دوفصلنامهٔ هیدروفیزیک

دورهٔ نهم، شمارهٔ دوم (پاییز و زمستان ۱۴۰۲)؛ صفحات ۷۹-۷۳

مقالهٔ پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1402.9.2.6.3

درصد همانندی: ٪۰

طراحی رمزگذار اپتیکی مبتنی‌بر بلور فوتونی دوبعدی با کاربرد در سیستم‌های ارتباطی دریایی

عبدالرسول قرائتی[۱*]، قاسم فروزانی[۲]، سهیلا گودرزی[۳]

[۱*] نویسنده مسئول، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. agharaati@pnu.ac.ir

[۲] دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران forozani@pnu.ac.ir

[۳] دانشجوی دکترا، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. godarzi@student.pnu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

چکیده

سیستم‌های ارتباطی در محیط‌های دریایی همواره با چالش‌هایی مانند افت سیگنال، تداخل امواج و محدودیت‌های پهنای باند مواجه بوده‌اند. استفاده از بلورهای فوتونی به‌عنوان بستری برای پیاده‌سازی رمزگذارهای نوری در سیستم‌های ارتباطی، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد این ساختارها مانند هدایت دقیق نور و کنترل پراکندگی، توجه محققان را به خود جلب کرده است. رمزگذارهای نوری ساختارهایی هستند که در طراحی پردازنده‌های نوری استفاده می‌شوند. برای کاهش اندازه دستگاه‌های نوری، ضروری است که مدارهای منطقی کوچک‌مقیاس طراحی شوند. در این مطالعه، یک رمزگذار تمام‌نوری ۴×۲ مبتنی‌بر بلورهای فوتونی دوبعدی طراحی و شبیه‌سازی شده است. ساختار ساده این رمزگذار نوری امکان استفاده از آن در مدارهای مجتمع نوری را فراهم می‌کند. به دلیل ساختار کوچک‌مقیاس و استفاده از مسیرهای نقص، زمان تأخیر رمزگذار کاهش یافته و درنتیجه نرخ بیت داده افزایش می‌یابد. زمان تأخیر انتقال توان نرمالیز شده به‌دست‌آمده برای این رمزگذار پیشنهادی کمتر از ۹۰ فمتوثانیه به‌دست آمد. ویژگی دیگر این رمزگذار نوری پیشنهادی این است که توان نوری خروجی در حالت منطقی «۰» بسیار کم است که نسبت کنتراست را افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رمزگذار تمام نوری، بلور فوتونی دوبعدی، نرخ کنتراست.

۱. مقدمه

ارتباطات زیرآبی به‌عنوان یکی از اجزای اصلی علوم دریایی و هیدروفیزیک برای کاربردهای مختلف مانند سیستم‌های نظارتی، ردیابی زیردریایی‌ها، مانیتورینگ محیط‌زیستی و ارتباطات نظامی اهمیت زیادی دارد. روش‌های مرسوم ارتباط زیرآبی شامل امواج صوتی و رادیویی است [۱]. بااین‌حال، به دلیل محدودیت‌هایی ازجمله سرعت پایین انتقال داده، محدودیت برد امواج و تداخل محیطی کارایی محدودی دارند. امواج نوری با توجه به پهنای باند بالا و سرعت انتقال سریع‌تر به‌عنوان جایگزین مناسب مطرح شده‌اند. رمزگذارهای مبتنی‌بر بلور فوتونی به‌عنوان ابزارهای نوری نوآورانه می‌توانند بهبودهای قابل‌توجهی در کارایی سیستم‌های ارتباط زیرآبی ایجاد کنند [۲]. رمزگذار نوری، دستگاه منطق نوری است که معمولاً دارای 2^N درگاه ورودی و N درگاه خروجی هستند. رمزگذار نوری بر اساس ورود امواج نوری از درگاه‌های ورودی و نحوه خروج از درگاه‌های خروجی، یک کد باینری مبتنی‌بر صفر و یک تولید می‌کند. علاوه‌بر کاربرد در سیستم‌های پردازش سیگنال نوری، رمزگذارهای نوری یکی از سازه‌های اصلی در مبدل‌های تمام نوری سیستم‌های آنالوگ به دیجیتال هستند [۳]. بلورهای فوتونی را می‌توان برای طراحی رمزگذارهای تمام نوری استفاده کرد. توزیع تناوبی ضریب شکست در این ساختارها به ایجاد نوار باند ممنوعه انرژی منتهی می‌شود که می‌تواند با کنترل انتشار امواج نوری در ابعاد بسیار فشرده، باعث ایجاد کدهای باینری شود. رمزگذارهای مبتنی‌بر بلور فوتونی چندین مزیت کلیدی را در سیستم‌های ارتباطی نوری ارائه می‌دهند. در مرحله اول، می‌توان از آن‌ها در ساخت مدارهای دیجیتال نوری فوق‌سریع استفاده کرد که از طریق افزایش سرعت و کاهش اندازه، باعث افزایش کیفیت انتقال داده می‌شود.

علاوه‌بر این، استفاده از رمزگذارهای مبتنی‌بر بلور فوتونی نسبت کنتراست بالا را فراهم می‌کنند که به کاهش زمان تأخیر و افزایش نرخ بیت داده منجر می‌شود [۴]. در محیط‌های زیرآبی، نویز و تداخل امواج می‌تواند کیفیت ارتباطات را به‌شدت تحت‌تأثیر قرار دهد. بلورهای فوتونی به دلیل کنترل دقیق بر پراکندگی نور و ایجاد نوار باند ممنوعه انرژی فوتونی، می‌توانند به کاهش نویز و جلوگیری از تداخل امواج در مسیرهای ارتباطی کمک کنند. رمزگذارهای نوری که از این ویژگی بهره می‌برند، سیگنال‌های نوری را با حداقل تداخل و افت کیفیت ارسال می‌کنند [۵].

علاوه‌بر این، این رمزگذارهای مبتنی‌بر بلور فوتونی دوبعدی، به‌عنوان ساختارهای فشرده و ساده، نیاز به توان ورودی کمی دارند که باعث کاربرد آن در سیستم‌های ارتباطی نوری می‌شود. این مزایا رمزگذارهای بلور فوتونی را به‌عنوان اجزای امیدوارکننده برای توسعه و پیشرفت سیستم‌های ارتباطی نوری قرار می‌دهند [۶]. به‌عبارت‌دیگر، این رمزگذارها از خواص منحصربه‌فرد بلورهای فوتونی برای کنترل امواج نوری در مقیاس نانو استفاده می‌کنند و امکان ادغام توابع نوری پیچیده را در یک تراشه واحد فراهم می‌کنند [۶–۸] . رمزگذارهای بلور فوتونی مبتنی‌بر استفاده از دروازه منطقی هستند که با استفاده از اثر تداخل در ساختار بلور فوتونی دوبعدی برای سیستم‌های محاسباتی تمام نوری استفاده می‌شوند. در سال ۲۰۱۹، احمد محب‌زاده و همکاران، رمزگذار تمام نوری فوق‌سریع و فشرده با استفاده از نانو تشدیدگر درون ساختار بلور فوتونی را طراحی کردند. در ساختار پیشنهادی از چندین موج‌بر بلور فوتونی استفاده‌شده که توسط دو نانوتشدیدگر به هم متصل شده‌اند. نسبت کنتراست و زمان تأخیر برای رمزگذار تمام نوری پیشنهادی به‌ترتیب ۶ دسی‌بل ، ۱۲۵ فمتوثانیه و مساحت سازه برابر با ۱۳۲ میکرومتر مربع بود [۹]. همچنین راجاسکار[1] و همکاران، در سال ۲۰۲۲ رمزگذار فوق‌العاده پرسرعت مبتنی‌بر بلور فوتونی برای کاربردهای محاسبات نوری را پیشنهاد دادند. رمزگذار طراحی شده شامل حلقه تشدیدگر جفت شده با دو نانوحفره و پنج موج‌بر در یک شبکه مربعی با میله‌های تیتانات باریم بود. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که رمزگذار طراحی شده قادر است چهار حالت منطقی را به‌طور دقیق انجام دهد. علاوه‌بر این، ساختار ارائه‌شده مزایای

بی‌شماری ازجمله مصرف انرژی کم و سرعت داده بالا دارد. زمان پاسخ و مساحت کل تراشه رمزگذار پیشنهادی به‌ترتیب ۳۶۹/۳ فمتوثانیه و ۱۷۴/۲۴ میکرومترمربع است [۱۰].

در سال ۲۰۲۲ ، چهیپا[۲] و همکاران، رمزگذار نوری با سرعت بالا بر اساس تشدیدکننده حلقه بلور فوتونی دوبعدی را پیشنهاد کردند. در ساختار یادشده از تشدیدکننده حلقوی مربع شکل و چندین موج‌بر در ساختار پیشنهادی استفاده شده است. طول‌موج مرکزی ساختار ۱۵۵۰ نانومتر بوده، برای انجام عملیات رمزگذار که در آن تنها یک درگاه ورودی در یک زمان فعال می‌شود، درحالی‌که سایر درگاه‌های ورودی غیرفعال هستند، و بر این اساس سیگنال کدگذاری شده باینری معادل در درگاه‌های خروجی تولید می‌شود. رمزگذار پیشنهادی آن‌ها با زمان پاسخ سریع ۲۲۲/۷۶ فمتوثانیه، سرعت داده بالا ۴/۴۸ ترابایت برثانیه و اندازه بسیار فشرده ۱۴۰/۸۴ میکرومتر مربع طراحی شده بود. ازاین‌رو دستگاه پیشنهادی برای محاسبات نوری با سرعت بالا به‌عنوان مدار مجتمع فوتونیک مناسب است [۱۱]. همچنین در سال ۲۰۲۳، طالب‌زاده و همکاران رمزگذار تمام نوری براساس بلور فوتونی طراحی و شبیه‌سازی کردند. ایشان با استفاده از تداخل امواج نوری داخل موج‌برهای بلور فوتونی، ساختاری پیشنهادی کردند که شبکه بلور فوتونی فقط از میله‌های دی‌الکتریک با شعاع ۱۰۲/۹ نانومتر در آرایش مربعی با ثابت شبکه و مساحت سازه به‌ترتیب ۴۹۰ نانومتر و ۱۷۸ میکرومتر مربع بود. نتایج تحلیل زمانی نشان داد که میانگین تأخیر زمانی سازه پیشنهادی کمتر از ۱/۲ پیکوثانیه و بسیار سریع بود [۱۲].

بنابراین در این مقاله، طراحی و شبیه‌سازی رمزگذار اپتیکی ۲×۴ با بررسی ویژگی‌های نوری آن ارائه می‌شود.

۲. روش شبیه‌سازی

به‌منظور طراحی رمزگذار اپتیکی مبتنی‌بر بلور فوتونی دوبعدی، در آغاز بایستی مکانیسم هدایت امواج الکترومغناطیسی در طول‌موج‌های معین را برای کاربرد موردنظر را انتخاب کرد. به‌طور مثال اگر از تکنیک اثر کر[۳] غیرخطی مبتنی‌بر استفاده از ماده‌ای غیرخطی[۴] شامل پلی‌استایرن ، پلیمرهای نوری غیرخطی و اکسینیترید سیلیکون استفاده شود، ضریب شکست با شدت سیگنال ورودی تغییر می‌کند. این روش، نیاز به توان ورودی بالا دارد. همچنین مصرف توان و زمان پاسخ در طراحی‌های غیرخطی به‌طورمعمول بیشتر از طراحی‌های خطی است. علاوه‌بر این، این تکنیک معمولاً پهنای باند فرکانس عملیاتی کمی تولید می‌کند.

روش تداخل براساس پدیده تداخل نور برای دستیابی به منطق صحیح در درگاه‌های خروجی است. در این روش، سیگنال‌های ورودی باید به‌صورت هم‌فاز اعمال شوند. سیگنال‌های ورودی با یکدیگر تعامل کرده و بر اساس اختلاف‌فاز آن‌ها، تداخل سازنده یا مخرب ایجاد می‌شود که به‌ترتیب با منطق «۱» یا «۰» مطابقت دارد. اختلاف‌فاز با موج‌برها کنترل می‌شود. موج‌برهای منتهی به درگاه خروجی، نور را به درگاه‌های خروجی هدایت می‌کنند.

در مرحله دوم، با استفاده از نرم‌افزار اپتی ویو[۵] جنس ماده میله‌ها و پس‌زمینه، با توجه به تکنیک انتخاب‌شده در مرحله قبل انتخاب می‌شود. تکنیک مورد استفاده در این شبیه‌سازی روش تداخل است. ماده‌ای که به‌طورمعمول در ساختار بلور فوتونی بر اساس اثر تداخل استفاده می‌شود، سیلیکون است. ژرمانیوم و سایر موادی مانند گالیوم آرسناید و آلومینیوم گالیوم آرسناید نیز استفاده می‌شوند. ماده پس‌زمینه در بیشتر طراحی‌ها هواست .

در مرحله سوم، پارامترهای مناسب برای طول‌موج عملیاتی موردنظر محاسبه می‌شوند.

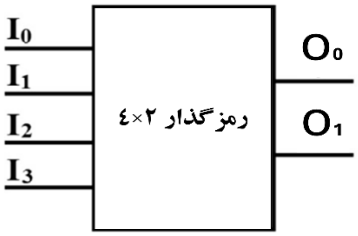
در مرحله چهارم، ساختارهای نقص برای هدایت امواج نور در داخل ساختار بر اساس عملکرد دستگاه ایجاد می‌شوند.

۳. یافته‌ها

رمزگذار اپتیکی ۴ به ۲ یک مدار یا سیستم نوری است که چهار ورودی اپتیکی را به دو خروجی کد دودویی تبدیل می‌کند. این رمزگذار برخلاف رمزگذارهای الکترونیکی، از

نور به‌عنوان حامل اطلاعات استفاده می‌کند. هدف اصلی این مدار، کاهش تعداد سیگنال‌های خروجی با فشرده‌سازی اطلاعات ورودی است. طرح‌واره و جدول منطقی رمزگذار ۴×۲ در شکل ۱ نشان داده شده است. در رمزگذارهای نوری شکل ۱، در هرلحظه تنها یکی از ورودی‌ها فعال یا در حالت منطقی «۱» است و سایر ورودی‌ها در حالت منطقی «۰» قرار دارند. مطابق جدول ۱، در این رمزگذار، چهار درگاه ورودی نور وجود دارد که تنها یکی از آن‌ها در هرلحظه فعال است. ساختار طراحی شده، این فعال‌سازی را شناسایی کرده و به‌صورت دودویی (کد باینری) در دو خط خروجی نشان می‌دهد. مقادیر باینری خروجی معادل با شاخص ورودی برای هر حالت است. همچنین رمزگذار نوری مبتنی‌بر ساختار بلور فوتونی دوبعدی طراحی‌شده در شکل ۲ نشان داده شده است. این ساختار شامل میله‌های دی‌الکتریک جنس ژرمانیوم است که در پس‌زمینه‌ای از هوا قرار گرفته‌اند.

ثابت شبکه این ساختار ۵۸۰ نانومتر و شعاع میله‌ها برابر با ۶۹/۶ نانومتر در نظر گرفته شد. همچنین اندازه ساختار ۲۰۸ میکرومتر مربع است. برای محاسبات ساختار نواری از روش بسط موج تخت استفاده شد.

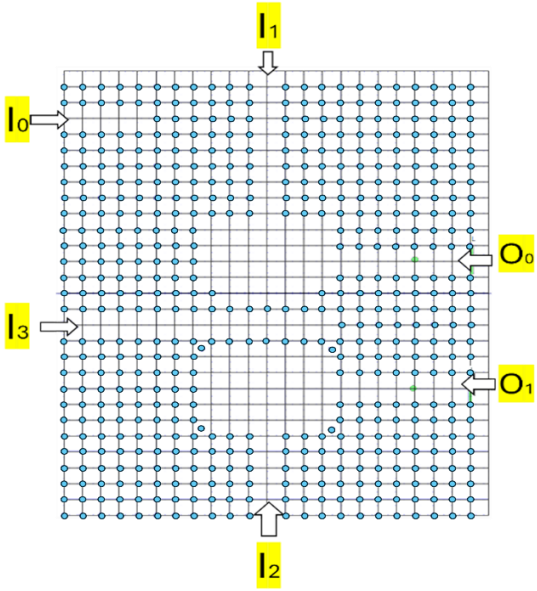


(الف)

درگاه‌های ورودی				درگاه خروجی	
I_0	I_1	I_2	I_3	O_0	O_1
۱	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۱	۰	۰	۱	۰
۰	۰	۱	۰	۰	۱
۰	۰	۰	۱	۱	۱

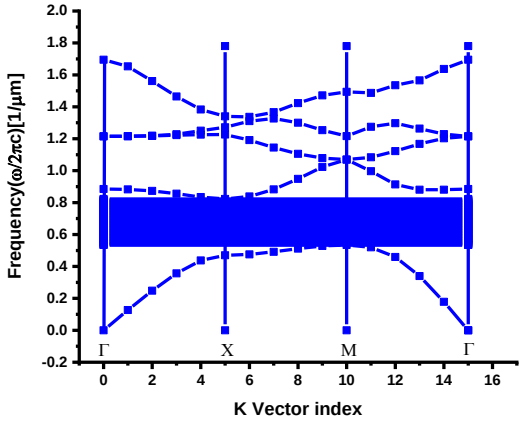
(ب)

شکل ۱. (الف) طرح‌واره‌ای از رمزگذار ۴×۲. (ب) جدول منطقی رمزگذارفوق



شکل ۲. ساختار رمزگذار نوری مبتنی بر بلور فوتونی دوبعدی

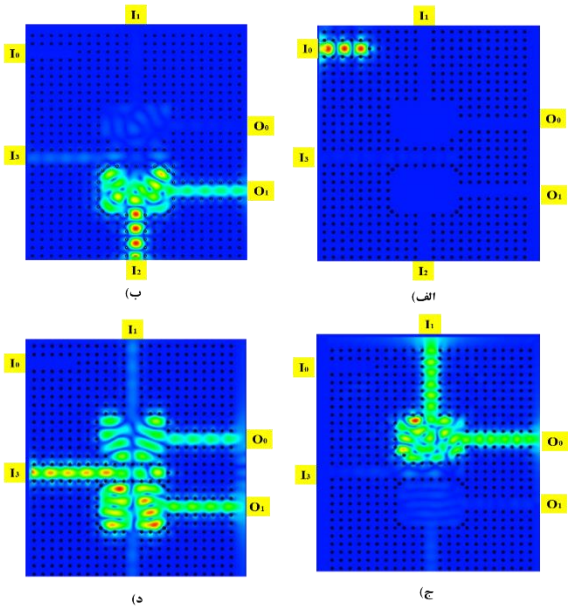
شکل ۳ ساختار باند بلور فوتونی دوبعدی را نشان می‌دهد که رابطه بین فرکانس نرمال‌شده با بردار موج را بیان می‌کند. ساختار باندهای انرژی (محدوده‌های مجاز) و نوار باند ممنوعه انرژی به‌وضوح در مد انتشاری میدان الکتریکی عرضی در نمودار مشخص است. این نمودار نشان می‌دهد که ساختار مورد اشاره دارای نوار باند ممنوعه انرژی (باند گاف) در محدوده فرکانسی ۰/۵۳۴۶ تا ۰/۸۲۳۰۶ معادل فاصله طول‌موج‌ها از ۱۲۱۴ تا ۱۸۷۰ نانومتر است. برای هدایت امواج نوری از درگاه‌های ورودی به درگاه‌های خروجی، از تکنیک ایجاد نقص استفاده شده است. به این معنی که در جهت‌های معین انتشار امواج نوری، میله‌ها حذف شدند (نقص‌های خطی) و در برخی نقاط، شعاع میله‌ها کاهش یافته یا جابه‌جا شدند (نقص‌های نقطه‌ای). نقش اصلی نقص‌های نقطه‌ای در نقاط خاص در ساختار بلور فوتونی دوبعدی طراحی شده، این است که با برخورد امواج نوری به این نقاط، از ورود امواج به مسیرهای ورودی جلوگیری شده و بیشترین توان به درگاه خروجی منتقل شود.



شکل ۳. ساختار نوار باند ممنوعه انرژی بلور فوتونی دوبعدی

منابع نور همدوس در درگاه ورودی‌های رمزگذار استفاده شده و طول‌موج آن‌ها برابر با ۱۵۵۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. به‌عبارت‌دیگر رمزگذار در محدوده طول‌موج‌های مورد تأیید مخابراتی و در بازه طول‌موج‌های باند گاف عمل می‌کند.

در شکل ۴ طیف توزیع میدان الکتریکی عرضی در مسیرهای نقص در بلورهای فوتونی برای دستیابی به رمزگذار تمام نوری نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴(الف) مشاهده می‌شود، ورودی I_0 هیچ ارتباطی با خروجی‌ها ندارد، زیرا طبق تعریف رمزگذار، وقتی I_0 روشن و در حالت «۱» است، باید هر دو خروجی در حالت «۰» باشند؛ بنابراین در این حالت، توان نوری منتقل‌شده به خروجی‌ها باید بسیار کم باشد. در شکل ۴ (ب) زمانی که I_1 در حالت «۱» است، مسیر ایجادشده از انتشار نور به مسیرهای ورودی دیگر و خروجی O_1 جلوگیری می‌کند، بنابراین حداکثر توان نوری به خروجی O_0 منتقل‌شده و در حالت منطقی «۱» قرار می‌گیرد .همچنین، با توجه به شکل ۴ (ج) وقتی I_2 در حالت «۱» است، مسیر هدایت امواج نوری معین‌شده، از انتشار نور به خروجی O_0 جلوگیری کرده و درنتیجه، حداکثر توان نوری به خروجی O_1 منتقل‌شده و در حالت منطقی «۱» قرار می‌گیرد. در شکل ۴ (د) نیز، وقتی I_3 در حالت «۱» است، مهم‌ترین ویژگی منطق حاکم بر رمزگذار نوری مورداشاره در شکل ۱، تحقق می‌یابد.



شکل ۴. طیف توزیع میدان الکتریکی عرضی در رمزگذار مبتنی‌بر بلور فوتونی دوبعدی (الف) I_0 روشن و در حالت «۱» (ب) I_1 روشن و در حالت «۱» (ج) I_2 روشن و در حالت «۱» (د) I_3 روشن و در حالت «۱»

به‌عبارت‌دیگر، مسیر انتشار امواج نوری به شکلی است که باعث می‌شود، امواج یادشده از هر دو درگاه خروجی با حداکثر توان به آشکارساز تعبیه‌شده در این نقاط برسند. هر دو درگاه خروجی در حالت منطقی «۱» قرار می‌گیرند. شکل ۵ (الف) توان نوری منتقل‌شده به درگاه خروجی را زمانی که ورودی I_1 در حالت «۱» است، نشان می‌دهد. توان‌ها نرمال‌سازی شده و به‌صورت نسبت توان خروجی به توان نوری منبع در حالت روشن تعریف شده‌اند. مشاهده می‌شود زمان پاسخ‌دهی خروجی به ورودی حدود ۰/۰۵ پیکوثانیه و زمان رسیدن توان خروجی به اوج حدود ۰/۰۸ پیکوثانیه است. علاوه‌بر این، توان نرمال‌سازی شده منتقل شده به خروجی O_0 حدود ۹۴ درصد است، درحالی‌که توان در خروجی O_1 حدود ۱ درصد است. بخشی از توان به مسیرهای ورودی بازتاب می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت که مقادیر منطقی در خروجی‌ها به‌صورت $O_0 = 1$ و $O_1 = 0$ هستند. نتیجه شبیه‌سازی برای ورودی $I_2 = 1$ در شکل ۵ (ب) نشان داده شده است. در این حالت، توان نرمال‌سازی شده خروجی در خروجی O_0 برابر ۱ درصد و در خروجی O_1 برابر ۹۴ درصد است. بنابراین، مقادیر منطقی معادل در خروجی‌ها به‌صورت $O_1 = 1$ و $O_0 = 0$ خواهند بود.

توان خروجی برای ورودی $I_3 = 1$ در شکل ۵ (ج) نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً گفته شد، چون توان بین دو خروجی تقسیم می‌شود، توان این منبع دو برابر دیگر منابع فرض شده تا توان در هر دو خروجی O_0 و O_1 افزایش یابد. همچنین به دلیل طراحی ویژه مسیرهای خروجی برای این ورودی، توان نوری طوری بین دو خروجی تقسیم شده و هر دو خروجی در حالت منطقی «۱» قرار می‌گیرند ($O_0 = 1$ و $O_1 = 1$). زمان پاسخ‌دهی خروجی‌ها حدود ۰/۰۵ پیکوثانیه است و خروجی‌ها پس از ۰/۰۹ پیکوثانیه به حالت پایدار می‌رسند. همچنین، توان نرمال‌سازی شده انتقالی در خروجی‌ها حدود ۹۱ درصد است.

نسبت کنتراست[۶] (CR) در رمزگذارهای نوری مبتنی‌بر بلور فوتونی دوبعدی، معیاری برای ارزیابی تفاوت میان توان نوری در حالت منطقی «۰» و حالت منطقی «۱» است.

این معیار نشان می‌دهد که چقدر سیستم نوری می‌تواند بین این دو حالت منطقی تمایز قائل شود. نسبت کنتراست به‌صورت لگاریتمی و در واحد دسی‌بل (dB) محاسبه می‌شود و از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$CR = 10\log\left(\frac{P_1}{P_0}\right) \qquad (۱)$$

که در آن، P_1 توان نوری خروجی در حالت منطقی «۱» و P_0 توان نوری خروجی در حالت منطقی «۰» است. نسبت کنتراست بالا نشان‌دهنده این است که سیستم به‌خوبی می‌تواند بین حالت‌های منطقی «۰» و «۱» تمایز قائل شود، این موضوع برای بهبود عملکرد رمزگذار نوری و افزایش دقت پردازش نوری بسیار مهم است. مطابق جدول ۲؛ نسبت کنتراست محاسبه شده، برابر ۱۹/۷۳ دسی‌بل به‌دست آمد.

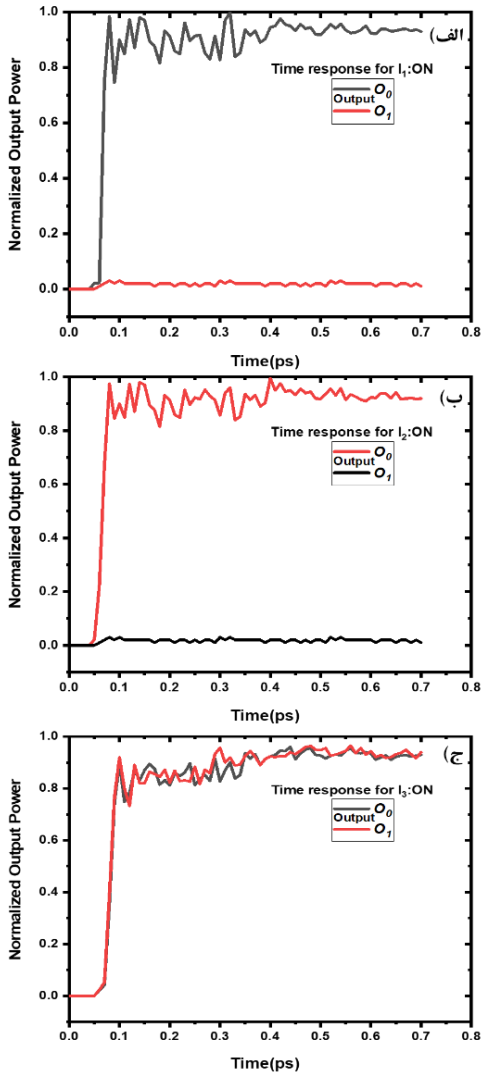
جدول ۲. توان نرمالیز شده و مقادیر منطقی مربوطه

درگاه خروجی		درگاه‌های ورودی			
O_1	O_0	I_3	I_2	I_1	I_0
۰/۰۰ (۰)	۰/۰۰ (۰)	۰	۰	۰	۱
۰/۰۱ (۰)	۰/۹۴ (۱)	۰	۰	۱	۰
۰/۹۴ (۱)	۰/۰۱ (۰)	۰	۱	۰	۰
۰/۹۱ (۱)	۰/۹۱ (۱)	۱	۰	۰	۰

در جدول ۳، مشاهده می‌شود که ساختار رمزگذار نوری مبتنی‌بر بلور فوتونی دوبعدی با توجه به زمان تأخیر بسیار کم و نسبت کنتراست بسیار بالا، موجب عملکرد سریع‌تر سیستم در انتقال داده شده و وضوح و تمایز بهتری بین سیگنال‌ها را ارائه می‌دهد، که در طراحی رمزگذار نوری بسیار حیاتی است. هرچند ابعاد ساختار کمی بزرگ‌تر است، این افزایش ابعاد می‌تواند به دلیل بهبود نسبت کنتراست و عملکرد کلی سیستم باشد، که در کاربردهای عملی مهم‌تر است.

جدول ۳. مقایسه کار حاضر با پژوهش‌های دیگر

منبع	ابعاد ساختار (میکرومتر مربع)	نسبت کنتراست (دسی‌بل)	زمان تأخیر (فمتوثانیه)
[۹]	۱۳۲	۶	۱۲۵
[۱۰]	۱۷۴/۲۴	۷/۱۱	۳۶۹/۳
[۱۱]	۱۴۰/۸۴	۱۱/۸۵	۲۲۲/۷۶
کار حاضر	۲۰۸	۱۹/۷۳	۹۰



شکل ۵. نمودار توان نرمال شده خروجی در (الف) I_0 روشن و در حالت «۱» (ب) I_1 روشن و در حالت «۱» (ج) I_2 روشن و در حالت «۱» د) I_3 روشن و در حالت «۱»

۴. نتیجه‌گیری

برای ساخت رمزگذار نوری ۲×۴، از ساختار بلور فوتونی دوبعدی استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان رمزگذار نوری ۲×۴ با اتلاف توان کم استفاده شود. به دلیل اندازه کوچک‌تر و سادگی ساختار، این رمزگذار پیشنهادی برای مدارهای مجتمع نوری با سرعت بالا مناسب است. علاوه‌بر این، توان نوری این رمزگذار در حالت منطقی «۰» بسیار کم است که باعث بهبود نسبت کنتراست می‌شود. یکی دیگر از مزایای رمزگذار پیشنهادی، زمان تأخیر کم (کمتر از ۰/۰۸ پیکوثانیه) است که نرخ انتقال داده را افزایش می‌دهد. بنابراین رمزگذار نوری مبتنی‌بر بلور فوتونی دوبعدی طراحی شده، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود، به‌ویژه در کاربردهای سیستم‌های ارتباطی دریایی، پتانسیل بالایی دارد. ساختار طراحی‌شده مبتنی‌بر بلور فوتونی دوبعدی به دلیل قابلیت کنترل و هدایت نور با دقت بالا، کاهش تلفات سیگنال، و پایداری در برابر شرایط محیطی دشوار (دما و فشار متغیر در محیط‌های دریایی) می‌تواند به‌عنوان راه‌حلی کارآمد در انتقال داده‌های پرسرعت و ایمن در ارتباطات دریایی استفاده شوند. دلیل اصلی مناسب بودن این ساختار برای سیستم‌های دریایی، امکان استفاده از طول‌موج‌های نوری خاص برای مقابله با نویزها و اختلالات موجود در این محیط‌ها و حفظ کیفیت سیگنال در مسافت‌های طولانی است. علاوه‌بر این، طراحی فشرده و بهره‌وری انرژی بالای این رمزگذارها، نیازهای تجهیزات دریایی را بهینه‌تر برطرف می‌کند و مزایای عملیاتی قابل‌توجهی را ارائه می‌دهد.

مراجع

[1] Kebkal KG, Mashoshin AI, Morozs NV. Solutions for underwater communication and positioning network development. Gyroscopy and navigation. 2019;10:161-79

[2] Makvandi M, Maleki MJ, Soroosh M. Compact all-optical encoder based on silicon photonic crystal structure. Journal of Applied Research in Electrical Engineering. 2022;1(1):1-7.

[3] Kamal SM, Ali TA, Rafat NH. New designs of 4× 2 photonic crystal encoders using ring resonators. Optical and Quantum Electronics. 2023 Mar;55(3):261.

[4] Huang L, Tanguy QA, Fröch JE, Mukherjee S, Böhringer KF, Majumdar A. Photonic advantage of optical encoders. Nanophotonics. 2024 Mar 27;13(7):1191-6.

[5] Arunkumar R, Robinson S. Design and Comparative Analysis of an Ultra-Fast, Low-Power All-Optical 4× 2 Encoder Using a Silicon Y-Shaped 2D Photonic Crystal. Silicon. 2024 Jun 14:1-2.

[6] Arunkumar R, Robinson S. Design and Comparative Analysis of an Ultra-Fast, Low-Power All-Optical 4× 2 Encoder Using a Silicon Y-Shaped 2D Photonic Crystal. Silicon. 2024 Jun 14:1-2.

[7] Hosseinzadeh Sani M, Saghaei H, Mehranpour MA, Asgariyan Tabrizi A. A novel all-optical sensor design based on a tunable resonant nanocavity in photonic crystal microstructure applicable in MEMS accelerometers. Photonic Sensors. 2021 Dec;11:457-71.

[8] Robinson S, Balaji VR. Photonic crystal-based optical devices for photonic intergraded circuits. InMicro-and Nanotechnology Enabled Applications for Portable Miniaturized Analytical Systems 2022 Jan 1 (pp. 217-258). Elsevier.

[9] Mohebzadeh, A, Olyaee S. Ultra-fast and compact all-optical encoder based on photonic crystal nano-resonator without using nonlinear materials. Photonics Lett. Pol. 2019, 11(1): 10-12.

[10] Rajasekar R, Thavasi Raja G, Jayabarathan JK, Robinson S. High speed nano-optical encoder using photonic crystal ring resonator. Photonic Network Communications. 2020 Aug;40:31-9.

[11] Chhipa MK, Madhav BT, Suthar B, Janyani V. Ultra-compact with improved data rate optical encoder based on 2D linear photonic crystal ring resonator. Photonic Network Communications. 2022 Aug;44(1):30-40.

[12] Talebzadeh R, Nasab AM, Moayed SH. Design and simulation of an all-optical priority encoder based on 2-D photonic crystal. Optical and Quantum Electronics. 2023 Apr;55(4):314.

پی‌نوشت‌ها

1. Rajasekar
2. Chhipa
3. Kerr effect
4. Nonlinear Material
5. Optiwave
6. Contrast Ratio