

طراحی و شبیه سازی لایه محافظ بدنه هواپیما در مقابل سلاح های لیزری با استفاده از ساختارهای کریستال فوتونیک

فرصاد حیدری*^۱، فریبرز پرندین^۲

۱-دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی سنج، سنندج، ایران.

۲- استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

چکیده

استفاده از تکنولوژی های جدید در جنگهای الکترونیکی امری اجتناب ناپذیر است. یکی از سلاح های جدید در این زمینه لیزرها هستند. سلاح های لیزری با هدایت پرتو لیزر و تمرکز آن بر روی هدف باعث تخریب آن می شود. لیزر به معنی تقویت نور به روش گسیل القایی تابش است. در این تحقیق سعی شده است تا با بهره گیری از ویژگی های ساختارهای کریستال فوتونیک و اتصال آن به بدنه جنگنده های هوایی توان تخریبی این دسته از سلاح ها به حداقل میزان خود برسد. به دلیل خاصیت شکاف باند فوتونی کریستال های فوتونیک و ایجاد چندین موج بر در میله های عایق، نور فرودی لیزر منحرف شده و به درون موج برها هدایت شده و نور لیزر کمترین برخورد را با بدنه هواپیما دارد. ساختار از شبکه های شش وجهی ساخته شده است که کمترین میزان نشت نور از موج بر را دارد. ویژگی مهم دیگر ساختار پیشنهادی این است که تمام میله های دی الکتریک دارای شعاع یکسان هستند که این موجب آسان تر شدن طراحی و پیاده سازی می شود.

واژه های کلیدی: کریستال فوتونی، موج بر نوری، شکاف باند فوتونیک، سلاح لیزری

Design and simulation of the protective layer of the fuselage against laser weapons using photonic crystal structures

Abstract

The use of new technologies in electronic warfare is inevitable. One of the new weapons in this field are lasers. Laser weapons destroy a target by directing a laser beam and aiming it at the target. Laser means light amplification by the method of inductive emission of radiation. In this paper, it has been tried to use the features of photonic crystal structures and connect it to the body of air fighters to reduce the destructive power of these weapons to its minimum level. Due to the property of the photonic band gap of photonic crystals and the creation of several waveguides in the dielectric rods, the incident light of the laser is deflected and directed into the waveguides, and the laser light has the least collision with the fuselage. The structure is made of hexagonal lattice, which has the lowest amount of light leakage from the waveguide. Another important feature of the proposed structure is that all the dielectric rods have the same radius, which makes the design and implementation easier.

Key words: Photonic crystal, Optical wave, Photonic band gap, Laser weapon

ایمیل نویسنده مسئول: farsad.heidari@gmail.com

۱- مقدمه

در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده خاصیت کریستال فوتونی، ساختاری پیشنهاد شود تا امواج نوری لیزری برخوردی به بدنه پهپادها یا جنگنده‌ها دارای کمترین مقدار توان نوری خود باشند و کمترین آسیب را به بدنه این دسته از جنگنده‌ها بزنند. در این تحقیق به بررسی ساختارهای کریستال فوتونی به عنوان یک لایه محافظ تعبیه شده بر روی بدنه هواپیما‌ها بررسی شده است. با تکرار ساختار طراحی شده در این مقاله بر روی کل بدنه هواپیما نور فرودی سلاح‌های لیزری در موج برها هدایت شده و مانع از نفوذ و برخورد نور به بدنه اصلی شده و باعث انحراف آن می‌شود. این ساختار به دلیل دارای بودن شبکه‌ها شش وجهی بهترین خاصیت در هدایت نور در موج برها را دارا بوده و دارای کمترین نشتی نور است.

۲- کریستال فوتونی

کریستال‌های فوتونیک یک تکنولوژی نوظهور برای طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های تمام نوری است. هرچند که کمتر از چند دهه از عمر کریستال‌های فوتونیک می‌گذرد، اما پیشرفت بسیار سریع تحقیقات و تحولات علمی در این زمینه، این ساختارهای جدید را جهت طراحی و ساخت انواع افزاره‌های منطقی نوری، فیلترها، سوئیچ‌ها، موج برها، حسگرها و سایر افزاره‌های اپتیکی بسیار محبوب کرده است. با توجه به قابلیت‌های کریستال فوتونیک می‌توان بسیاری از افزاره‌های الکترونیکی که امروزه مورد استفاده قرار گرفته‌اند را بر اساس این ساختارها پیاده‌سازی کرد. ضریب شکست ساختار کریستال فوتونی به صورت متناوب در حال تغییر است [۴-۷]. این ساختارها طوری طراحی شده‌اند که حرکت فوتون‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند و در واقع دوگان بلورهای نیمه رسانا هستند. اساس کار کریستال‌های فوتونی تغییر درونی ضریب شکست به صورت کم و زیاد در داخل کریستال است. سایر ساختارهای مرتبط با نور دارای تحدید نوری بوده ولی کریستال‌های فوتونی تحدید نوری بیشتری داشته و این کار را در تمام جهات ساختار انجام می‌دهد. هنگامی که نور در ساختار متناوب منتشر می‌شود، در هر تقابل با ماده دی‌الکتریک بازتاب می‌شود. در نتیجه تداخل بازتاب کلی در طول موج مشخصی به وقوع می‌پیوندد. نور با طول موج مشخصی نمی‌تواند از داخل ماده عبور نماید و از آن خارج شود. این طول موج یا فرکانس ممنوعه شکاف باند فوتونی نام دارد که پایه عملکرد کریستال‌های است. شکاف باند نوری شامل فرکانس‌هایی است که به ازای آنها امواج الکترومغناطیسی مجاز به انتشار در کریستال نیستند. کریستال‌های فوتونی به سه دسته یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی تقسیم می‌شود. ساده‌ترین ساختار ممکن کریستال

واژه لیزر به معنی تقویت نور به روش گسیل القایی تابش است. این ابزار نور را به صورت پرتوهای موازی بسیار باریکی که طول موج مشخصی دارد ساطع می‌کند. عملکرد لیزر به گونه‌ای است که با تابش یک فوتون به یک ذره، برانگیخته شده و سپس باعث آزاد سازی فوتون دیگری شده، که این دو فوتون با هم، هم فرکانس هستند [۱]. اگر این روند ادامه پیدا کند شمار فوتون‌ها افزایش یافته و می‌تواند باعث ایجاد باریکه‌ای از فوتون‌ها شود. امروزه جنگ‌ها با سرعت فراوانی به سمت مدرن شدن می‌روند و یکی از تجهیزات استفاده شده در این زمینه لیزرها هستند. در میدان نبرد مدرن از لیزرها به عنوان تخمین دهنده مسافت، هدف گیری و هدف یابی استفاده می‌شود. اما امروزه از لیزر جهت تخریب اهداف از دور استفاده می‌شود که به آن‌ها سلاح لیزری می‌گویند. سلاح لیزری یک نوع جنگ افزار نوری است که با هدایت پرتو لیزر و تمرکز آن بر روی هدف باعث تخریب هدف مورد نظر می‌شود (شکل ۱) را ببینید). سلاح لیزری توانایی نابودی موشک‌ها، پهپادها و گلوله‌های توپ و خمپاره‌های در حال پرواز را دارند. هم‌اکنون از سلاح‌های لیزری در کاربردهای هوابرد نیز استفاده می‌شود. همچنین از این سلاح برای نابودی ماهواره‌ها نیز پیشنهاد شده است. به طور کلی از لحاظ نحوه تولید پرتو لیزر این سلاح‌ها را می‌توان به سه دسته کلی: لیزرهای حالت جامد، لیزرهای شیمیایی و لیزرهای الکترون آزاد دسته بندی کرد. در لیزرهای شیمیایی پرتو نور با بهره گیری از واکنش‌های شیمیایی تولید می‌شوند و طول موج‌های کوتاه پالس‌های پر انرژی را تولید می‌کنند. اما لیزرهای حالت جامد دارای انرژی کمتری نسبت به لیزرهای شیمیایی داشته و از پمپاژ نوری یک محیط کریستالی و شیشه‌ای به وجود می‌آیند. پرتو لیزر در لیزرهای الکترون آزاد در طول موج‌های مختلف که قابل تغییر است و قادر به هماهنگی با شرایط محیطی است. این دسته از لیزرها از الکترونیسته استفاده می‌کنند [۲-۳].



شکل ۱- استفاده از لیزر در اهداف هوایی

$$\nabla \times H(x, z, t) = \partial_t D(x, z, t) \quad (۸)$$

$$H_x^p = (m, n) = H_x(m\Delta x, n\Delta y, p\Delta t) \quad (۹)$$

$$H_z^p = (m, n) = H_z(m\Delta x, n\Delta y, p\Delta t) \quad (۱۰)$$

با اعمال اختلاف مرکزی به معادلات (۱)-(۲) محاسبه صورت می گیرد. در این حالت، شاخص های اعداد صحیح m ، n و p به ترتیب به x ، y و t متصل می شوند. معادلات به روز رسانی FDTD مربوطه به شرح زیر است:

$$E_y^{p+1} = (m, n) = E_y^p(m, n) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_y(m, n)\Delta z} \left[H_x^{p+\frac{1}{2}}(m, n) - H_x^{p+\frac{1}{2}}(m, n-1) \right] - \frac{\Delta t}{\varepsilon_y(m, n)\Delta x} \left[H_z^{p+\frac{1}{2}}(m, n) - H_z^{p+\frac{1}{2}}(m-1, n) \right] \quad (۱۱)$$

$$H_x^{p+\frac{1}{2}} = H_x^{p-\frac{1}{2}}(m, n) + \frac{\Delta t}{\mu_x(m, n)\Delta z} [E_y^p(m, p+1) - E_y^p(m, n)] \quad (۱۲)$$

$$H_z^{p+\frac{1}{2}} = H_z^{p-\frac{1}{2}}(m, n) + \frac{\Delta t}{\mu_z(m, n)\Delta x} [E_y^p(m+1, p) - E_y^p(m, n)] \quad (۱۳)$$

۴- ساختار پیشنهادی کریستال فوتونی

برای طراحی ساختار نوری پیشنهادی ابتدا باید بررسی شود که ساختار اولیه که هنوز فاقد است، برای چه طول موج هایی مناسب است. بدین منظور ساختار اولیه شامل میله هایی دی الکتریک با ضریب شکست ۳٫۵۱ در هوا با ضریب شکست ۱ تعبیه شده اند. تعداد میله ها در راستای X برابر با ۳۰ و در راستای Y برابر با ۳۰ میله در نظر گرفته شده است. محور این میله ها موازی با راستای Z است. ثابت شبکه (a) برای ساختار پیشنهادی $a=600$ nm و شعاع میله ها برابر با $r=130$ nm انتخاب شده است. برای این ساختار محاسبات ساختار باند انجام شده و نتایج به دست آمده یک باند ممنوعه فوتونیک (PBG) را نشان می دهد. در شکل ۲ ساختار باند ممنوعه ساختار را می توان مشاهده کرد.

فوتونی شامل لایه های متناوب مواد با ضریب عایق متناوب است که ضریب شکست آن ها تنها در یک جهت تغییر می کند اما در جهت های دیگر همگن است. اما کریستال های فوتونی دو بعدی در دو محور خود متناوب بوده و در راستای محور سوم همگن است. کریستال های فوتونی سه بعدی در طول سه محور متناوب بوده و می توانند مشخصه های اصلی کریستال فوتونی مانند، شکاف باند نوری، مودهای نقصو حالت های سطحی را داشته باشد [۱۱-۸].

۳- فرمول بندی مساله

معادلات ماکسول باید با مفروضات یک محیط ایزوتروپ، غیر مغناطیسی و بدون بار حل شود تا انتشار امواج EM در یک محیط تناوبی دوبعدی بررسی شود [۱۷-۱۲].

$$D(x, z, t) = \varepsilon_0 \varepsilon_r(x, z) E(x, z, t) \quad (۱)$$

$$B(x, z, t) = \mu_0 H(x, z, t) \quad (۲)$$

در معادله بالا ε_r گذردهی نسبی مواد، ε_0 و μ_0 به ترتیب نفوذپذیری و گذردهی فضای آزاد هستند.

$$\Delta \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + j_e \quad (۳)$$

$$\Delta \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} - j_m \quad (۴)$$

در معادله بالا، E و H به ترتیب شدت میدان الکتریکی و مغناطیسی هستند، علاوه بر این، D و B به ترتیب چگالی شار الکتریکی و مغناطیسی هستند. همچنین j_e منبع جریان الکتریکی و j_m منبع جریان الکترومغناطیسی است. در زیر دو فرمول کرل برای امواج هارمونیک در حال حرکت با فرکانس ω آورده شده است:

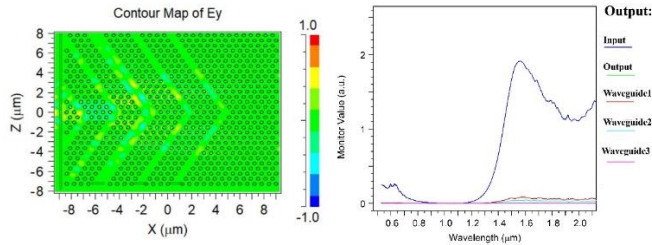
$$\nabla \times E(x, z) = i\omega\mu_0 H(x, z) \quad (۵)$$

$$\nabla \times H(x, z) = -i\omega\varepsilon_0\varepsilon_r(x, z)E(x, z) \quad (۶)$$

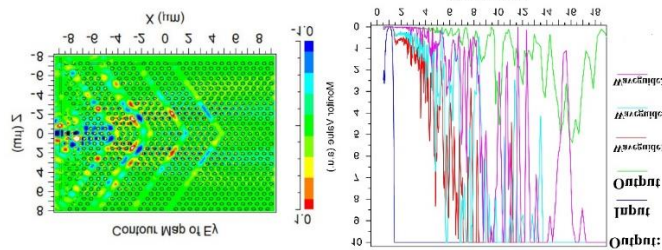
روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) را می توان برای تعیین میدان های الکترومغناطیسی درون بلورهای فوتونی استفاده کرد. این روش از معادله به روز رسانی FDTD برای محاسبه میدان الکترومغناطیسی درون کریستال فوتونی در هر لحظه از زمان با استفاده از مقادیر گذشته و فعلی میدان استفاده می کند. معادله ماکسول بدون منبع معادلات به روز رسانی FDTD در حوزه زمان به صورت زیر است:

$$\nabla \times E(x, z, t) = \partial_t B(z, z, t) \quad (۷)$$

مشاهده کرد. در شکل ۴ نور خروجی کمترین مقدار خود را دارد و در شکل ۱۰ نور خروجی توان نوری نزدیک به ورودی را دارد.

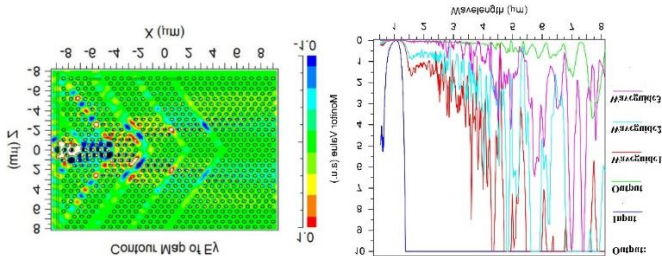


شکل ۴- خروجی ساختار در توان نوری ۱ وات بر میکرومتر مربع



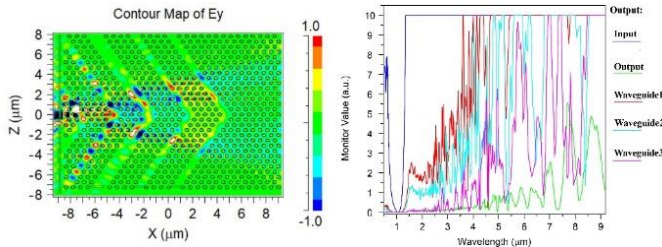
شکل ۵- خروجی ساختار در توان نوری ۱۰ وات بر

میکرومتر مربع



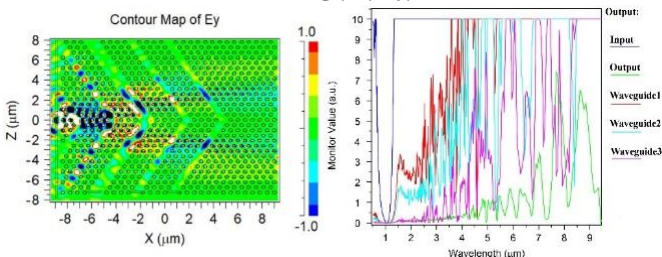
شکل ۶- خروجی ساختار در توان نوری ۲۰ وات بر

میکرومتر مربع



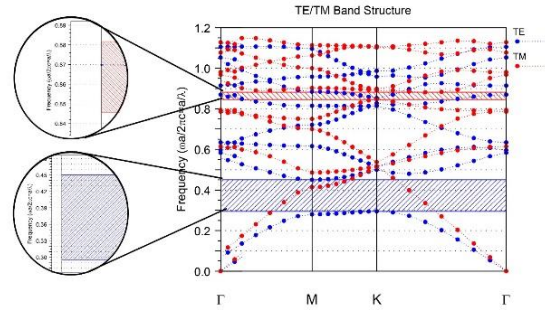
شکل ۷- خروجی ساختار در توان نوری ۳۰ وات بر

میکرومتر مربع



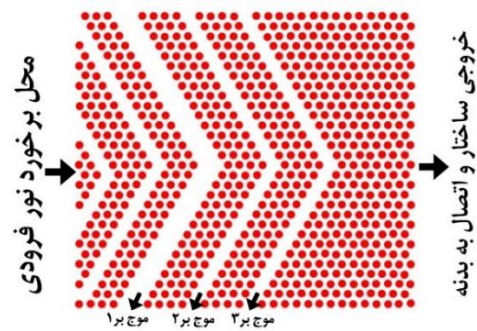
شکل ۸- خروجی ساختار در توان نوری ۴۰ وات بر

میکرومتر مربع



شکل ۲- باند ممنوعه فوتونیک ساختار

همان طور که قبلا اشاره شد، این ساختار از میله های عایق در هوا تشکیل شده است. در ساختار طراحی شده چندین موجبر نوری کریستال فوتونیک جهت منحرف کردن نور ساطع شده به ساختار و دور کردن آن از بدنه اصلی پهپادها یا جنگنده ها استفاده شده است. این موجبرها با حذف چندین میله عایق به وجود آمده اند. هنگام برخورد نور به ساختار ابتدا نور وارد موجبرهای انحرافی اول شده و هرچه توان نوری افزایش پیدا کند به موج برهای بعدی نفوذ کرده و مجددا نور ورودی منحرف می شود. در این ساختار سعی شده تا نور ورودی به هنگام برخورد، کمترین آسیب را به بدنه اصلی پهپادها یا جنگنده ها بزند. در شکل ۳ می توان ساختار طراحی شده را مشاهده کرد.



شکل ۳- ساختار پیشنهادی برای موجبرها

لیزر پرتوی نوری شدید، باریک و تک رنگ بوده و هرچه شدت مواجهه و برخورد بیشتر باشد اثرات تخریبی آن نیز بیشتر خواهد بود. گسیل اثر تابشی لیزر به صورت موج پیوسته (CW)، پالسی و ضربانی مکرر است. در ادامه به بررسی ساختار در نور ورودی حالت موج پیوسته (CW) پرداخته می شود. ساختار در توان های نوری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل های ۴ تا ۱۰ می توان شدت صعودی از ۱ تا ۶۰ وات بر میکرومتر مربع را به ترتیب

می کنند و مانع رسیدن نور زیادی به خروجی می شوند و نوری کمی به بدنه اصلی پهنپاها و جنگنده ها خواهد رسید.

۵- نتیجه گیری

کریستال های فوتونی ساختارهای متناوبی هستند که از مواد عایق ساخته شده اند. یعنی ضریب شکست ساختار کریستال فوتونی به صورت متناوب تغییر می کند. یکی از ویژگی های این ساختار تحدید نوری بیشتر نسبت به سایر ساختارهای نوری است. در این تحقیق سعی شده است تا از این ویژگی بهره گرفته و ساختاری محافظ گونه برای بدنه جنگنده های هوایی و پهنپاها طراحی و شبیه سازی شود. ساختار کریستال فوتونی در این طرح پیشنهادی که شامل موجبرهای نوری است، به گونه ای طراحی شده است تا به هنگام برخورد نور فرودی سلاح های لیزری، پس از برخورد با ساختار کریستال فوتونی، در موج برها هدایت شده و از شدت نور لیزر کاسته شده و نهایتا مسیر آن در جهت خروجی موج برها منحرف شده و از ساختار خارج شود. این امر سبب می شود تا نور لیزر با کمترین مقدار به بدنه اصلی پهنپادهای و جنگنده ها برخورد کرده که هیچ خسارت مادی در بر نخواهد داشت. همچنین نتایج نشان می دهد که با افزایش شدت توان نور ورودی تا ۶۰ وات تنها ۰,۰۶ وات به خروجی منتقل خواهد شد.

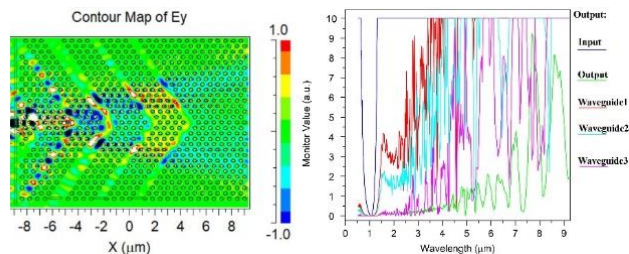
۶- مراجع

[۱] مدرس مصلی، سید محمد مهدی، پورحیدری، غلامرضا، نجفی، امیرحسین، «سلاح های لیزری شناخت، تشخیص، درمان و پیشگیری آسیب های ناشی از آن»، طب نظامی، شماره ۵، صص ۱۳۴-۱۲۷، ۱۳۸۲.

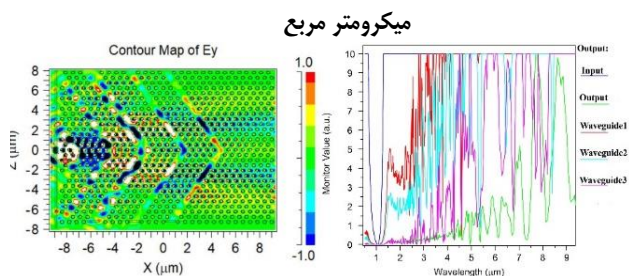
[2] S. Wang, Y. Tian, B. Qu, Z. Zhu, Y. Hui, H. Lei, Q. L, " High slope efficiency 3 μm Er:YAG cyclic cascade pulsed lasers, " *Optics & Laser Technology*, pp. 108868, 2023.

[3] T. Dai, J. Fan, J. Wu, Y. Wu, Y. Zhang, "High-efficiency ultrasound generation excited by an annular distributed Ho:YAG laser with 2.09 μm in carbon fiber reinforced plastics," *Optics & Laser Technology*, vol. 158, pp. 108757, February 2023.

[4] J. Joannopoulos D. Johnson, J. N. Winn, R. D. Meade, "Photonic crystal molding the flaw of light," *New Jersey: Prinrceton University Press*, 2007.



شکل ۹- خروجی ساختار در توان نوری ۵۰ وات بر



شکل ۱۰- خروجی ساختار در توان نوری ۶۰ وات بر

میکرومتر مربع

در جدول ۱ می توان ورودی و خروجی اصلی و همچنین خروجی موجبرهای ساختار را مشاهده کرد.

جدول ۱- بررسی خروجی ساختار

| طول موج (μm) | شدت نور ورودی ($\frac{W}{\mu\text{m}^2}$) | شدت نور خروجی ($\frac{W}{\mu\text{m}^2}$) | شدت نور موج بر ۱ ($\frac{W}{\mu\text{m}^2}$) | شدت نور موج بر ۲ ($\frac{W}{\mu\text{m}^2}$) | شدت نور موج بر ۳ ($\frac{W}{\mu\text{m}^2}$) |
|---------------------------|---|---|--|--|--|
| ۱-۲ | ۱ | ۰ | ۰,۰۲ | ۰,۰۴ | ۰ |
| ۱-۲ | ۱۰ | ۰ | ۰,۸ | ۰,۵ | ۰,۰۳ |
| ۱-۲ | ۲۰ | ۰ | ۱,۶ | ۱ | ۰,۰۳ |
| ۱-۲ | ۳۰ | ۰,۰۳ | ۲,۵ | ۱,۵ | ۰,۰۴ |
| ۱-۲ | ۴۰ | ۰,۰۵ | ۳,۴ | ۱,۸ | ۰,۰۵ |
| ۱-۲ | ۵۰ | ۰,۰۶ | ۴,۱ | ۲,۲ | ۰,۰۶ |
| ۱-۲ | ۶۰ | ۰,۰۶ | ۵ | ۲,۷ | ۰,۰۷ |

همانطور که در جدول بالا قابل مشاهده است، ساختار در توان های نوری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله اول شدت توان نوری از ۱ وات بر میکرومترمربع شروع شده و تا ۶۰ وات بر میکرومتر مربع افزایش یافته است و اثرات این افزایش شدت توان ورودی به ساختار مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق جدول هرچه توان نوری افزایش پیدا می کند توان نوری موج برهای منحرف کننده ۱، ۲ و ۳ نیز افزایش پیدا کرده و نور ورودی را از ساختار خارج

review, " Optics & Laser Technology, vol. 144, pp. 107397, 2021.

[12] J. Clerk-Maxwell, "A dynamical theory of the electromagnetic field," *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, vol.155, pp.459-512, 1865.

[13] F. Parandin, M.M. Karkhanehchi, "Low size all optical XOR and NOT logic gates based on two-dimensional photonic crystals," *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, vol.13, pp.1-5, 2019.

[14] F. Parandin, R. Kamarian, and M. Jomour, "Designing an optical 1-bit comparator based on two-dimensional photonic crystals," *Appl, Opt*, vol. 60, pp. 2275-2280, 2021.

[15] F. Parandin, S. Olyaei, R. Kamarian, M. Jomour, "Design and simulation of linear all-optical comparator based on square-lattice photonic crystals," *Photonics*, vol.9, pp.459, 2022.

[16] F. Parandin, N. Mahtabi, " Design of an ultra-compact and high-contrast ratio all-optical NOR gate," *Opt, Quant, Electron*, vol. 53, 2021.

[17] M.M Karkhanehchi, F. Parandin, A. Zahedi, "Design of an all-optical half-adder based on 2D photonic crystals," *Photon, Netw, Commun*, vol. 13, pp.15-165, 2017.

[5] K. Busch, S. Lolkes, R. B. Wehrspohn, H. Foll, "Photonic crystals advances in design, fabrication and characterization," *John Wiley & Sons*, 2004.

[6] S. Olyaei, "Photonic Crystals Devices, Fibers, Nanostructures, and Sensors," *Shahid Rajaee Training University*, 2016.

[7] S. Olyaei, A. A. Dehghani, "Ultrasensitive pressure sensor based on point defect resonant cavity in photonic crystal," *Sensor Lett.*, vol. 11, pp: 1854-1859, 2013.

[8] C. Y. Chao, L. J. Guo, "Design and optimization of microring resonators in biomedical sensing application," *J. Lightwave Technol.*, vol.24, pp: 1395-1402, 2006.

[9] S. Olyaei, S. Najafgholinezhad, "A high quality factor and wide measurement range biosensor based on photonic crystal nanocavity resonator," *Sensor Lett.*, vol. 11, pp: 483-488, 2013.

[10] S. Olyaei, M. Seifouri, R.Karami, " Designing a high sensitivity hexagonal nano-cavity photonic crystal resonator for the purpose of seawater salinity sensing," *Opt Quant Electron*, Vol. 97, pp. 2-9, 2019.

[11] F. Parandin, F. Heidari, Z. Rahimi, S. Olyaei, " Two-dimensional photonic crystal biosensors: A