

## شبیه‌سازی دریاچه‌های منطقی تمام نوری AND و NOT با استفاده از بلور فوتونی دو بعدی

مریم دشتی درویش‌زاده\*<sup>۱</sup>، ته‌مین جلالی<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور

۲. دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۳۰

## The Effect of External Magnetic Field on the Creation of Energy Levels Degeneracy in a Quantum Anti-Dot

M. Dashti Darvishzadeh\*<sup>1</sup>, T. Jalali<sup>2</sup>

1. Ph.D. Student, Physics, Payame Noor University

2. Associate Professor, Department of Physics, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

Received: 2020/08/31

Accepted: 2020/10/21

Original Article

مقاله پژوهشی

### Abstract

By designing periodic structures of photonic crystals, electromagnetic waves can be reflected in a certain frequency range from their surface. Using the above feature, the emission of photons can be guided in the designed waveguide within the structure of photon crystal networks. One of the most important applications of photonic crystals is in the construction of logic gates. Therefore, in this paper, using the simulation method based on the numerical method of finite difference in time domain, the propagation of electromagnetic waves inside two-dimensional engineered photonic crystals is investigated and the structure of band gap and distribution of electric and magnetic fields in the structure of photonic crystal lattice is calculated. The results show that using the unique structure of the designed photonic crystal, which has defects in the lattice, the performance of the AND and NOT logic gates can be well observed.

### Keywords

Photonic Crystals, Band Gap, Logic Gates, AND Gate, NOT Gate

### چکیده

با طراحی ساختارهای تناوبی بلورهای فوتونی، امواج الکترومغناطیسی را می‌توان در محدوده فرکانسی معینی از سطح آنها منعکس کرد. با استفاده از ویژگی فوق می‌توان امواج الکترومغناطیسی موجود در موجبر طراحی شده را در داخل ساختار شبکه بلوری فوتونی هدایت کرد. یکی از مهم‌ترین کاربردهای بلورهای فوتونی در ساخت دریاچه‌های منطقی است. بنابراین در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی، انتشار امواج الکترومغناطیسی در داخل بلورهای فوتونی دوبعدی بررسی شده و ساختار شکاف نواری و توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در ساختار شبکه بلوری فوتونی محاسبه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از ساختار منحصر به فرد بلور فوتونی طراحی شده که دارای نقص در شبکه است، می‌توان عملکرد دریاچه‌های منطقی AND و NOT را مشاهده کرد.

### واژه‌های کلیدی

بلورهای فوتونی، باند گپ، دریاچه منطقی AND، دریاچه منطقی NOT

## مقدمه

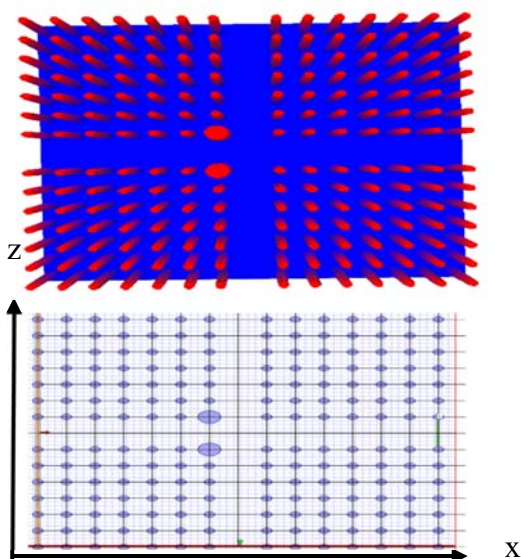
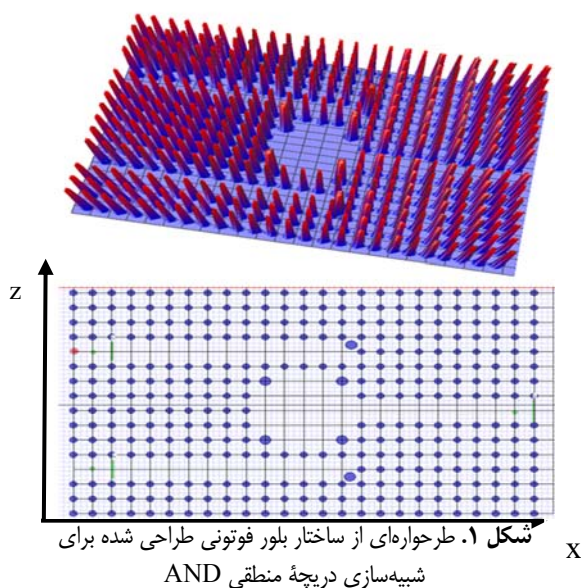
مهم‌ترین عنصر در دستگاه‌های پردازش داده فوق سریع [۱-۲] دریچه‌های منطقی تمام نوری هستند. تقویت کننده‌های نوری نیمه رسانا [۳]، موجبرهای دی الکتریک [۴-۶] و خودنواختی [۷-۹] می‌توانند برای طراحی دریچه‌های منطقی استفاده شوند. اما به دلیل سرعت کم و اندازه بزرگ، گزینه‌های مناسبی برای طراحی دریچه‌های منطقی نیستند. این دریچه‌ها به دلیل نقش مهمی که در پردازش نور دارند، بسیار مهم هستند [۱۰-۱۳]. به دلیل اندازه کوچک و ساختار ساده، دریچه‌های منطقی مبتنی بر بلورهای فوتونی مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند [۱۴-۱۵]. اثر متقارن دوره‌ای بر روی ساختارهای بلوری فوتونی باعث ایجاد شکاف باند فوتونی می‌شود. تابش با فرکانس‌هایی در محدوده باند نمی‌تواند در داخل ساختار منتشر شود. در نتیجه، بلورهای فوتونی می‌توانند انتشار امواج الکترومغناطیسی را به روشی قابل قبول از طریق این شکاف‌ها کنترل کنند [۱۶]. اولین تحقیق در مورد طراحی دریچه‌های منطقی با استفاده از بلورهای فوتونی بر اساس امواج تداخلی بود که در سال ۲۰۰۶ منتشر شد. این ساختار برای اجرای دریچه‌های منطقی و تمام نوری طراحی شده بود. لازم به ذکر است که حداقل مصرف برق برای این دریچه ۳۶۱ مگاوات گزارش شده است [۱۷]. طراحی دریچه منطقی و تمام نوری توسط شبکه بلوری فوتونی مثلثی دوبعدی نیز توسط رانی و همکاران در سال ۲۰۱۳ انجام شد [۱۸]. در این مقاله، دریچه‌های منطقی AND و NOT توسط بلورهای فوتونی بر اساس روش تفاضل زمانی محدود شبیه‌سازی شده‌اند تا به دریچه‌هایی با پهنای باند مناسب دست یابند و در نتیجه عملکرد این دریچه‌ها بهبود یابد.

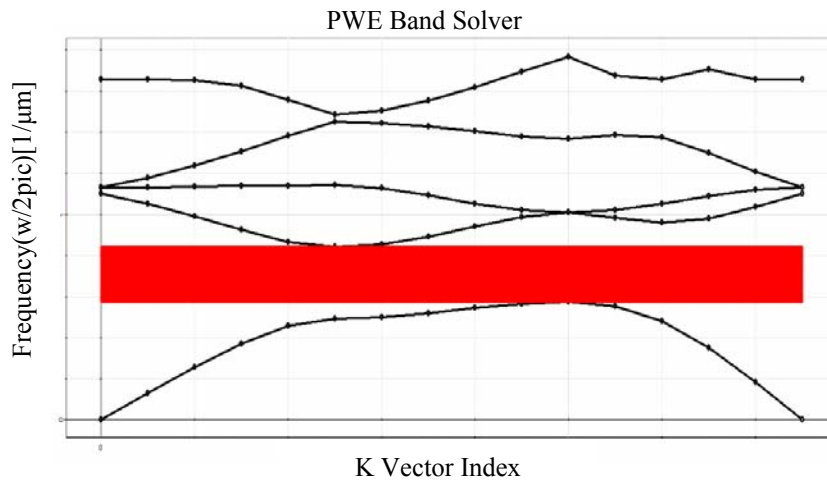
## روش تحقیق

یافتن پاسخ معادلات ماکسول همیشه چالشی برای محققان بوده است. تا اینکه در سال ۱۹۶۶ دانشمندی به نام بی توانست روش‌های محاسباتی را برای حل این معادلات در قلمرو زمان ارائه دهد [۱۹]. به منظور بررسی توزیع میدان الکتریکی ساختار بلوری فوتونی طراحی شده، از روش تفاضل محدود در حوزه زمان استفاده شده است [۲۰-۲۵]. دریچه‌های منطقی با استفاده از بلورهای فوتونی با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی OPTIWAIVE شبیه‌سازی شدند. شکل‌های ۱ و ۲ نموداری از ساختار بلور فوتونی را که برای شبیه‌سازی دریچه‌های منطقی استفاده می‌شود، نشان

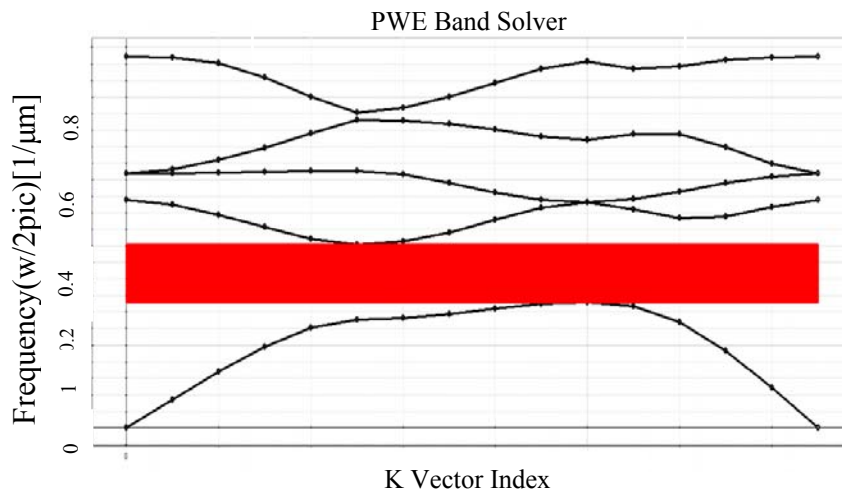
می‌دهند. در این شبیه‌سازی از یک شبکه مربعی برای بلور فوتونی دو بعدی استفاده شده است.

در شکل ۱ ابعاد شبکه ۱۳ در ۸ میکرومتر است که برای طراحی دریچه منطقی AND نقص‌هایی در ساختار ایجاد کرده و در برخی نقاط میله‌های پراکننده نور قرار داده شده است. دی الکتریک هوا است و از میله‌های سیلیکونی با ضریب شکست  $3/40$  استفاده شده است. طول موج اعمال شده ۱۵۵۰ نانومتر و تعداد میله‌ها در جهت  $x$ ، ۲۵ و در جهت  $z$ ، ۱۴ است. البته برخی از سطرها و ستون‌ها دارای نقص هستند.





شکل ۳. باند بلور فوتونی طراحی شده برای دریاچه منطقی AND در مد انتشاری TE



شکل ۴. باند بلور فوتونی طراحی شده برای دریاچه منطقی NOT در مد انتشاری TE

جدول ۱. عملکرد دریاچه منطقی AND

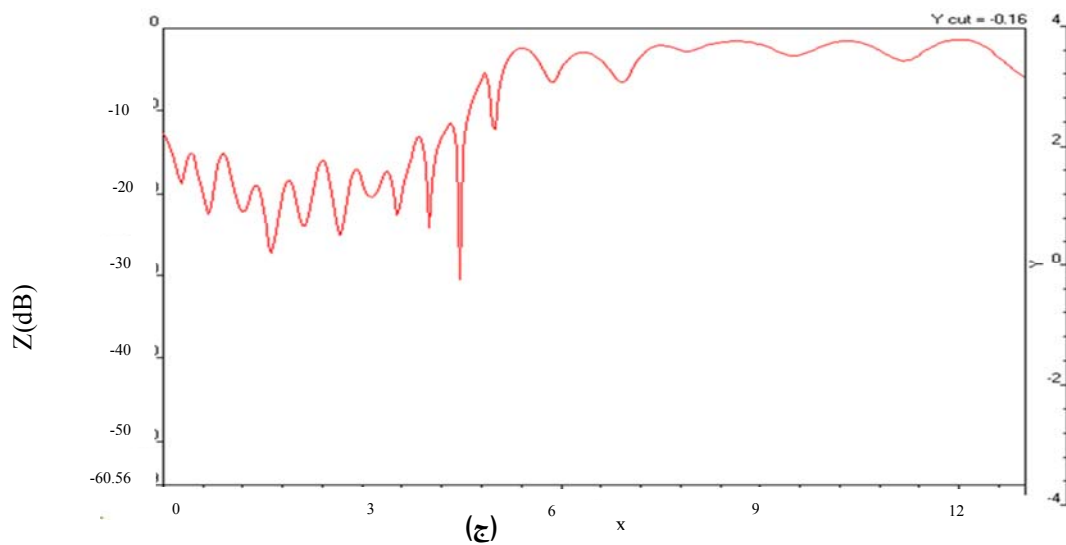
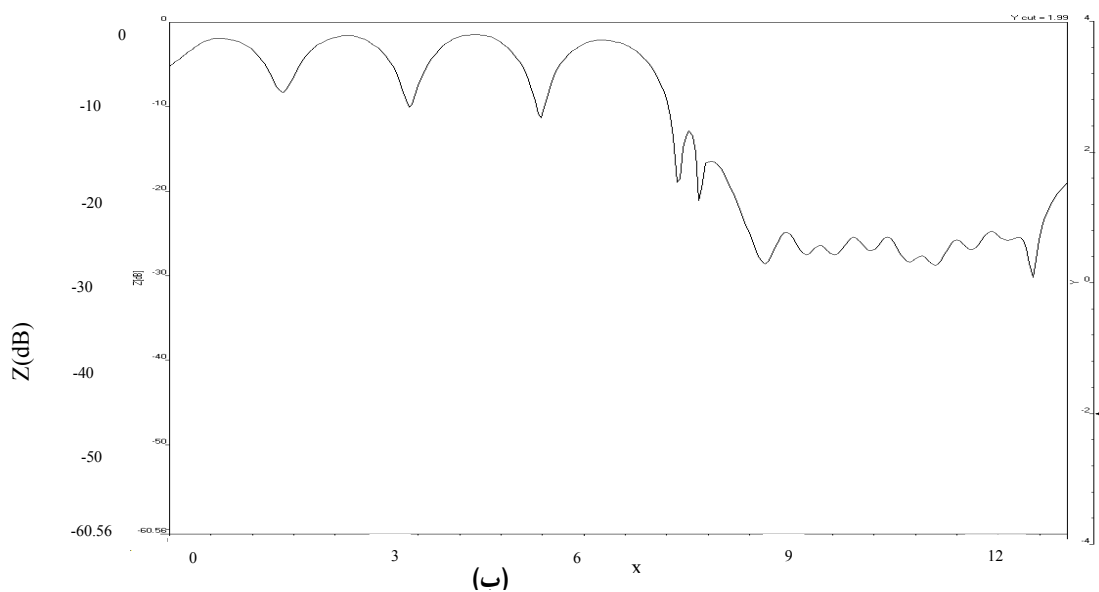
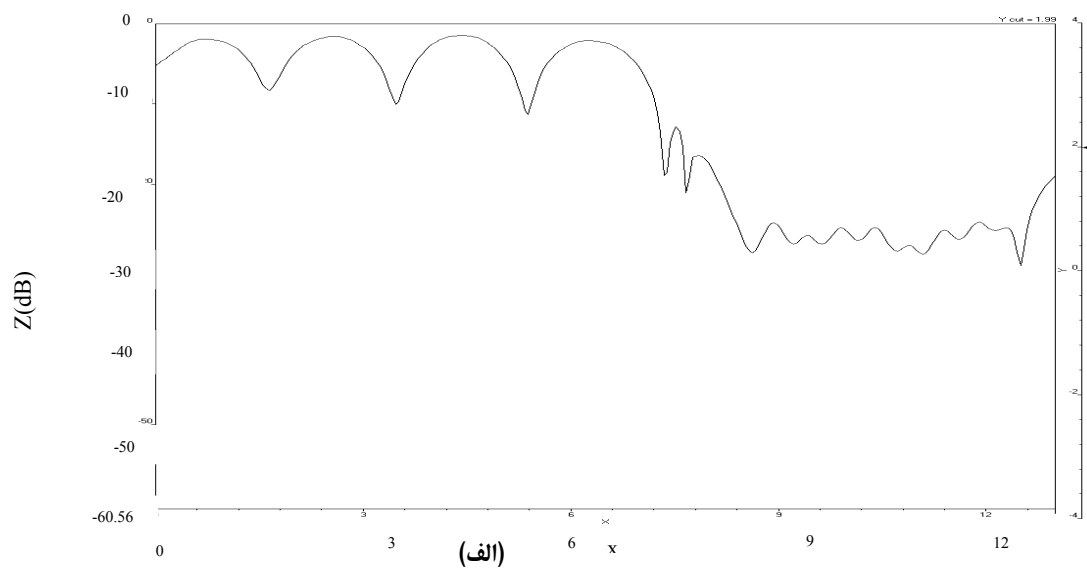
ورودی A	ورودی B	خروجی
۱	۰	۰
۰	۱	۰
۱	۱	۱

#### نتایج ساختار باند

ساختار باند بلور فوتونی طراحی شده برای دریاچه منطقی AND در مد انتشاری میدان الکتریکی عرضی در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود بلور فوتونی مورد نظر در مد انتشاری TE دارای یک شکاف باند از بسامد نرمالیزه  $0.574548$  تا  $0.840877$  است. همچنین با توجه به اینکه بسامد مرکزی نرمالیزه برابر  $0.6416$  بوده، مشخص است که مقدار بسامد مرکزی نرمالیزه نیز بین دو مقدار بسامد نرمالیزه محاسبه شده است.

لازم به ذکر است که بسیاری از ساختارهای مختلف برای طراحی این دریاچه‌ها مورد بررسی قرار گرفت و ساختار ارائه شده در این مقاله بهترین نتایج را یافته و بهترین عملکرد را از این دریاچه‌ها ارائه می‌دهد.

شکل ۲ همچنین ساختار بلور فوتونی طراحی شده برای شبیه‌سازی دریاچه منطقی NOT را نشان می‌دهد. در این حالت ابعاد شبکه ۱۵ در ۱۵ میکرومتر در نظر گرفته شده است. مانند قبل از میله‌های سیلیکونی استفاده شده و طول موج اعمال شده ۱۵۵۰ نانومتر است. تعداد میله‌ها بدون در نظر گرفتن نقص‌های شبکه در جهت x، ۱۵ و در جهت Z برابر با ۱۵ است.

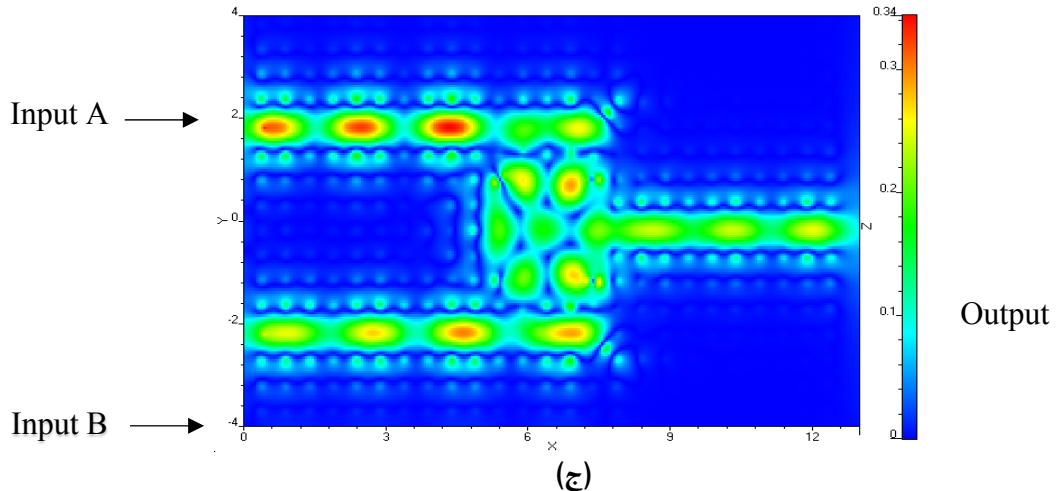
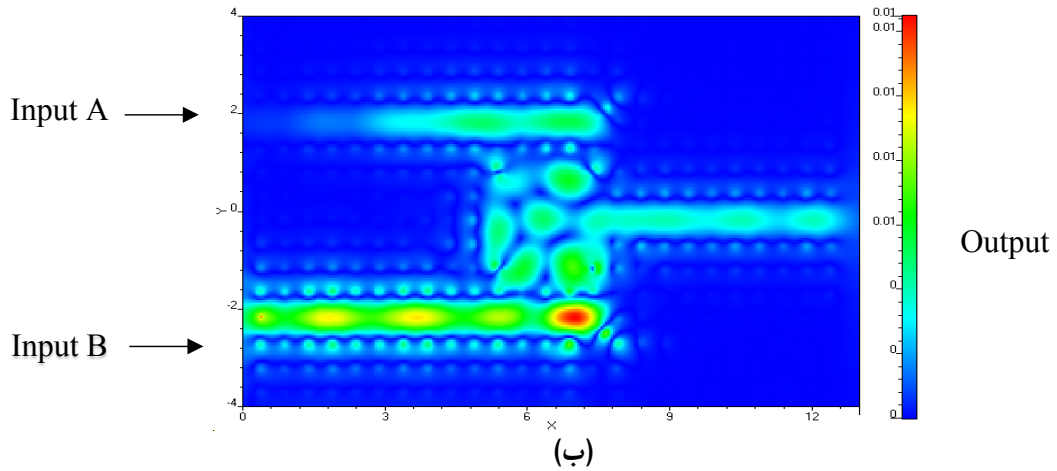
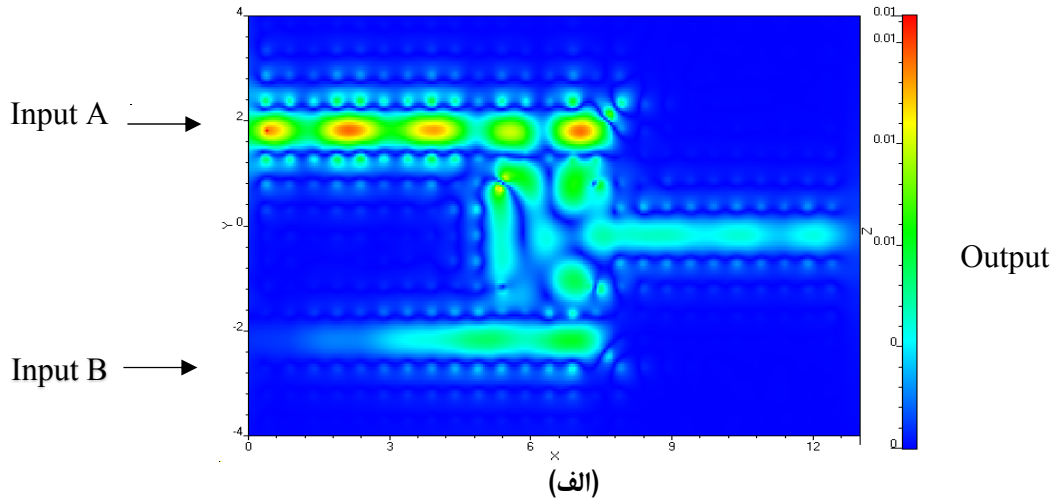


شکل ۵. نمودار تغییرات اتلاف میدان الکتریکی عرضی الف) وجود سیگنال در ورودی A و عدم وجود سیگنال در ورودی B، ب) وجود سیگنال در ورودی B و عدم وجود سیگنال در ورودی A، ج) وجود سیگنال در هر دو ورودی

پهنای شکاف باند در ساختار فوق برابر  $0.139968$  و بسامد مرکزی نرمالیزه هم در محدوده فوق قرار دارد.

**بررسی نتایج شبیه‌سازی دریچه منطقی AND**  
 مطابق شکل ۵، نمودار تغییرات تلفات میدان الکتریکی عرضی برای سه حالت ذکر شده در جدول ۱ نشان داده شده

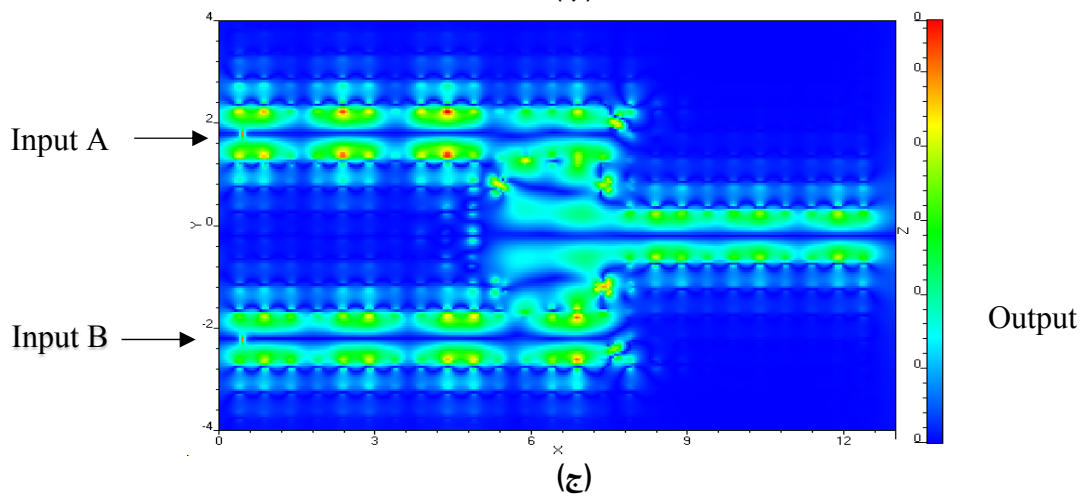
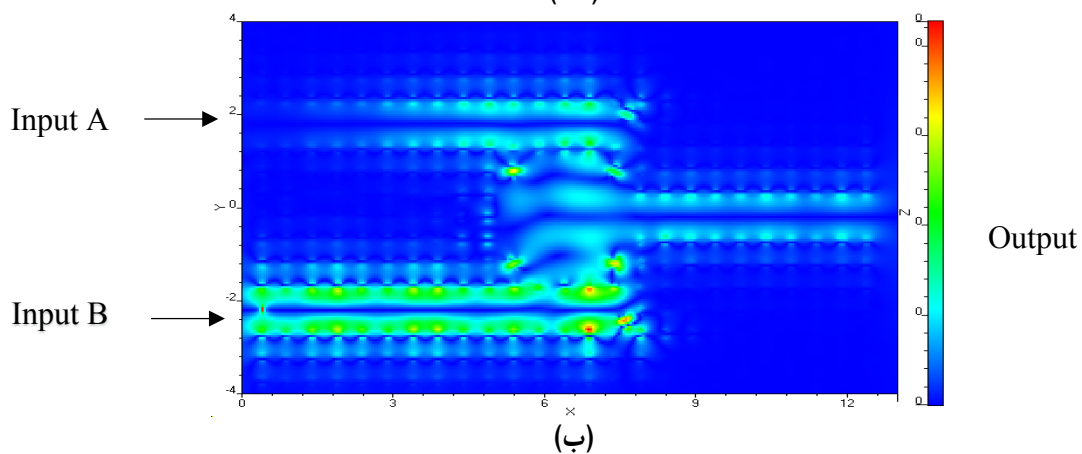
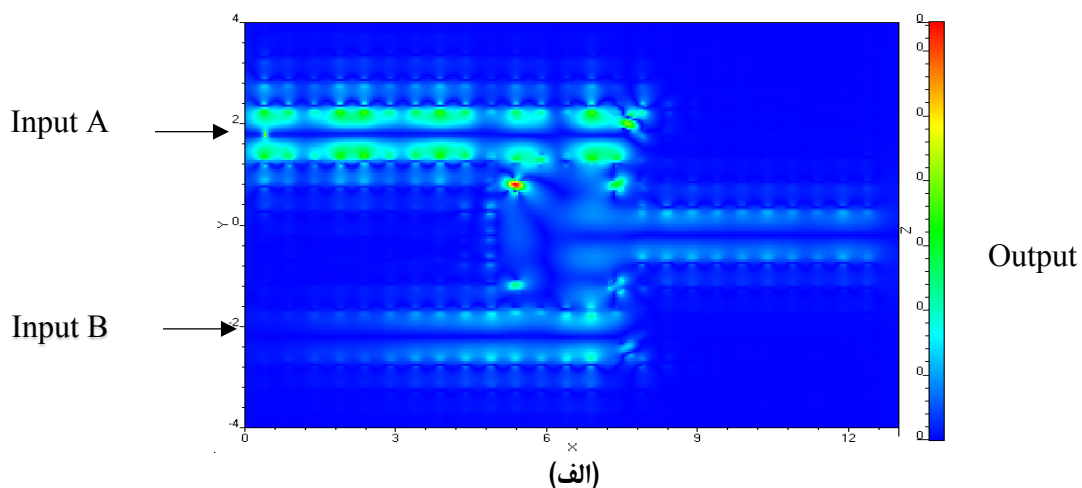
ساختار باند بلور فوتونی طراحی شده در مد انتشاری میدان الکتریکی عرضی برای دریچه منطقی NOT در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکاف باند مربوط به ساختار بلور فوتونی برای بررسی عملکرد دریچه NOT دیده می‌شود که در مد انتشاری TE دارای شکاف باند از بسامد نرمالیزه  $0.3957$  تا  $0.443925$  است. بنابراین



شکل ۶. توزیع میدان الکتریکی برای سه حالت، الف) سیگنال ورودی A، بدون سیگنال در خروجی، ب) سیگنال در ورودی B، بدون سیگنال در خروجی، ج) سیگنال در ورودی A و B و وجود سیگنال در خروجی

اساس ساختار طراحی شده با بلورهای فوتونی، اگر نور از ورودی A با طول موج ۱۵۵۰ نانومتر وارد شود و ورودی B سیگنال نوری وارد نشود، سیگنالی در خروجی وجود ندارد.

است. اگر یک تداخل سازنده، یعنی خروجی ۱ وجود داشته باشد، اختلاف فاز بین دو پرتو نور  $2k\pi$  است [۲۶-۲۸]. شکل ۶ همچنین نشان می‌دهد که در دریاچه منطقی بر



شکل ۷. توزیع میدان مغناطیسی  $H_z$  برای سه حالت، الف) سیگنال در ورودی A، عدم وجود سیگنال خروجی، ب) سیگنال در ورودی B، و عدم وجود سیگنال در خروجی، ج) سیگنال در ورودی A و B و وجود سیگنال در خروجی

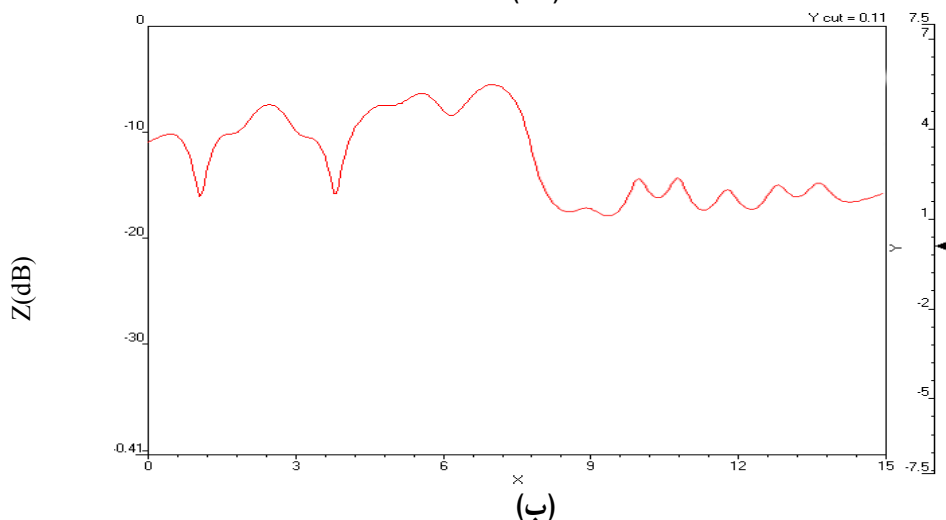
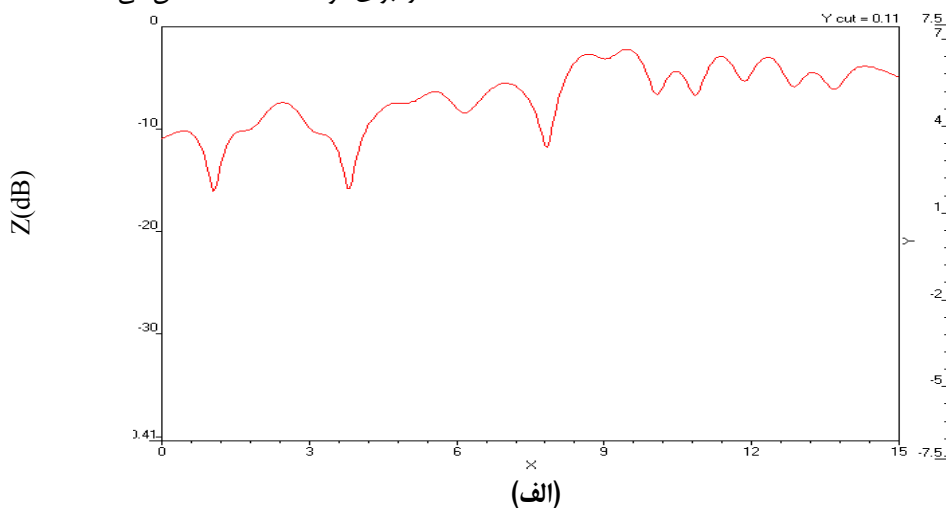
جدول ۲. عملکرد دریاچه منطقی NOT

ورودی A	منبع	خروجی
۰	۱	۱
۱	۱	۰

در حالت دوم وقتی سیگنالی در ورودی A وجود ندارد و فقط سیگنال در ورودی B وارد می شود، مشاهده می شود که در خروجی سیگنال نوری مشابه حالت قبل نداریم. با این حال، هنگامی که یک سیگنال نوری در هر دو ورودی A و B وارد می شود، مشاهده می شود که سیگنالی نیز در خروجی داریم که بیانی از مفهوم دریاچه منطقی AND است (جدول ۱). شکل ۷ نیز توزیع میدان الکتریکی  $H_z$  را در سه حالت مختلف نشان می دهد.

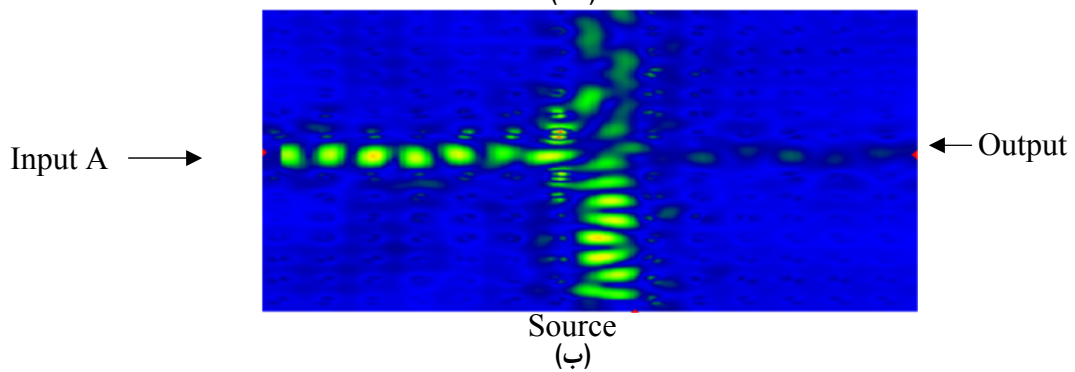
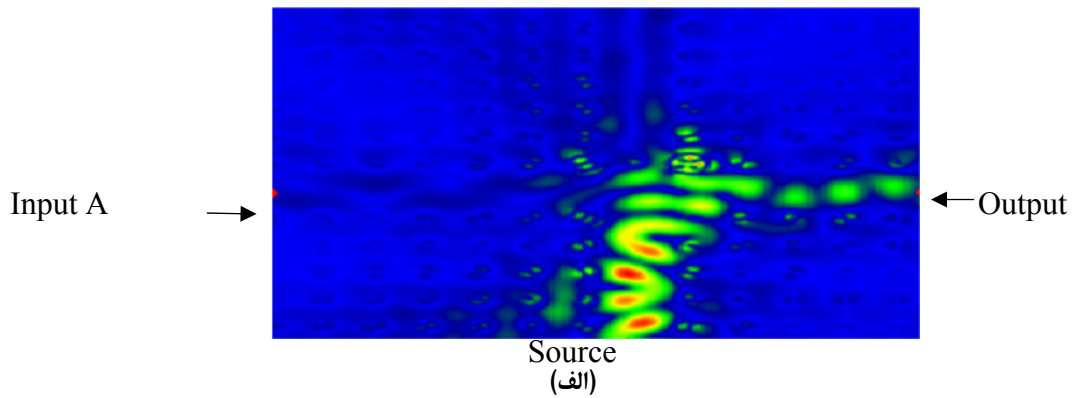
### نتایج شبیه سازی دریاچه منطقی NOT

شکل ۸ نموداری از تغییرات تلفات میدان الکتریکی عرضی را در دو مورد ذکر شده در جدول ۲ نشان می دهد. همان طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، اگر سیگنال نوری در ورودی A وجود نداشته باشد، با توجه به اینکه منبع همیشه در این دریاچه دارای سیگنال است، می توان آن را در خروجی سیگنال نوری مشاهده کرد. با این حال، هنگامی که یک سیگنال نوری در ورودی A وجود دارد، خروجی سیگنال نوری دیگر قابل مشاهده نیست. بنابراین می توان گفت که این طراحی ساختار بلور فوتونی به خوبی عملکرد دریاچه منطقی NOT را نشان می دهد. شکل ۹ و شکل ۱۰ به ترتیب توزیع میدان الکتریکی  $E_y$  و میدان مغناطیسی  $H_z$  را برای دو حالت مختلف نشان می دهند.

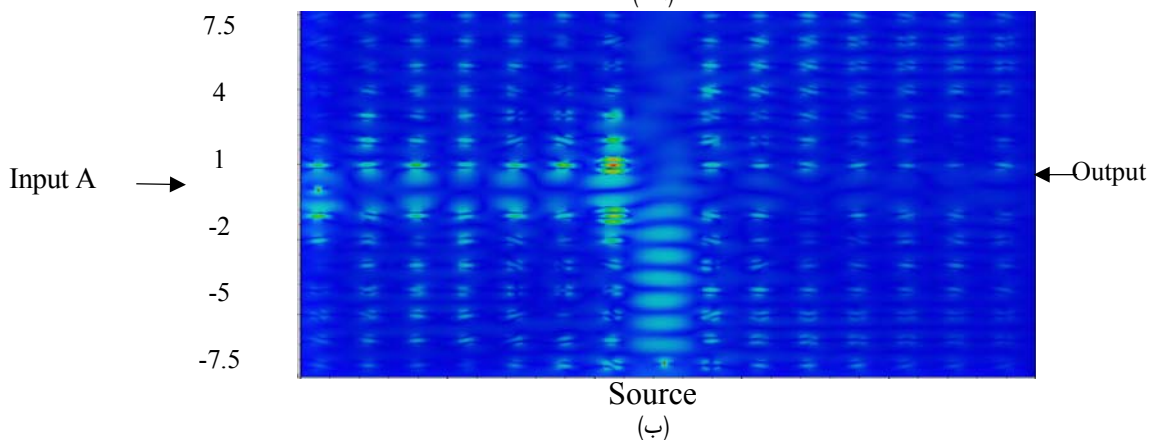
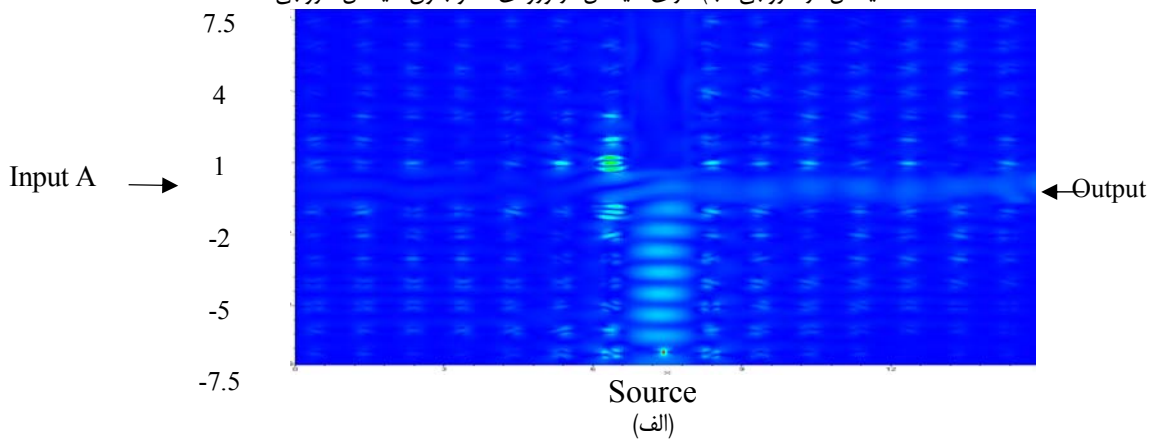


شکل ۸. نمودار تغییرات اتلاف میدان الکتریکی عرضی در الف) عدم انتشار موج الکترومغناطیسی در ورودی A و وجود سیگنال در خروجی، ب) انتشار موج الکترومغناطیسی در ورودی A و عدم وجود سیگنال





شکل ۹. نمودار توزیع میدان الکتریکی  $E_y$  برای دو حالت (سیگنال منبع در هر دو حالت برقرار است) (الف) بدون سیگنال در ورودی A و وجود سیگنال در خروجی، (ب) دارای سیگنال در ورودی A و بدون سیگنال خروجی



شکل ۱۰. نمودار توزیع میدان مغناطیسی  $H_z$  برای دو حالت (الف) بدون سیگنال در ورودی A و وجود سیگنال در خروجی، (ب) وجود سیگنال در ورودی A و عدم وجود سیگنال در خروجی.



## بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله دو ساختار منحصربه‌فرد بلور فوتونی با ایجاد برخی نقصان‌ها در شبکه متناوب نقطه‌ای، خطی و اضافه نمودن بلورهایی با مقاطع مختلف برای دستیابی به عملکرد دریچه‌های منطقی AND و NOT طراحی شدند. نمودار شکاف باند مربوط به ساختار بلور فوتونی برای دریچه منطقی AND در مد انتشاری TE یک شکاف باند نسبتاً بزرگی به پهنای  $0.266329 \lambda$  را نشان می‌دهد. ساختار شبکه‌ای بلور فوتونی طراحی شده برای دریچه AND به شکلی است که با ایجاد موجبری در داخل شبکه فوق، باعث گردیده که فوتون‌های منتشرشده در ورودی‌های A و B عملکرد دریچه منطقی AND را به خوبی نشان دهد. دلیل

استفاده از بلورهای فوتونی در طراحی دریچه‌های منطقی، ویژگی واپاشی غیرعادی بلورهای فوتونی است که باعث عدم انتشار نور در داخل شبکه و هدایت امواج نوری در مسیر موجبری طراحی شده است. نمودار شکاف باند مربوط به ساختار بلور فوتونی برای دریچه NOT نیز دارای مقدار مناسبی است که عملکرد این دریچه را بهبود می‌بخشد. دلیل اصلی بروز عملکرد صحیح دریچه‌های منطقی AND و NOT طراحی شده با بلورهای فوتونی، نقصان‌های ایجاد شده در ساختار شبکه‌ای بلور فوتونی است که باعث شکستن تقارن جابه‌جایی در آن می‌شود. این مسئله باعث می‌شود که هدایت امواج نوری در مسیرهای مشخص شده به خوبی انجام گیرد.

## References

- [1] J. Cirac, P. Zoller, "A scalable quantum computer with ions in an array of microtraps" *Nature* 404, 579–581 (2000)
- [2] K. Igarashi, K. Kikuchi. "Topics Quantum Electron. Optical signal processing by phase modulation and subsequent spectral filtering aiming at applications to ultrafast optical communication systems", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 14, no. 3, pp. 551-565, May-june 2008
- [3] H. Soto, et al, "All-optical AND gate implementation using crosspolarization modulation in a semiconductor optical amplifier", *IEEE Photonics Technol. Lett.* 14(4), 498–500 (2002)
- [4] H. Wei, et al, "Quantum dot-based local field imaging reveals plasmon-based interferometric logic in silver nanowire networks", *NanoLett.* 11(2), 471–475 (2011)
- [5] Y. Fu, et al, "All-optical logic gates based on nanoscale plasmonic slot waveguides", *Nano Lett.* 12(11), 5784–5790 (2012)
- [6] D. Pan, H. Wei and H. Xu, "Optical interferometric logic gates based on metal slot waveguide network realizing whole fundamental logic operations", *Opt. Express.* 21(8), 9556–9562 (2013)
- [7] H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. Tamamura, T. Sato, S. Kawakami, "Self-collimating phenomena in photonic crystals", *Appl. Phys. Lett.* 74(9), 1212-1214 (1999)
- [8] J. Witzens, M. Lončar, and A. Scherer. "Self-collimation in planar photonic crystals", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 8(6), 1246-1257 (2002)
- [9] X. Yu, S. Fan, Appl. Phys. Lett. "Bends and splitters for self-collimated beams in photonic crystals", A. Scherer, *IEEE J. Sel. Top.* 83(16), 3251-3253 (2003)
- [10] W. Fraga, J. Menezes, M. Silva, C. Sobrinho, "All optical logic gates based on an asymmetric nonlinear directional coupler", A. Sombra, *Optics Communications.* 262(1), 32-37 (2006)
- [11] A. Rostami, G. Rostami, "Full optical analog to digital (A/D) converter based on Kerr-like nonlinear ring resonator", *Optics Communications.* 228, 39-48 (2003)
- [12] K. Igarashi, K. Kikuchi, "Optical Signal Processing by Phase Modulation and Subsequent Spectral Filtering Aiming at Applications to Ultrafast Optical Communication Systems", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics.* 14(3), 551-565 (2008)

- [13] Y. Wu, T. Shih, M. Chen, "New all-optical logic gates based on the local nonlinear Mach-Zehnder interferometer", *Optical Express*. 16(1), 248-257 (2008)
- [14] A. Mohebzadeh-Bahabady, S Olyaei, "All-optical NOT and XOR logic gates using photonic crystal nano-resonator and based on an interference effect", *IET Optoelectron*. 12(4), 191-195 (2018)
- [15] F. Parandin, M.R. Malmir, M. Naseri, A. Zahedi, "Reconfigurable all-optical NOT, XOR, and NOR logic gates based on two dimensional photonic crystals", *Superlattices Microstruct*. 113, 737-744 (2018)
- [16] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics", *Phys. Rev. Lett*. 58(20), 2059-2062 (1987)
- [17] Z. Zhu, W. Ye, J. Ji, X. Yuan, C. Zen, "High-contrast light-by-light switching and AND gate based on nonlinear photonic crystals", *Opt. Express*. 14(5), 1783-1788 (2006)
- [18] P. Rani, Y. Kalra, R. Sinha, "Commun. Realization of AND gate in Y shaped photonic crystal waveguide", *Opt*. 298, 227-231 (2013)
- [19] S. Zivanovic, K. Yee, K. Mei, "A sub-gridding method for the time-domain finite-difference method to solve Maxwell's equations", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 39(3), 471-479 (1991)
- [20] A. Taflov, S. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3<sup>rd</sup> edn. (Artech, Norwood, 2005)
- [21] K. Kunz, R. Luebbers, *The Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetics*, 1<sup>st</sup> edn. (CRC Press, Boca Raton, 1993)
- [22] D.M. Sullivan, *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method*, 2<sup>nd</sup> edn. (Wiley-IEEE Press, New York 2000)
- [23] A. Elsherbeni, V. Demir, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics: With MATLAB Simulations*, 2<sup>nd</sup> edn. (SciTech, Raleigh, NC 2009)
- [24] W. Yu, R. Mittra, T. Su, Y. Liu, X. Yang, *Parallel Finite-Difference Time-Domain Method*, 1<sup>st</sup> edn. (Artech House, Norwood, 2006)
- [25] A. Oskooi, D. Roundy, M. Ibanescu, P. Bermel, J. Joannopoulos, S. Johnson, "Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method", *Computer Phys. Commun*. 181(3), 687 (2010)
- [26] P. Andalib, N. Granpayeh, "All-optical ultracompact photonic crystal AND gate based on nonlinear ring resonators", *J. Opt. Soc. Am B*. 26(1), 10-16 (2009)
- [27] M.I. Babak, A.T. Tahereh, G. Nosrat, M.J. Alireza, "All-optical NOR gate based on nonlinear photonic crystal microring resonators", *J. Opt. Soc. Am B*. 26(5), 1097-1102 (2009)
- [28] S.Q. Zeng, Y. Zhang, B.J. Li, E.Y.B. Pun, "Ultrasmall optical logic gates based on silicon periodic dielectric waveguides," *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. 8(1), 32-37 (2010)