-35, 2004.

جله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران-سال دهم-شماره اول-بهار و تابستان ۱۳۹۲ 🗕 ۲۲