

علمی-پژوهشی

## مدل سازی عددی گیت منطقی برگشت پذیر فاینمن تمام نوری بر مبنای اثرات غیرخطی گر در بلورهای فوتونی دوبعدی با ابعاد بسیار کم و کنتراست بالا

علی فرمانی<sup>۱\*</sup>، رضا بیرانوند<sup>۲</sup>

۱- استادیار، ۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه الکترونیک دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه لرستان

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵)

### چکیده

هدف از این طرح، پیشنهاد یک گیت منطقی فاینمن مبتنی بر بلورهای فوتونی دوبعدی با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی گر می باشد. این افزارها امکان طراحی پردازشگرهای با مصرف توان کم و سرعت بالا را فراهم می کنند. گیت منطقی پیشنهادی با در نظر گرفتن دو پارامتر شامل اثرات غیرخطی گر و ایجاد موج برهای همسان برای تناوب ساختار، طراحی شده است. طول موج کاری گیت منطقی پیشنهادی در محدوده ۱۵۵۰ نانومتر تنظیم شده است. دستیابی به ابعاد کوچک یکی از نکات مهم در طراحی گیت های منطقی نوری می باشد. در این رابطه، یکی از مزیت های ساختار پیشنهادی اندازه کوچک آن  $7.54 \times 8.55 \mu m^2$  است که به دلیل استفاده از سه موج بر ابعاد کاهش یافته است. زمان تأخیر گیت منطقی برابر با ۰/۲ ps به دست آمده است. نسبت کمینه توان نوری دریافت شده به توان ورودی در حالت یک منطقی برابر با ۰/۹۵ و نسبت بیشینه توان نوری به توان ورودی در حالت صفر منطقی ۰/۲ است. در نتیجه میزان نسبت تباین گیت منطقی طراحی شده برابر با ۸/۴ dB به دست آمده است.

**کلید واژه ها:** گیت منطقی فاینمن، بلورهای فوتونی، اثرات غیرخطی گر

### ۱. مقدمه

است و از هر خروجی فقط یک بار می توان استفاده کرد. ۳- تأخیر یک مدار برگشت پذیر، بیشترین تعداد گیت ها در یک مسیر از هر خط ورودی به هر خط خروجی است. در سال های اخیر، کریستال های فوتونی به دلیل سادگی و امکان کنترل سیگنال ورودی در طراحی گیت های منطقی مورد توجه بسیاری قرار گرفته اند. در این ساختارها برای هدایت نور در مسیرهای مشخص از موج برهای فوتونی استفاده می شود [۱]. اولین گام برای توسعه محاسبات بر اساس فوتون، طراحی و ایجاد دروازه های منطقی تمام نوری است. در همین زمینه، گیت های منطقی AND، OR، NOT، XOR و NAND مبتنی بر کریستال های فوتونی دوبعدی با استفاده از موج بر و رینگ رزنانور توسط گروه های تحقیقاتی پیشنهاد و بررسی شده اند [۲-۵]. ساختارهای مبتنی بر موج برهای فوتونی به محققان امکان طراحی افزارهایی با مقیاس کوچک را می دهند. چنین ساختارهایی امکان یکپارچه سازی در مدارهای نوری را فراهم می سازند. در تحلیل بلورهای فوتونی، از روش بسط امواج تخت (PWE) برای محاسبه ساختار نواری استفاده می شود [۶-۹]. در این روش با در نظر گرفتن شرایط اولیه

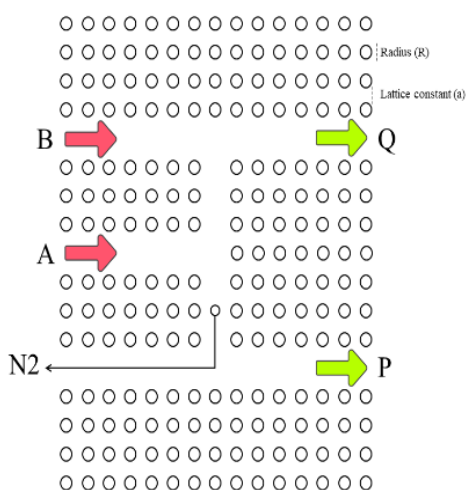
به صورت متداول، مدارهای دیجیتالی که در سامانه های الکترونیکی مورد استفاده قرار می گیرند از گیت های منطقی برگشت ناپذیر ساخته شده اند. به این معنی که در این مدارات از روی خروجی گیت منطقی، نمی توان ورودی آن را به طور منحصر به فرد تعیین کرد. از دستاوردهای محاسبات کوانتومی، طراحی گیت های منطقی برگشت پذیر است. هر گیت منطقی برگشت پذیر، یک واحد منطقی K ورودی و K خروجی است که در آن می توان به یک خروجی منحصر به فرد رسید و برعکس از روی هر بردار خروجی می توان بردار ورودی گیت منطقی را به صورت منحصر به فرد تعیین کرد. به عبارت دیگر یک تناظر یک به یک بین ورودی ها و خروجی های گیت برگشت پذیر برقرار است. ویژگی گیت های برگشت پذیر: ۱- خروجی بلا استفاده یک گیت برگشت پذیر به عنوان خروجی ناخواسته شناخته می شود. ۲- در منطق برگشت پذیر، تعداد خروجی هر گیت محدود شده

جدول (۱): جدول صحت گیت منطقی فاینمن

Input		Output	
A	B	P	Q
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0

### ۳. ساختار پیشنهادی

در این قسمت ابتدا ساختار پیشنهادی معرفی می‌گردد. شکل (۲) ساختار اصلی طرح پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی از میله‌های سیلیکونی بر بستر هوا استفاده شده است. مقادیر ضریب شکست سیلیکون و هوا به ترتیب ۳/۴۶ و ۱ است. نوع چینش طرح پیشنهادی به صورت مثلثی و همین‌طور ابعاد کلی طرح  $7,54 \times 8,55 \mu m^2$  است. ثابت شبکه (a) در ابتدا روی ۱۰۰۰ نانومتر تنظیم شده بود که طبق اصل مقیاس‌پذیری برای اینکه طول موج کاری روی ۱۵۵۰ نانومتر تنظیم شود ثابت شبکه به ۵۰۳ نانومتر تغییر داده شده است. شعاع میله‌های سیلیکونی (R) ۱۳۵ نانومتر است. ساختار دارای دو ورودی A و B و دو خروجی P و Q است. از یک نقص غیرخطی که با N2 نشان داده شده است و نوع ماده برای این نقص را چلکوجناید با ضریب شکست ۳/۱ و ضریب شکست غیرخطی  $10^{-20}$  و با شعاع ۹۹ نانومتر در نظر گرفته شده است. مواد چلکوجناید ترکیبات آمورف متشکل از سولفیدها، سلنیدها، تلوریدها هستند که با آرسناید و ژرمانیوم ترکیب می‌شوند. خاصیت غیرخطی این مواد بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر سیلیکا می‌باشد. بنابراین در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است.



شکل (۲): طرح پیشنهادی گیت منطقی برگشت‌پذیر

و مرزی معلوم، تحلیل‌ها صورت می‌گیرد.

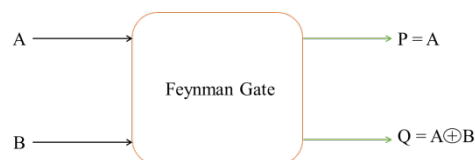
اولین ساختار پیشنهادی در مورد گیت فاینمن مربوط به L.E. Pedraza Caballero و همکاران بود [۸]. ساختار پیشنهادی میله‌های سیلیکونی بر بستر هوا است. نوع چینش میله‌های دی‌الکتریک را مثلثی، ثابت شبکه مورد نظر برای تمام میله‌ها ۸۷۵ نانومتر و شعاع تمام میله‌ها ۴۹۵ نانومتر در نظر گرفته شده است. ورودی A را ابتدا به صورت یک تقسیم‌کننده توان ایجاد کردند سپس ورودی B را در کنار یکی از شاخه‌های این تقسیم‌کننده‌ها ایجاد کردند. ابعاد طرح پیشنهادی آنها  $1134,65 \mu m^2$  است.

کارهای ارزشمند گروه‌های تحقیقاتی قبل دارای مزایای بسیار خوبی هست اما اخیراً ساختارهای گیت‌های منطقی برگشت‌پذیر از نظر ابعاد کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. بنابراین در این مقاله یک گیت منطقی برگشت‌پذیر با ابعاد کوچک و همچنین نرخ کنتراست بالا مبتنی بر بلور فوتونی پیشنهاد می‌شود.

در این مقاله، یک گیت منطقی تمام نوری فاینمن برگشت‌پذیر را بر اساس ساختار سیلیکونی پیشنهاد شده است. این افزاره با استفاده از موج‌بر فوتونی و همین‌طور چند موج‌بر طراحی شده است. در این طرح از اثر تداخل کر نیز استفاده شده است. برای مطالعه رفتار ساختار پیشنهادی از روش FDTD استفاده شده است.

### ۲. گیت منطقی فاینمن پیشنهادی

درگاه دو کیوبیتی گیت منطقی فاینمن یا NOT – controlled جمله مهم‌ترین درگاه‌های کنترلی و برگشت‌پذیر به شمار می‌رود. درگاه‌های کنترلی بر روی دو یا تعداد بیشتری کیوبیت اثر می‌کنند. در این درگاه‌ها کیوبیت‌های کنترل و هدف داریم. یک یا تعداد بیشتری کیوبیت می‌توانند کیوبیت کنترل باشند و با توجه به مقدار آنها، اعمالی روی کیوبیت‌های هدف انجام می‌شود. در کیوبیت فاینمن یک کیوبیت کنترل و یک کیوبیت هدف داریم. این گیت دارای دو ورودی A و B و دو خروجی P و Q است [۸]. بیت ورودی A در حقیقت بیت کنترلی است. از آنجا که عمل کپی کردن در منطق برگشت‌پذیر مجاز نیست می‌توان از گیت فاینمن برای تولید دوباره ورودی استفاده کرد. شکل (۱) بلوک دیاگرام گیت فاینمن را نشان می‌دهد. جدول (۱) جدول صحت گیت منطقی فاینمن را نشان می‌دهد.



شکل (۱): بلوک دیاگرام گیت منطقی فاینمن

ما از رابطه‌ای که در کتاب رابرت بوید (۱۲) بود استفاده کردیم:

$$\chi^3 = \frac{N_2 N_0^2 C}{12\pi^2} \quad (2)$$

در این رابطه که به‌عنوان پذیرفتاری ویژه غیرخطی شناخته می‌شود مقدار  $N_2$  ضریب شکست غیرخطی ماده مورد نظر است و  $N_0$  مقدار ضریب شکست خطی ماده مورد نظر و همچنین  $C$  مقدار سرعت نور در خلأ است.

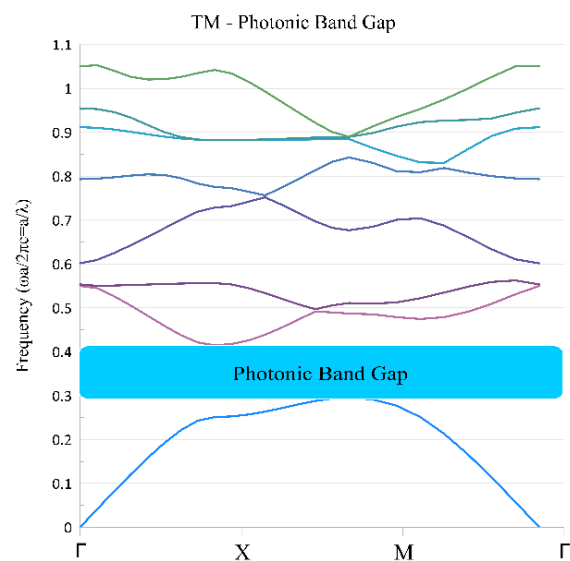
## ۵. روش محاسبات شبیه‌سازی

تفاضل محدود در حوزه زمان که به‌صورت خلاصه با نام FDTD شناخته می‌شود، یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های عددی است که در این کار از آن استفاده شده است. روش تفاضل محدود که برای محاسبه توزیع میدان داخل ساختار اپتیکی با ضریب شکست غیریکنواخت به کار می‌رود، اولین بار توسط یی در سال ۱۹۶۶ ارائه گشت. در این روش فضای پیوسته با مجموعه پیوسته از گره‌ها جایگزین می‌شود. مشتقات جزئی در معادلات ماکسول به‌وسیله تفاضل‌های محدود جایگزین می‌شود که یک سیستم از معادلات جبری که نسبت به مختصات خطی است ایجاد می‌شود و معادلات ماکسول مرحله به مرحله و با شروع از شرایط اولیه مرزی حل می‌شود. در هر حال به‌علت گسسته‌سازی فضای، مقداری بازتاب غیرفیزیکی از مرزهای ناحیه محاسباتی وجود دارد. برای شبیه‌سازی نامحدود بایستی از شرایط مرزی جذبی PML برای مرزهای خارجی شبکه استفاده کرد. در یک PML ایده‌آل هیچ موج بازتابیده‌ای باقی نمی‌ماند [۱۳].

## ۶. نتایج

در این بخش با در نظر گرفتن نکات بخش قبل، ارزیابی ساختار را انجام می‌دهیم. بعد از اتمام مراحل طراحی، شبیه‌سازی را با اعمال میدان نوری ورودی به ساختار انجام دادیم. روش FDTD برای محاسبه توزیع میدان در افزاره‌های مبتنی بر بلور فوتونی است. این روش مبتنی بر گسسته‌سازی فضای مکان به‌صورت یک در میان است [۱۴]. با این روش حل، می‌توان تمام ساختارهای پیچیده و نامتناوب را شبیه‌سازی کرد. همچنین می‌توان از آن برای محاسبه مدهای ویژه و به‌دست آوردن دیاگرام باند، نیز استفاده کرد. در این پژوهش از ابزار FullWAVE، برای بهره بردن از روش FDTD، استفاده شده است. با در نظر گرفتن تمام حالات گیت منطقی فاینمن، توزیع میدان و نمودارهای انتقالی به‌دست آمده است. شکل (۴) توزیع میدان الکتریکی در شرایط

ساختار باند، اصلی‌ترین و مهم‌ترین مشخصه یک بلور فوتونی است که در بلورهای فوتونی از نوع دی‌الکتریک‌های معمولی، پس از ساخت، ثابت بوده و قابل تغییر نیست. نرم‌افزار مورد استفاده نسخه تجاری Rsoft است. ساختار باند برای حالت TM در شکل (۳) به‌دست آمده است. ساختار باند محاسبه‌شده نشان می‌دهد که فاصله باند ممنوعه از  $0.414 < \frac{\omega}{\lambda} < 0.796$  واقع شده است. سپس منابع طول‌موج انتخابی باید در محدوده PBG باشند بنابراین، طول موج ۱۵۵۰ نانومتر برای این شبیه‌سازی انتخاب شده است.



شکل (۳): شکاف باند فوتونی طرح پیشنهادی

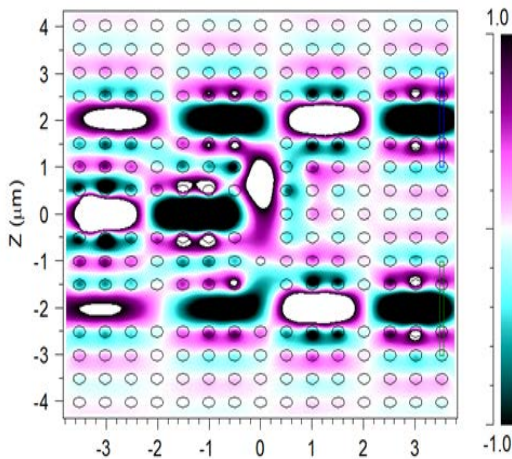
## ۴. اثرات غیر خطی

ضریب شکست بسیاری از مواد نوری وابسته به شدت میدانی است که درون آن ماده منتشر می‌شود. این ویژگی از خواص مهم مواد غیرخطی است که منشأ کاربردهای بسیاری می‌باشد. هرگاه شدت نوری که در محیطی انتشار می‌یابد بالا باشد آنگاه ضریب شکست به خاطر اعمال مرتبه سوم پذیرفتاری در قطبیدگی تغییر می‌کند. چنین تغییری در ضریب شکست باعث ایجاد اثرهای اپتیکی غیرخطی نظیر خود کانونی برای پرتوهای گوسی می‌باشد. این اثر تنها در نور با شدت بالا روی می‌دهد و تغییری که در ضریب شکست ایجاد می‌شود متناسب با شدت مکانی نور است [۹-۱۱]. این پدیده به اثر کر مشهور است. در این مواد رابطه ضریب شکست به‌صورت زیر می‌باشد:

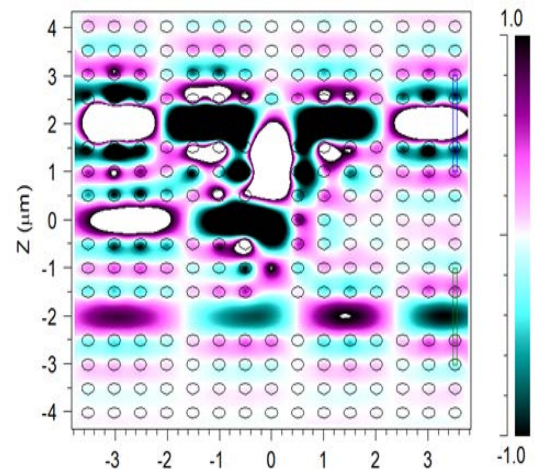
$$n(I) = n_0 + n_1 * I \quad (1)$$

ما برای این کار نیاز به مقدار پذیرفتاری ۳ داریم. برای این منظور

انتقال نور از ورودی کنترل را نشان می‌دهد.

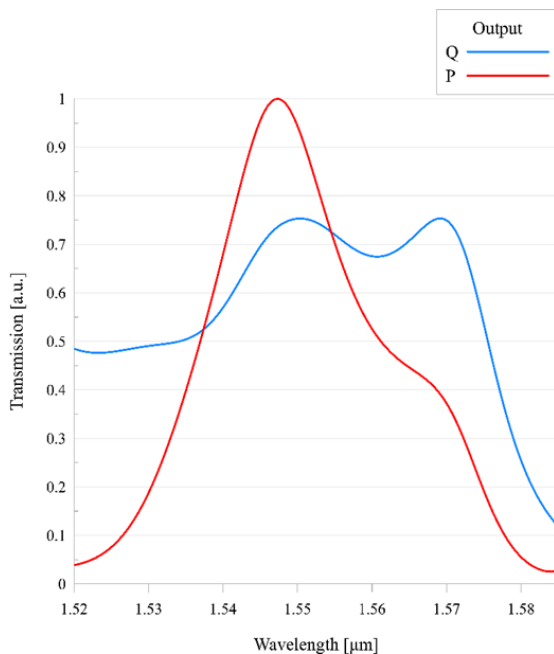


شکل (۶): توزیع میدان الکتریکی برای حالت A (۱)، B (۰)

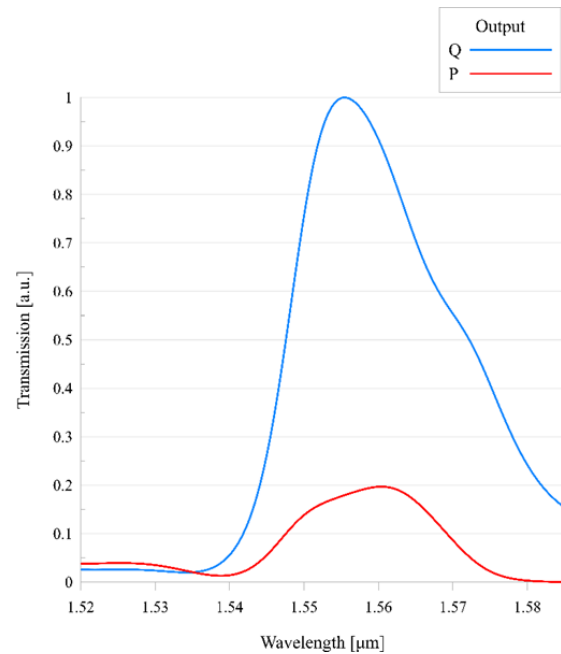


شکل (۴): توزیع میدان الکتریکی برای حالت A (۰)، B (۱)

در شکل (۵) نمودار انتقال برای این حالت به دست آمده است.



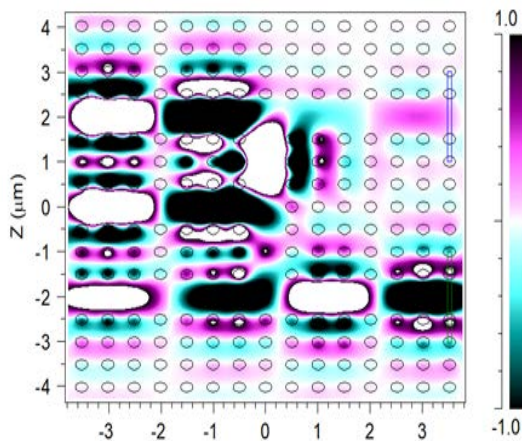
شکل (۷): طیف خروجی بر حسب طول موج برای حالت A (۱)، B (۰)



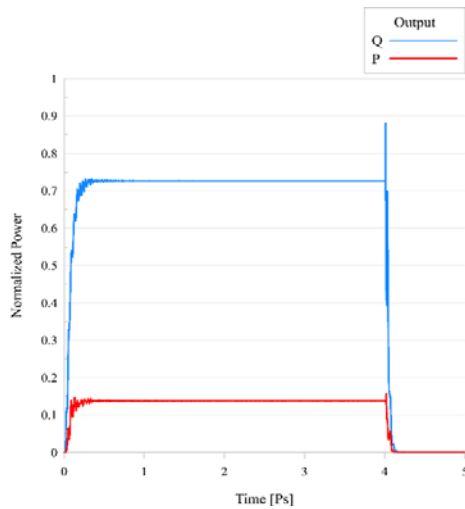
شکل (۵): طیف خروجی بر حسب طول موج برای حالت A (۰)، B (۱)

در شکل (۶)، حالت دوم منطبق بر جدول (۱) مورد بررسی قرار گرفته است و پروفایل میدان الکتریکی محاسبه شده است. همچنین برای این حالت نمودار انتقال توان در شکل (۷) به دست آمده است.

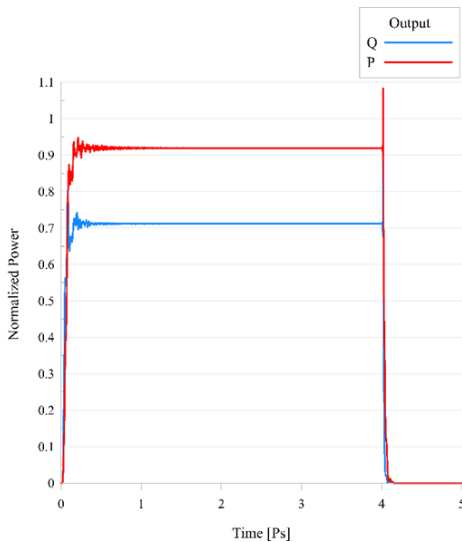
در نهایت جهت بررسی حالت منطقی ۱۱، با در نظر گرفتن پارامترهای اولیه ساختار و اعمال نور ورودی به هر دو پورت ورودی، میزان پروفایل منتشره مورد محاسبه قرار گرفته است. در شکل (۸) نتیجه این حالت فراهم شده است.



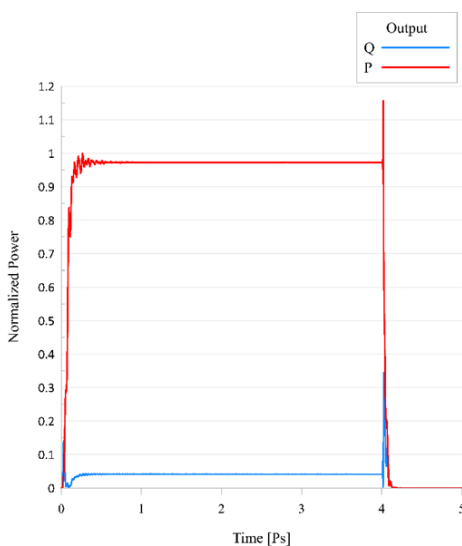
شکل (۸): توزیع میدان الکتریکی برای حالت A (۱)، B (۱)



شکل (۱۰): خروجی بر حسب زمان برای حالت (A)، (B) (۰)، (۱)

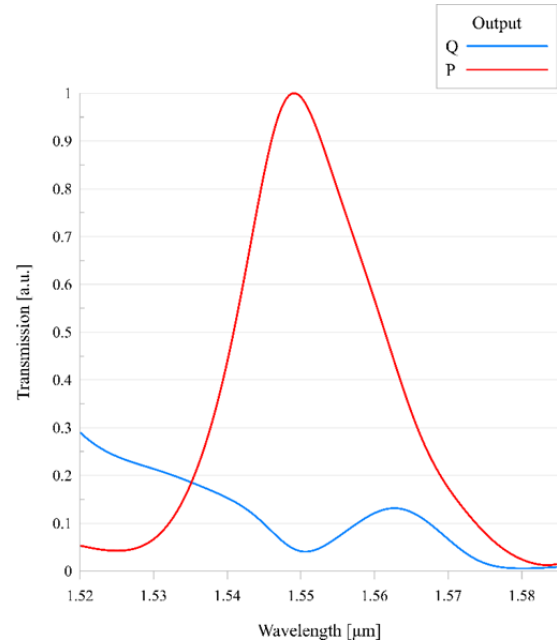


شکل (۱۱): خروجی بر حسب زمان برای حالت‌های (A)، (B) (۰)، (۱)



شکل (۱۲): خروجی بر حسب زمان برای (A)، (B) (۱)

جهت محاسبه میزان توان انتقالی نمودار توان مبتنی بر طول موج محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل (۹) دیده می‌شود، در حالت ۱، بیشینه توان انتقالی در حالت یک منطقی در حدود ۰٫۹۵ به دست آمده است. و همچنین در حالت صفر منطقی در حدود ۰٫۲ خواهد بود که نشان‌دهنده میزان نرخ تباین بالا خواهد بود.



شکل (۹): طیف خروجی بر حسب طول موج برای حالت (A)، (B) (۱)

### ۷. نتایج پاسخ زمانی

مطالعه روی پاسخ زمانی و سرعت ابزار یکی از معیارهای مورد استفاده برای ارزیابی رفتار وسیله نوری است. طول موج کاری، شعاع میله‌های دی‌الکتریک، شعاع نقص‌ها و همین‌طور ضریب شکست به‌طور مستقیم بر نرخ تباین تأثیرگذار است [۱۵]. نتایج شبیه‌سازی برای حالت‌های خیزش و افت گیت فاینمن نوری در شکل‌های (۱۰-۱۲) نشان داده شده است. عملکرد گیت را می‌توان با محاسبه نسبت تباین (CR)، که نسبت بین قدرت خروجی منطق "۱" و منطق "۰" که به‌عنوان عملکرد می‌باشد، مورد مطالعه قرار داد.

$$CR = 10 \log (P1/P0) \quad (۳)$$

همان‌طور که در نمودار شکل‌های (۱۰-۱۲) مشاهده می‌شود، میزان تأخیر در حالت‌های مختلف در محدوده پیکوثانیه و کمتر از ۱ پیکوثانیه می‌باشند. بنابراین انتظار داریم، مدل پیشنهادی برای سرعت‌های بالا مورد استفاده قرار گیرد.

## ۹. نتیجه گیری

در این طرح، یک گیت منطقی فایمن برگشت پذیر با ابعاد کوچک در محدوده طول موج مخابراتی پیشنهاد شد. ساختار پیشنهادی دارای ابعاد  $۷,۵۴ \times ۸,۵۵ \mu\text{m}^2$  است جهت ارزیابی مدل پیشنهادی پارامترهای پاسخ زمانی و همچنین نرخ تباین مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که زمان تأخیر گیت منطقی برابر با  $۰/۲ \text{ ps}$  است. نسبت کمینه توان نوری دریافت شده به توان ورودی در حالت یک منطقی برابر با  $۰/۹۵$  و نسبت بیشینه توان نوری به توان ورودی در حالت صفر منطقی  $۰/۲$  است. در نتیجه میزان نسبت تباین گیت منطقی طراحی شده برابر  $۸/۴ \text{ dB}$  به دست آمده است. همان طور که نتایج حل عددی نشان دادند، ساختار پیشنهادی می تواند جهت کاربردهای با سرعت بالا مورد استفاده قرار گیرد.

## ۱۰. مراجع

- [1] A. Mohebzadeh Bahabadi and S. Olyaei, "Design of an All-Optical AND Logic Gate based on Photonic Crystal with Small Dimensions Suitable for Integrated Optical Circuits," Journal of Applied Electromagnetic, vol. 1, pp. 53-59, 2018. (In Persian)
- [2] R. Cavin, P. Lugli, and Y. Zhirnov, "Science and engineering beyond Moore's law," Proceedings of the IEEE, vol. 100, no. Special Centennial Issue, pp. 1720-1749, May 2012.
- [3] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, N. Winn, and R. D. Meade, "Photonic Crystals: Molding the Flow of Light," P. U. Press, Ed. Princeton University Press, 2008.
- [4] A. Piccardi, A. Alberucci, U. Bortolozzo, S. Residori, and G. Assanto, "Soliton gating and switching in liquid crystal light valve," Applied Physics Letters, vol. 96, no. 7, p. 071104, 2010.
- [5] J. F. Tao, J. Wu, H. Cai, Q. X. Zhang, J. M. Tsai, J. T. Lin, and A. Q. Liu, "A nanomachined optical logic gate driven by gradient optical force," Applied Physics Letters, vol. 100, no. 11, 2012.
- [6] H. Soto, E. Diaz, J. Topomondzo, D. Erasme, L. Schares, and G. Guekos, "All-optical AND gate implementation using crosspolarization modulation in a semiconductor optical amplifier," Photonics Technology Letters, IEEE, vol. 14, no. 4, pp. 498-500, April 2002.
- [7] S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, "Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis," Opt. Express, vol. 8(3), pp. 173-190, 2001.
- [8] L. E. Pedraza Caballero, J. P. Vasco, P. S. S. Guimadies, and O. P. Vilela Neto, "All-Optical Majority and Feynman Gates in Photonic Crystals," IEEE 978-1-4673-7162-9/15, 2015.
- [9] P. Kumar Biswas, A. Newaz Bahar, M. D. Ahsan Habib, and M. D. Abdullah-Al-Shafi, "Efficient Design of Feynman and Toffoli Gate in Quantum dot Cellular Automata (QCA) with Energy Dissipation Analysis," Nanoscience and Nanotechnology, vol. 7(2), pp. 27-33, 2017.
- [10] Berenger, Jean-Pierre, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," Journal of computational physics, vol. 114.2, pp. 185-200, 1994.

طبق سه نمودار زمانی برای سه حالت ورودی، مقدار CR و همین طور زمان های خیزش و افت را در جدول (۲) به دست آمده است.

جدول (۲): جدول زمانی خیزش و افت و همین طور نسبت تباین طرح پیشنهادی

Input		Output			Time [Ps]	
A	B	P%	Q%	CR (dB)	tr	Tf
0	0	0 $\equiv$ "0"	0 $\equiv$ "0"	-	-	-
0	1	14 $\equiv$ "0"	73 $\equiv$ "1"	7.23	0.4	0.2
1	0	92 $\equiv$ "1"	71 $\equiv$ "1"	1.12	0.2	0.1
1	1	97 $\equiv$ "1"	4 $\equiv$ "0"	8.4	0.35	0.1

## ۸. مقایسه با طرح های مشابه

در این قسمت نتایج به دست آمده از طرح را با سایر پژوهش های پیشین مقایسه کرده و در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳): جدول مقایسه طرح پیشنهادی با سایر پژوهش ها

REF.	CR(dB)	Dimension	Non-linear	Output Power	
				high(1)	low(0)
[۱۶]	۶	$۱۱۳۴/۶۵ \mu\text{m}^2$	No	۴۰	۱۰
[۱۷]	۵	$۰/۶۳ \times ۲۳/۸ \text{ mm}^2$	No	۸۰	۸
[۱۸]	۶	$۱۲ \times ۱۰ \mu\text{m}^2$	No	۹۰	۲۲
[۱۹]	۷	$۱۱۵ \mu\text{m}^2$	Yes	۹۸	۱۶
[۲۰]	۸	$۱۰ \cdot \mu\text{m}^2$	Yes	۹۵	۱۲
[۲۱]	۲۰	$۱۳ \times ۱۰ \mu\text{m}^2$	Yes	۵۲	۰/۰۵
[۲۲]	۱۰	$۱ \mu\text{m}^2$	No	۸۰	۵
[۲۳]	۸	$۸/۸۵ \mu\text{m}^2$	Yes	۸۵	۲۰
This Work	۸/۴	$۸/۵۵ \times ۷/۵۴ \mu\text{m}^2$	Yes	۹۵	۲۰

- [18] M. M. Karkhanechi, F. Parandin, and A. Zahedi, "Design of an all optical half-adder based on 2D photonic crystals," *Photonic Network Communications*, vol. 33.2, pp. 159-165, 2017.
- [19] M. J. Maleki, A. Mir, and M. Soroosh, "Ultra-fast all-optical full-adder based on nonlinear photonic crystal resonant cavities," *Photonic Network Communications*, pp. 1-9, 2020.
- [20] M. Danaie and H. Kaatuzian, "Design and simulation of an all-optical photonic crystal AND gate using nonlinear Kerr effect," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 44.1, pp. 27-34, 2012.
- [21] Z. Mohebbi, N. Nozhat, and F. Emami, "High contrast all-optical logic gates based on 2D nonlinear photonic crystal," *Optics Communications*, vol. 355, pp. 130-136, 2015.
- [22] T. Sadeghi, et al., "Improving the performance of nanostructure multifunctional graphene plasmonic logic gates utilizing coupled-mode theory," *Applied Physics B*, vol. 125.10, pp. 1-12, 2019.
- [23] A. Farmani, A. Mir, and M. Irannejad, "2D-FDTD simulation of ultra-compact multifunctional logic gates with nonlinear photonic crystal," *JOSA B* 36.4, pp. 811-818, 2019.
- [11] F. Bohren Craig and R. Donald Huffman, "Absorption and scattering of light by small particles," John Wiley & Sons, 2008.
- [12] R. W. Boyd, *Nonlinear Optics* 3rd edn, Academic, 2008.
- [13] A. Taflove and M. E., Brodwin, "Numerical Solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using the Time-Dependent Maxwell's equations," *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, pp. 623-630, 1975.
- [14] A. Igor and A. Sukhoivanov, "Photonic crystals: Physics and Practical Modeling," *Springer Series in Optical Sciences*, vol. 152, pp. 41-65, 2009.
- [15] Y. Kane, "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, pp. 302-307, 1966.
- [16] R. Rajasekar, R. Latha, and S. Robinson, "Ultra-contrast ratio optical encoder using photonic crystal waveguide," *0167-577X*, 2019.
- [17] R. Sattibabu and G. Pranabendu, "Design of reversible optical Feynman gate using directional couplers," *Optical Engineering*, vol. 59.2, p. 027104, 2020.