

بهینه‌سازی نانوبلورهای فوتونی برای نامرئی‌سازی با هوش مصنوعی

زهره درانی*

گروه مهندسی برق، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۷/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۲۰)

<https://doi.org/10.47176/jame.44.1.1088>

چکیده: بلورهای فوتونی، ساختارهایی هستند که با ایجاد تغییرات متناوب در ضریب شکست، می‌توانند انتشار نور را کنترل کنند. این ساختارها با ایجاد شکاف باند، امکان هدایت امواج الکترومغناطیسی در جهات خاص و پنهان کردن اشیاء را فراهم می‌کنند. بلور فوتونی به‌عنوان ساختارهای میکروسکوپی با ویژگی‌های نوری منحصربه‌فرد، در طراحی سیستم‌های نامرئی‌سازی کاربرد دارند. با این حال، طراحی و بهینه‌سازی این ساختارها به‌خصوص با روش‌های جدید مانند یادگیری عمیق به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. استفاده از روش‌های یادگیری عمیق می‌تواند در این زمینه بسیار مفید باشد و بنابراین در این مقاله، از معماری شبکه عصبی عمیق ResNet، برای بهینه‌سازی بلورهای فوتونی استفاده شده است. ResNet با استخراج ویژگی‌های پیچیده و غیرخطی از داده‌های ورودی، می‌تواند به طراحان در انتخاب مواد مناسب و تعیین ابعاد و آرایش بهینه نانوساختارهای بلور فوتونی برای نامرئی‌سازی کمک کند. پدیده شکست منفی در بلورهای فوتونی و نحوه انتشار نور در نامرئی‌ساز پیشنهادی با یادگیری عمیق، با شبیه‌سازی FDTD مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که طراحی مناسب بلورهای فوتونی با استفاده از یادگیری عمیق می‌تواند به ایجاد ساختارهای کارآمد کمک کند.

واژه‌های کلیدی: بلورهای فوتونی، متامواد، معماری ResNet، نامرئی‌سازی، یادگیری عمیق.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: dorrani.z@pnu.ac.ir

Optimization of Photonic Nanocrystals for Invisibility Using Artificial Intelligence

Z. Dorrani*

Department of Electrical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Photonic crystals are structures that can control the propagation of light by creating periodic changes in the refractive index. These structures facilitate directing electromagnetic waves in specific directions and making objects invisible by creating a bandgap. Photonic crystals, as microscopic structures with unique optical properties, are used in the design of invisibility systems. However, the design and optimization of these structures, especially with new methods like deep learning, have not been thoroughly investigated. Utilizing deep learning techniques can be highly beneficial in this area. Therefore, this paper employs the deep neural network architecture ResNet to optimize photonic crystals. ResNet can assist designers in selecting suitable materials and determining the optimal dimensions and arrangements of photonic nanostructured crystals for invisibility by extracting complex and nonlinear features from input data. The phenomenon of negative refraction in photonic crystals and the way light propagates in the proposed invisibility were studied using FDTD simulation. The results indicated that appropriate design of photonic crystals using deep learning could contribute to the creation of efficient structures.

Keywords: Photonic crystals, Metamaterials, ResNet architecture, Invisibility, Deep learning.

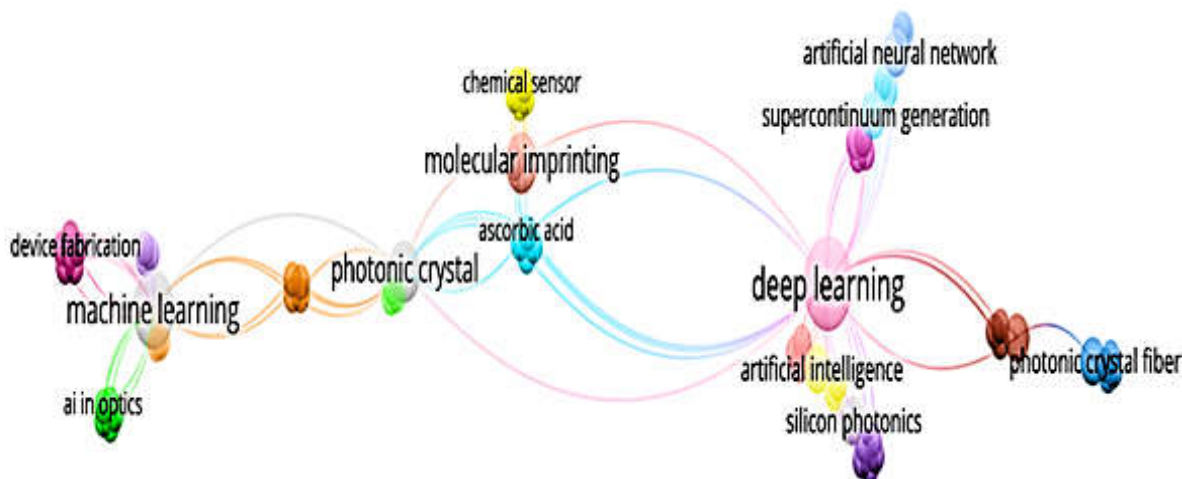
۱- مقدمه

پوشش‌های نامرئی برای تجهیزات نظامی یا ایجاد حسگرهای پیشرفته استفاده کرد. شکل (۱) که با نرم‌افزار VOSviewer طراحی شده است، تحقیقات اخیر را در این زمینه نشان می‌دهد. این شکل، یک نمودار شبکه‌ای را نشان می‌دهد که گره‌های اصلی شامل موضوعاتی کلیدی به صورت خوشه‌های رنگی مجزا نمایش داده شده‌اند. هر گره، نشان‌دهنده یک موضوع است و ارتباطات بین آن‌ها از طریق خطوط نشان داده شده است که بیانگر ارتباطات مفهومی و پژوهشی بین آن‌ها است. این نمودار، دو حوزه اصلی یادگیری عمیق^۱ و بلور فوتونی را به کاربردهای دیگر مرتبط می‌کند. رنگ‌های متفاوت خوشه‌ها، نشان‌دهنده تقسیم‌بندی موضوعی یا خوشه‌بندی مفاهیم مرتبط است، مانند هوش مصنوعی در اپتیک، ساخت دستگاه‌ها و کاربردهای فوتونیک. ارتباط قوی بین خوشه‌ها نشان‌دهنده ورود یادگیری عمیق به حوزه فوتونیک است.

بهینه‌سازی بلورهای فوتونی برای کاربردهای نامرئی‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این ساختارها می‌توانند در محدوده مشخصی از فرکانس‌ها خاصیت نامرئی شدن داشته باشند. طراحی دقیق این بلورها با پارامترهای هندسی و اپتیکی

نامرئی‌سازی، یکی از مفاهیم جذاب در علم مواد و فیزیک است که به طراحی و ساخت موادی اشاره دارد که می‌توانند نور را به گونه‌ای منحرف کنند که اشیاء پنهان شوند (۱). بلورهای فوتونی، ساختارهایی با ویژگی‌های خاص نوری هستند و می‌توانند به عنوان ابزارهایی برای ایجاد نامرئی‌سازی مورد استفاده قرار گیرند (۲). این مواد دارای ساختارهای دوره‌ای در مقیاس نانو هستند و می‌توانند رفتار نور را در داخل خود کنترل کرده و به طور انتخابی، طول موج‌های خاصی از نور را جذب یا منعکس کنند. عملکرد نامرئی‌سازی در بلورهای فوتونی معمولاً شامل انحراف نور است؛ بنابراین، با طراحی ساختارهای بلورین به گونه‌ای که نور به طور مؤثری از اطراف شیء عبور کند، می‌توان اشیاء را پنهان کرد. این کار معمولاً با استفاده از روش‌های پیشرفته‌ای مانند طراحی متامواد و استفاده از الگوریتم‌های پیچیده انجام می‌شود.

نامرئی‌سازی در بلورهای فوتونی می‌تواند کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های نظامی، پزشکی و فناوری اطلاعات داشته باشد. به عنوان مثال، می‌توان از این فناوری برای توسعه



شکل ۱- نقشه گرافیکی تحقیقات اخیر.

آن‌ها در کاربردهای مختلف از جمله مخابرات نوری و پردازش اطلاعات کوانتومی را فراهم کرده است.

در سال‌های اخیر، ادغام هوش مصنوعی، به‌ویژه یادگیری عمیق، نتایج امیدوارکننده‌ای را در طراحی و بهینه‌سازی ساختارهای تمام‌مواد نشان داده است. الگوریتم شبکه عصبی، ResNet امکان ایجاد انقلابی در روش طراحی و مهندسی تمام‌مواد را دارند که منجر به طراحی نامرئی‌ساز کارآمدتر می‌شود (۵). هدف اصلی این تحقیق، بررسی استفاده از یادگیری عمیق، به‌ویژه معماری ResNet، در طراحی و بهینه‌سازی نانوبلورهای فوتونی برای دستیابی به نامرئی‌ساز در تمام‌مواد است (۶ و ۷). معماری ResNet، با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشن عمیق^۴، به‌طور مؤثر پارامترهای طراحی نانوبلورهای فوتونی را بهینه می‌کند. این شبکه‌ها، ویژگی‌های پیچیده هندسی و نوری را استخراج کرده و طراحی‌های جدید را بر اساس این ویژگی‌ها پیشنهاد می‌دهند. در طراحی نانوبلورهای فوتونی، ساختارهای نانو به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که بهترین عملکرد نوری را ارائه دهند، مانند بهینه‌سازی نسبت شعاع حفره به فاصله شبکه و آرایش هندسی نانو ساختارها. روش پیشنهادی به دنبال ایجاد یک چارچوب مبتنی بر یادگیری عمیق برای طراحی ساختارهای نانوبلور فوتونی است که توانایی بهینه‌سازی پارامترهای طراحی برای نامرئی‌ساز را دارد. همچنین این تحقیق

خاص می‌تواند به ایجاد شکاف‌های فوتونی و کنترل انتشار امواج الکترومغناطیسی منجر شود. با این حال، روش‌های سنتی طراحی و بهینه‌سازی این ساختارها محدودیت‌هایی دارند. پیچیدگی روابط بین ساختار و عملکرد، فضای طراحی گسترده و نیاز به بهینه‌سازی چندهدفه^۲، چالش‌های مهمی هستند. از این رو، رویکردهای جدیدی مانند یادگیری عمیق ضروری به نظر می‌رسند. در این راستا، استفاده از معماری‌های پیشرفته یادگیری عمیق مانند ResNet می‌تواند راه‌حلی مؤثر باشد. ResNet با توانایی یادگیری روابط پیچیده و غیرخطی، می‌تواند به طراحی خودکار و بهینه‌سازی کارآمدتر بلورهای فوتونی برای کاربردهای نامرئی‌سازی کمک کند.

بهینه‌سازی در بلورهای فوتونی مرسوم بوده و روش‌های مختلفی در این زمینه پیشنهاد شده است. محققان از ترکیب روش تفاضل محدود در زمان^۳ با الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات برای بهبود پاسخ فرکانسی فیلترهای بلور فوتونی استفاده کرده‌اند. این رویکرد ترکیبی، امکان طراحی بهینه ساختارهای پیچیده را فراهم می‌کند (۳). با استفاده از بهینه‌سازی، مشکل ابعاد بزرگ ساختارها حل شده و جداکننده‌های توان بلور فوتونی بهینه‌شده با ابعاد کوچکتر و عملکرد بهتر طراحی شده است (۴). این روش‌ها منجر به بهبود عملکرد و کارایی ادوات مبتنی بر بلورهای فوتونی شده و امکان استفاده گسترده‌تر از

جدول ۱- توسعه نامرئی‌سازی در طول سال‌های اخیر

سال	نقطه عطف
۲۰۰۶	اولین نمایش عملی پوشش نامرئی توسط دانشگاه دوک با توانایی پنهان کردن امواج مایکروویو.
۲۰۰۷-۲۰۱۰	توسعه مفاهیم جدید در زمینه متامواد و طراحی پوشش‌های نامرئی.
۲۰۱۵	معرفی پوشش‌های نامرئی فوق‌باریک با قابلیت‌های جدید.
۲۰۲۰	ظهور پوشش‌های هوشمند و خودران که به‌طور دینامیک به شرایط محیطی پاسخ می‌دهند.
۲۰۲۱	توسعه پوشش‌های نامرئی توسط محققان دانشگاه ژجیانگ چین که می‌تواند ورودی‌های خارجی را خنثی کند.
۲۰۲۲	پیشرفت در کنترل متاسرفیس‌ها برای شکل‌دهی به میدان‌های پراکندگی در فضای واقعی و دینامیک.
۲۰۲۳	معرفی فناوری جدیدی برای پوشش‌های هوشمند که قابلیت انطباق با محیط‌های مختلف را دارد.
۲۰۲۴	آزمایش موفقیت‌آمیز یک پهباد نامرئی خودران که می‌تواند در سه محیط مختلف (هوا، زمین، دریا) عمل کند.

متامواد و نامرئی‌سازی هوشمند است. از سال ۲۰۰۶ که اولین پوشش نامرئی عملی معرفی شد، این فناوری به‌سرعت در حال تکامل بوده است. این پوشش‌ها با قابلیت پنهان کردن اشیاء از دید، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند و تحقیقات در این حوزه به توسعه انواع مختلفی از پوشش‌ها منجر شده است. به‌عنوان مثال، در سال ۲۰۲۰، ظهور نامرئی‌سازی هوشمند با توانایی پاسخ‌گویی دینامیک به شرایط محیطی، نشان‌دهنده یک جهش مهم در این فناوری بود (۸).

از سال ۲۰۲۱ تاکنون، پیشرفت‌های بیش‌تری در زمینه پوشش‌های نامرئی متامواد مشاهده شده است. محققان موفق به توسعه یک پوشش نامرئی شدند که می‌تواند ورودی‌های خارجی را خنثی کند و در شرایط متغیر نامرئی باقی بماند. این پیشرفت‌ها با استفاده از مدولاسیون فضایی-زمانی بر روی متامواد امکان‌پذیر شده است که توانایی شکل‌دهی به میدان‌های پراکندگی را در فضا و دامنه فرکانس فراهم می‌کند (۹). این تحقیقات نه تنها کاربردهای نظامی و نظارتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه می‌تواند به توسعه فناوری‌های جدید در ارتباطات نیز کمک کند.

یادگیری عمیق، به‌عنوان یک ابزار تحول‌آفرین در طراحی و تحلیل ساختارهای بلور فوتونی ظهور کرده است و به‌طور قابل توجهی توانمندی‌های محققان در این حوزه را افزایش داده است (۱۰ و ۱۱). پیشرفت‌های اخیر نشان می‌دهد که

به دنبال تأیید اعتبار رویکرد مبتنی بر یادگیری عمیق پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی‌های عددی است. شبکه از دو بخش اصلی رمزگذار و رمزگشا تشکیل شده است. رمزگذار با استفاده از لایه‌های کانولوشنی، ویژگی‌های پیچیده هندسی و نوری را از ساختارهای ورودی و داده‌های شبیه‌سازی شده استخراج می‌کند. سپس رمزگشا با استفاده از لایه‌های کانولوشنی معکوس یا تکنیک‌های نمونه‌افزایی، این ویژگی‌ها را به طراحی بهینه نانوساختارها تبدیل می‌کند. این روش قادر است مواد مناسب، ابعاد و شکل حفره‌ها یا میله‌ها و آرایش هندسی نانوساختارها را بر اساس خواص نوری مورد نظر پیشنهاد دهد که منجر به افزایش دقت طراحی و کاهش زمان توسعه فناوری‌های جدید می‌شود.

تکامل نامرئی‌سازی از مفاهیم نظری، به کاربردهای عملی تبدیل شده است و پیشرفت‌های اخیر، عصر جدیدی از نامرئی‌سازی‌های هوشمند را نوید می‌دهد. این دستگاه‌های نوآورانه از فناوری‌های پیچیده‌ای مانند متامواد، یادگیری عمیق و کنترل‌های تطبیقی در زمان واقعی برای بهبود قابلیت‌های نامرئی بودن در محیط‌های مختلف بهره می‌برند. در جدول (۱) زمان‌بندی تحقیقات نامرئی‌سازی بررسی شده است.

این جدول نمای کلی از پیشرفت‌های کلیدی در زمینه پوشش‌های نامرئی را از سال ۲۰۰۶ تاکنون را نشان می‌دهد که نمایانگر پیشرفت‌های قابل توجهی در فناوری‌های مرتبط با

تحقیقات گذشته در ذیل آورده شده است:

- جهت تکامل این حوزه، روش پیشنهادی به دنبال استفاده از معماری‌های دقیق یادگیری عمیق در طراحی بلورهای فوتونی با خاصیت شکست منفی است که نامرئی‌سازی را ایجاد می‌کند.
- در روش پیشنهادی ابتدا یک مجموعه داده با نرم‌افزار RSOFT ایجاد شده تا در مراحل بعدی با معماری ResNet، ساختار بهینه با بهترین عملکرد استخراج شود.
- نتایج شبیه‌سازی روی ساختار پیشنهادی با یادگیری عمیق انجام و نتایج عملکرد بهینه را نشان می‌دهد. این امر نشان‌دهنده یک رویکرد نوآورانه و پیشرفته در این زمینه است که می‌تواند دقت و کارایی طراحی را بهبود بخشد. این به معنای ناکارآمد بودن روش‌های قبلی نیست، بلکه نشان‌دهنده تلاش برای بهبود و پیشرفت در این حوزه است.

- تاکنون از معماری ResNet جهت طراحی ساختار بلور فوتونی با کاربرد نامرئی‌ساز استفاده نشده است.

در این مقاله، ابتدا به بررسی پژوهش‌های گذشته در زمینه بلورهای فوتونی و بهینه‌سازی آن‌ها پرداخته شده است. سپس روش تحقیق مورد استفاده برای بهینه‌سازی بلورهای فوتونی با استفاده از شبکه عصبی ResNet، به تفصیل شرح داده شده است. در ادامه، مفهوم شکست منفی و اهمیت آن در طراحی بلورهای فوتونی مورد بحث قرار گرفته است. نتایج حاصل از اعمال این روش بر روی بلورهای فوتونی ارائه شده و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در پایان، نتیجه‌گیری کلی از پژوهش انجام شده و پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده ارائه می‌شود.

۲- مواد و روش تحقیق

بلورهای فوتونی، ساختارهایی هستند که ضریب شکست آن‌ها به‌طور متناوب تغییر می‌تواند انتشار نور را کنترل کنند. این بلورها با ایجاد شکاف باند، می‌توانند امواج الکترومغناطیسی را در جهات خاصی هدایت کنند و بدین ترتیب، امکان پنهان کردن اشیاء را فراهم آورند. به‌عنوان مثال، با طراحی ساختار مناسب، می‌توان مسیر امواج نور را به‌گونه‌ای تغییر داد که این

الگوریتم‌های یادگیری عمیق می‌توانند به‌طور مؤثر روابط پیچیده بین ساختارهای بلور فوتونی و پاسخ‌های الکترومغناطیسی آن‌ها را مدل‌سازی کنند که برای بهینه‌سازی عملکرد دستگاه‌ها بسیار حیاتی است. شبکه‌های عصبی عمیق برای شناسایی همبستگی‌های غیرخطی در فضای داده با ابعاد بالا استفاده می‌شوند و امکان طراحی ساختار بلور فوتونی را بدون نیاز به مدل‌سازی فیزیکی فراهم می‌کنند. این رویکرد نه تنها فرآیند طراحی را ساده می‌کند، بلکه امکان کاوش در مواد و ساختارهای جدیدی را که ممکن است از طریق روش‌های سنتی به‌راحتی قابل دستیابی نباشند، فراهم می‌آورد. شبکه‌های عصبی عمیق، کارایی محاسباتی را افزایش می‌دهد و موازی‌سازی بالا و مصرف انرژی پایین را ارائه می‌دهد که برای کاربردهای زمان واقعی، ضروری متامواد است (۱۲).

علاوه بر این، تقاطع یادگیری عمیق و بلورهای فوتونی، راه را برای کاربردهای نوآورانه در حوزه‌های مختلف هموار کرده است (۴). محققان، از این تکنیک‌ها در زمینه‌هایی مانند طیف‌سنجی نوری، تحلیل تصویر و ذخیره‌سازی داده‌ها استفاده کرده‌اند که نشان‌دهنده تنوع یادگیری عمیق در پردازش داده‌های پیچیده نوری است. توانایی تولید و ارزیابی سریع بلورهای فوتونی با استفاده از مدل‌های آموزش‌دیده، تسهیل‌کننده نمونه‌سازی و بهینه‌سازی است که در محیط‌های فناوری سریع بسیار حیاتی است. روش‌های استفاده شده برای طراحی این ساختارها زمان‌بر و محدود هستند و نمی‌توانند روابط پیچیده و غیرخطی بین ساختار و عملکرد را به‌خوبی مدل‌سازی کنند. همچنین، امکان کاوش خودکار در فضای طراحی گسترده و بهینه‌سازی چندهدفه محدود است. علاوه بر این، یکپارچه‌سازی روش‌های هوش مصنوعی پیشرفته مانند یادگیری عمیق با نرم‌افزارهای شبیه‌سازی الکترومغناطیسی برای بهبود طراحی بلورهای فوتونی با کاربرد نامرئی‌سازی به‌خوبی مورد بررسی قرار نگرفته است. در نتیجه، استفاده از روش‌های پیشرفته که اخیراً معرفی شده‌اند، در طراحی و عملکرد ساختارهای نامرئی‌ساز استفاده نشده است و تفاوت‌های روش پیشنهادی با

نوری عالی خود، در ساخت بلورهای فوتونی بسیار مورد توجه است. فسفید ایندیم نیز دارای شکاف باند مستقیم است و برای کاربردهای نوری و مخابراتی بسیار مناسب می‌باشد. سلنید روی، برای اپتیک انتقالی مانند لنزها استفاده می‌شود و به دلیل خواص نوری خوب خود، در بلورهای فوتونی کاربرد دارد (۱۶). مرکوری کادمیوم تلورید نیز برای تشخیص‌های مادون قرمز استفاده می‌شود و در برخی از کاربردهای خاص بلورهای فوتونی به کار می‌رود. نیمه‌هادی‌های آلی اگرچه هنوز به اندازه مواد غیرآلی توسعه نیافته‌اند، اما برخی از نیمه‌هادی‌های آلی نیز در اپتیک آلی مورد استفاده قرار می‌گیرند و می‌توانند در طراحی بلورهای فوتونی نقش داشته باشند. انتخاب نوع نیمه‌هادی برای ساخت بلورهای فوتونی با توجه به خواص نوری و توانایی کنترل نور در مقیاس نانو، با یادگیری عمیق انجام می‌شود.

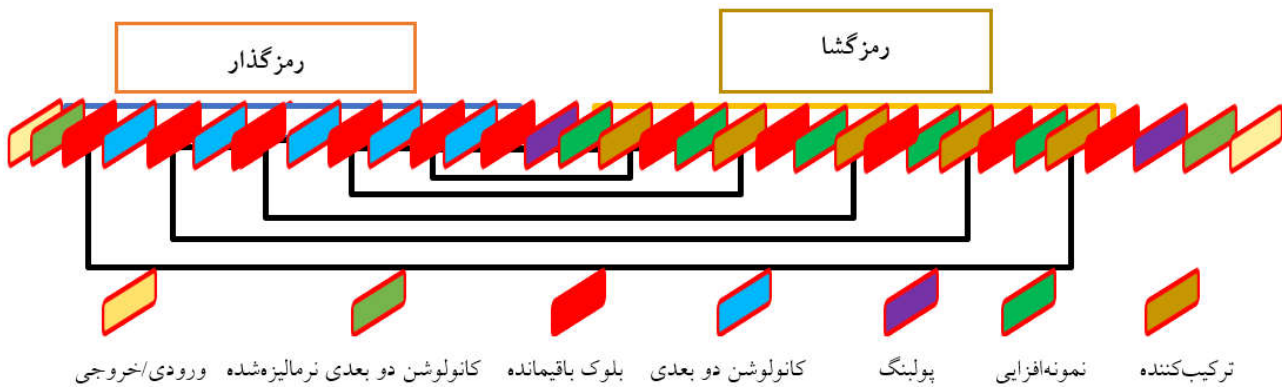
بلورهای فوتونی در آرایش‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی با ثابت دی‌الکتریک متفاوت وجود دارند. این نانوساختارها می‌تواند شامل حفره‌های هوایی در یک ماده با ضریب شکست بالا باشد. آرایش منظم حفره‌ها می‌تواند شکاف باندهایی ایجاد کنند که مانع از انتقال نور در طول موج‌های خاص می‌شود. بلورهای فوتونی میله‌ای با ضریب شکست بالا وجود دارد که در یک زمینه با ضریب شکست پایین قرار داشته و این آرایش نیز می‌تواند شکاف‌های فوتونی ایجاد کند (۱۷).

معماری ResNet، به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در یادگیری عمیق، می‌تواند در انتخاب ساختار مناسب برای نامرئی‌سازی بلورهای فوتونی کمک کند. ResNet به دلیل ساختار عمیق خود، قادر است ویژگی‌های پیچیده و غیرخطی را از داده‌های ورودی استخراج کند (۱۸). با استفاده از داده‌های تجربی و شبیه‌سازی‌شده، مدل ResNet می‌تواند رفتار نوری مختلف را پیش‌بینی کند و به طراحان کمک کند تا ساختارهایی با خواص مطلوب ایجاد کنند. هر لایه کانولوشنی در ResNet به استخراج ویژگی‌های محلی از ورودی کمک می‌کند. این لایه‌ها با استفاده از فیلترهای مختلف، ویژگی‌ها را از ساختار ورودی استخراج می‌کنند. بعد از هر لایه کانولوشنی، یک تابع فعال‌ساز واحد

امواج به جسم برخورد نکنند و جسم مورد نظر نامرئی شود. نانومیله‌های بلور فوتونی به‌عنوان ساختارهای میکروسکوپی با ویژگی‌های خاص نوری، توانایی منحصر به فردی در کنترل رفتار نور دارند. این ساختارها می‌توانند در طراحی سیستم‌های نامرئی‌سازی و بهبود کارایی در کاربردهای مختلف مانند مخابرات و حسگرها بسیار مؤثر باشند. استفاده از یادگیری عمیق، به‌ویژه معماری‌های شبکه عصبی مانند ResNet، می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی این نانومیله‌ها از لحاظ مکان، اندازه و سایز کمک کند.

انتخاب مواد اولیه برای ساخت نانومیله‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. معمولاً از مواد نیمه‌رسانا یا فلزی با خواص نوری خاص استفاده می‌شود (۱۳). این مواد باید قادر به ایجاد تغییرات در ضریب شکست و جذب نور باشند. طراحی هندسی نانومیله‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که ویژگی‌های نوری مطلوبی را فراهم کند. این طراحی شامل تعیین ابعاد، شکل و توزیع نانومیله‌ها در فضای سه‌بعدی است. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق، مانند ResNet، می‌تواند در شناسایی الگوها و ویژگی‌های مطلوب برای طراحی کمک کند. برای ایجاد نامرئی‌ساز با استفاده از بلورهای فوتونی، از معماری ResNet استفاده و جنس، سایز، مکان و تعداد حفره‌ها یا میله‌های این معماری، تعیین می‌شود. برای ساخت بلورهای فوتونی، از انواع مختلفی از مواد استفاده می‌شود که هر کدام ویژگی‌های خاصی دارند. در ادامه به برخی از مهم‌ترین این مواد اشاره می‌شود.

سیلیکون، یکی از متداول‌ترین مواد در صنعت الکترونیک و فوتونیک است (۱۴). با وجود اینکه سیلیکون دارای شکاف باند غیرمستقیم است، اما به دلیل تکنولوژی پیشرفته ساخت و پردازش آن، در اپتوالکترونیک بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. ژرمانیوم نیز از مواد نیمه‌هادی‌ها است که برای کاربردهای نوری در طول موج‌های بلند مناسب است. آرسنید گالیوم نیز دارای شکاف باند مستقیم است و به‌طور گسترده‌ای در لیزرها و دیودهای نوری استفاده می‌شود (۱۵). این ماده به دلیل خواص



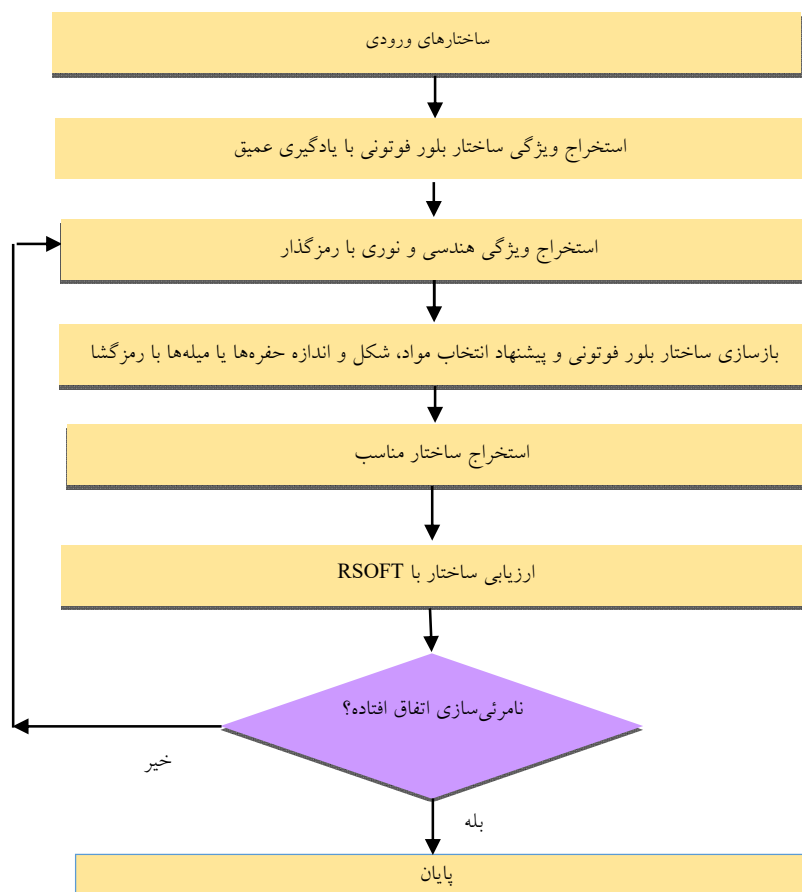
شکل ۲- معماری ResNet

رفتار نور تأثیر می‌گذارد، کمک می‌کند. در بخش رمزگشا، هدف بازسازی طراحی نانوساختارها بر اساس ویژگی‌های استخراج‌شده است. این بخش شامل لایه‌های کانولوشنی معکوس یا تکنیک‌های نمونه‌افزایی^۹ باشد. رمزگشا به مدل اجازه می‌دهد تا پیشنهاداتی برای انتخاب مواد، شکل و اندازه حفره‌ها یا میله‌ها ارائه دهد. در این بخش، از لایه‌های کانولوشنی معکوس استفاده می‌شود تا ویژگی‌های استخراج‌شده را به یک طراحی نانوساختار تبدیل کند. این لایه‌ها به مدل اجازه می‌دهند تا پیشنهاداتی برای انتخاب مواد، شکل و اندازه حفره‌ها یا میله‌ها ارائه دهد و آرایش هندسی نانوساختارها را بهینه کند. با استفاده از داده‌های آموزشی، مدل ResNet قادر است تا مواد مناسب برای ساخت بلورهای فوتونی را شناسایی کند. ResNet می‌تواند ابعاد و شکل حفره‌ها یا میله‌ها را بر اساس خواص نوری مورد نظر تنظیم کند. برای مثال، نسبت شعاع حفره به فاصله شبکه (t/a)، یکی از پارامترهای کلیدی است که باید بهینه شود. همچنین روش پیشنهادی قادر است آرایش هندسی نانوساختارها را پیشنهاد دهد تا بهترین عملکرد نوری ارائه شود. این موارد، شامل تعیین فاصله بین حفره‌ها یا میله‌ها و همچنین عمق آن‌ها است. این رویکرد نه تنها دقت طراحی را افزایش می‌دهد، بلکه زمان لازم برای توسعه فناوری‌های جدید را نیز کاهش می‌دهد.

خطی اصلاح شده^۵ اعمال می‌شود تا غیرخطی بودن را به مدل اضافه کند. لایه‌های پولینگ^۶ برای کاهش ابعاد ویژگی‌ها و افزایش مقیاس‌پذیری مدل استفاده می‌شوند. دو نوع پولینگ حداکثر و پولینگ میانگین استفاده می‌شود. این لایه‌ها به کاهش تعداد پارامترها و محاسبات کمک کرده و همچنین امکان استخراج ویژگی‌های مهم را فراهم می‌کنند. اتصالات باقی‌مانده به مدل اجازه می‌دهند تا اطلاعات را از لایه‌های قبلی عبور دهد. این اتصالات به جلوگیری از مشکل ناپدید شدن گرادینان کمک کرده و یادگیری عمیق را تسهیل می‌کنند. معماری ResNet در شکل (۲) نشان داده شده است.

در طراحی بلورهای فوتونی با استفاده از ResNet، دو بخش اصلی رمزگذار^۷ و رمزگشا^۸ وجود دارد (۱۹). در بخش رمزگذار، ورودی شامل ساختارهای مختلف و داده‌های شبیه‌سازی‌شده از ساختارهای بلور فوتونی است. این بخش شامل چندین لایه کانولوشنی است که ویژگی‌های پیچیده هندسی و نوری را استخراج می‌کند. لایه‌های کانولوشنی با استفاده از کرنل‌های کوچک و قابل آموزش، ویژگی‌های محلی تصویر ورودی را استخراج می‌کنند. این کرنل‌ها با حرکت بر روی تصویر، نقشه‌های ویژگی ایجاد می‌کنند که ناحیه‌هایی با ویژگی‌های خاص را مشخص می‌کنند. شکل (۳)، بلوک دیاگرام روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

رمزگذار به شناسایی الگوها و ویژگی‌های خاصی که بر



شکل ۳- بلوک دیاگرام روش پیشنهادی.

۱-۲- مفهوم شکست منفی

شکست منفی، یک پدیده الکترومغناطیسی است که در آن پرتوهای نور در یک مرز بین دو محیط به گونه‌ای شکست می‌یابند که خلاف رفتار معمول آن‌ها است. در مواد طبیعی، ضریب شکست همیشه مثبت است، اما با استفاده از تمام‌امواد می‌توان به ضریب شکست منفی دست یافت. تمام‌امواد دارای مقادیر منفی ضریب شکست است که طبق رابطه (۱) تعیین می‌شود (۷):

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (1)$$

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (2)$$

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (3)$$

در رابطه (۲)، ϵ ضریب نفوذپذیری الکتریکی، μ در رابطه (۳) ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و n ضریب شکست است.

علامت منفی نشان‌دهنده شکست منفی است که در آن جهت سرعت فاز و سرعت گروه مخالف یکدیگر است. قانون اسنل برای شکست نور در مرز بین دو محیط با ضریب شکست مثبت با رابطه (۴۲) بیان می‌شود (۸):

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (4)$$

در این رابطه n_1 و n_2 به ترتیب ضریب شکست در محیط‌های ۱ و ۲ هستند، θ_1 و θ_2 زاویه‌های پرتوهای ورودی و بازتابی هستند. اما در تمام‌امواد رفتار نور متفاوت است و به سمت مخالف حرکت می‌کند. این خاصیت باعث ایجاد پدیده‌هایی مانند تصویرسازی فوق‌العاده و فناوری‌های تصویربرداری پیشرفته می‌شود که این پدیده به عنوان شکست منفی شناخته می‌شود. در شکل (۴) این پدیده نشان داده شده است.

مشخص ایجاد کرد. همچنین امکان طراحی موجبرهای نقص خطی یا ایجاد نقص‌های نقطه‌ای وجود دارد.

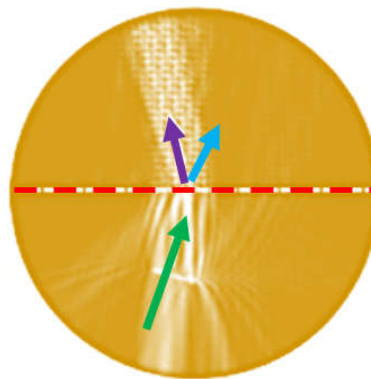
تنظیم پارامترها شامل مشخص کردن ویژگی‌های فیزیکی و هندسی ساختار است. در این مرحله، ضریب شکست مواد، ابعاد ساختار (مانند شعاع حفره‌ها یا میله‌ها) و فاصله بین آن‌ها را تعیین می‌شود. همچنین می‌توان پارامترهایی مانند طول موج کاری، شرایط مرزی و دقت محاسبات را مشخص کرد.

تعداد ۱۵۰ ساختار متفاوت ایجاد شد که ۷۰ درصد این تعداد برای آموزش و ۳۰ درصد برای ارزیابی استفاده شد. تعدادی از این ساختار در شکل (۵) نمایش داده شده است.

از بین این ساختارها با کمک یادگیری عمیق، ساختاری که برای نامرئی‌سازی دارای ویژگی بهتری است، انتخاب می‌شود. این ساختار با روش FDTD شبیه‌سازی شد. در شکل (۶)، ساختار پیشنهادی یادگیری عمیق برای نامرئی‌سازی، نشان داده شده است. ابتدا شبیه‌سازی برای ساختار اولیه انجام شده است.

در مدل‌سازی الکترومغناطیسی، شرایط مرزی دوره‌ای با لایه‌های کاملاً تطبیق‌یافته ضروری است. این شرایط کمک می‌کنند که میدان‌های الکترومغناطیسی در مرزهای ساختار به‌طور دوره‌ای تکرار شوند. در روش FDTD، این شرایط با اعمال تابع‌های دوره‌ای بر روی مرزهای ساختار اعمال می‌شوند تا رفتار دوره‌ای ساختار بلور فوتونی شبیه‌سازی شود. این لایه‌ها به‌طور مؤثر در روش‌های عددی حوزه فرکانس به‌کار رفته‌اند. شبیه‌سازی FDTD به‌طور خاص برای مدل‌سازی ساختارهای دوره‌ای و بررسی امواج الکترومغناطیسی در دو بعد استفاده می‌شود. این روش معادلات ماکسول را در هر دو دامنه زمان و فضا توصیف می‌کند و از آنجایی که داده‌ها در دامنه زمان پردازش می‌شوند، می‌توان داده‌های موقتی را به دامنه فرکانس تبدیل کرد تا پاسخ به‌دست آید. شبیه‌سازی‌های عددی مانند روش FDTD، رفتار نوری ساختارهای طراحی شده توسط مدل‌های یادگیری عمیق را شبیه‌سازی می‌کنند.

یک منبع موج گاوسی، در میله سمت چپ صفحه بلور فوتونی قرار داده شده است که با دو قطبش موج الکتريکی

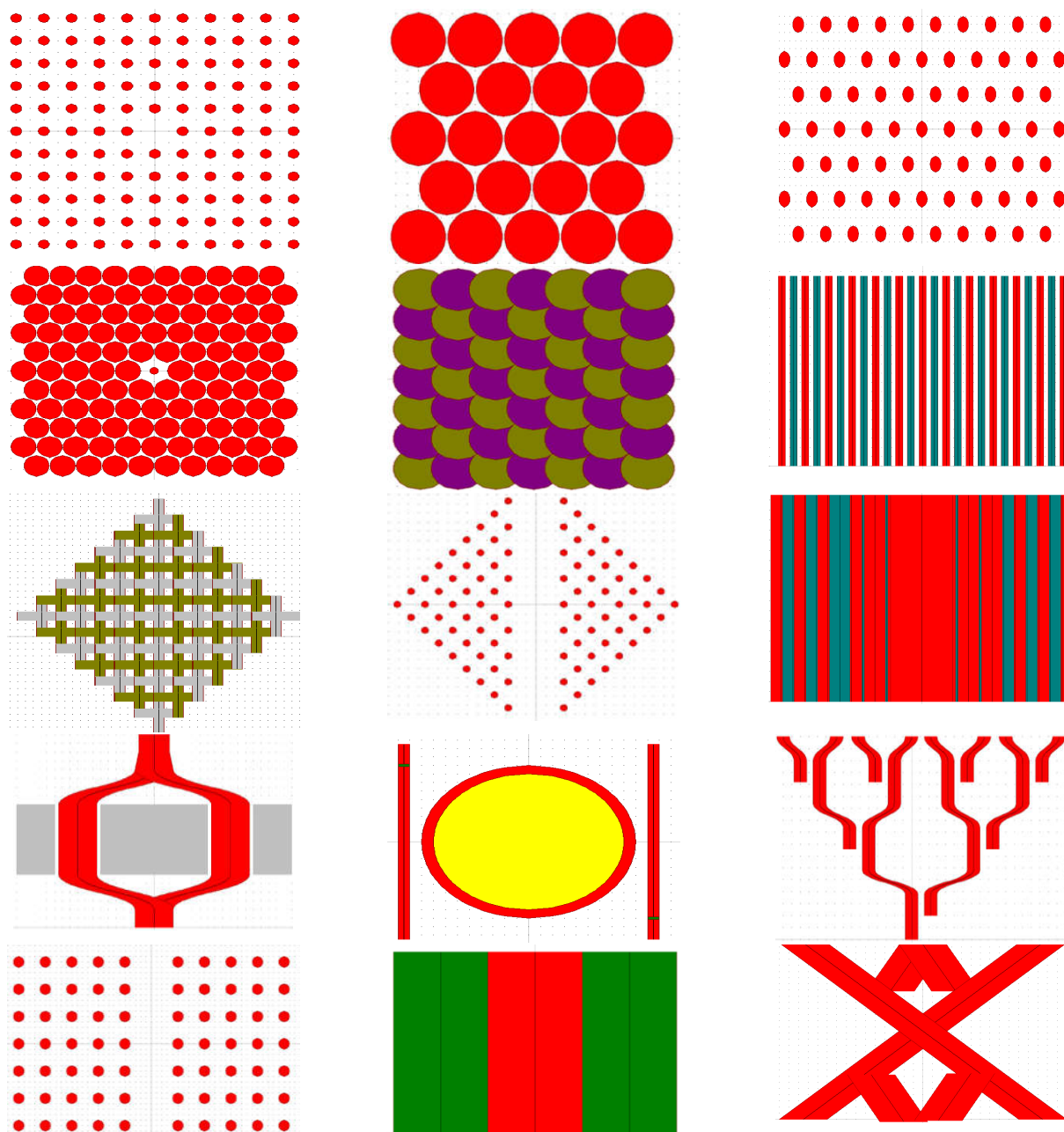


شکل ۴- نحوه انتشار نور در مواد با ضریب شکست مثبت و مواد با ضریب شکست منفی (متمواد).

پیکان سبز رنگ در شکل (۴)، نور تاییده شده و پیکان آبی و بنفش، انتشار نور به‌ترتیب در مواد با ضریب شکست مثبت و ضریب شکست منفی است. در مواد با ضریب شکست مثبت، نور به سمت خط عمود منحرف می‌شود، اما در مواد با ضریب شکست منفی، نور در همان سمت خط عمود که از آن وارد شده منحرف می‌شود. در ضریب شکست مثبت، زاویه‌های تابش و شکست در دو طرف خط عمود قرار می‌گیرند. اما در ضریب شکست منفی، هر دو زاویه در یک طرف خط عمود واقع می‌شوند. همچنین، در مواد با ضریب شکست مثبت، بردار پوینتینگ $^{\circ} 1$ و بردار موج هم‌جهت هستند. اما در مواد با ضریب شکست منفی، این دو بردار در خلاف جهت یکدیگر قرار می‌گیرند.

۳- نتایج و بحث

برای ایجاد ساختار مناسب نامرئی‌سازی، به یک مجموعه داده نیاز است. این مجموعه داده با RSOFTE ایجاد شده است. برای آموزش شبکه‌های عصبی کانولوشن عمیق به تعدادی زیادی از این ساختارها نیاز است. تعیین هندسه در نرم‌افزار RSOFTE برای طراحی بلورهای فوتونی، شامل انتخاب نوع ساختار و شکل آن است. برای مثال، می‌توان یک شبکه شش‌ضلعی با ثابت شبکه مشخص، طراحی کرد. در این مرحله، می‌توان آرایه‌ای از حفره‌ها یا میله‌های دی‌الکتريک را در یک بستر

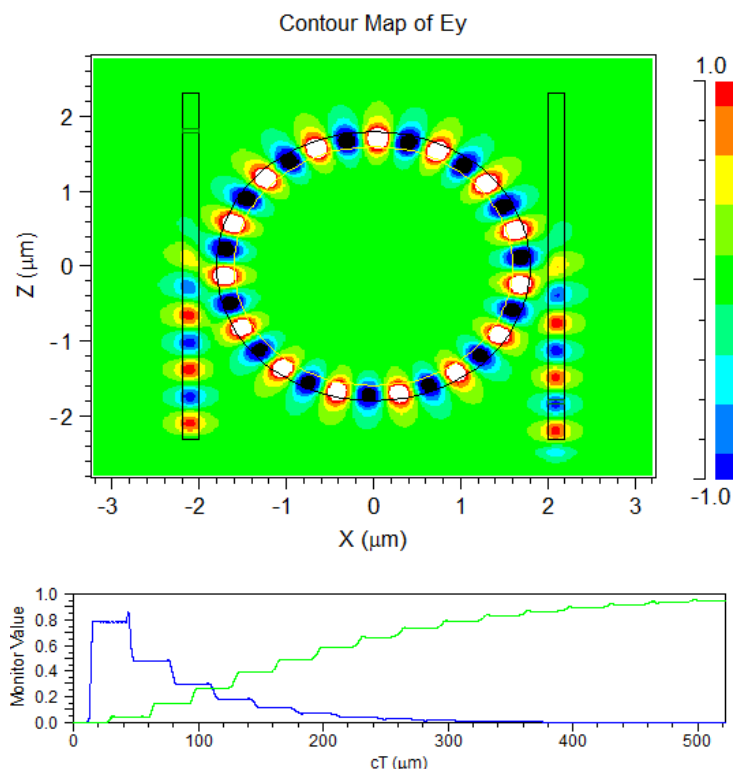


شکل ۵- تعدادی از ساختارهای بلورهای فوتونی برای ایجاد مجموعه داده.

شامل نقشه‌های پراکندگی امواج و توزیع میدان الکتریکی و مغناطیسی در فضا است.

همان‌طور که شکل (۵) نشان می‌دهد، نور در میله سمت چپ پایین که محل قرارگیری منبع است شروع به انتشار کرده، بعد از عبور از حلقه وارد میله سمت راست شده و در نیمه پایینی آن منتشر می‌شود. عدم انتشار نور در قسمت‌های بالایی

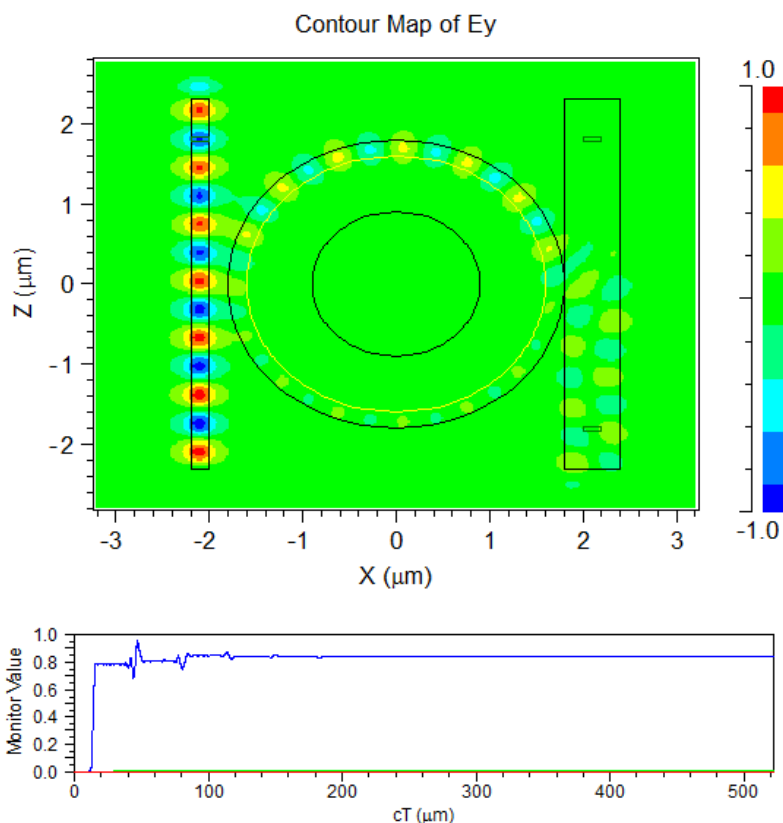
عرضی^{۱۱} و موج مغناطیسی عرضی^{۱۲} تنظیم شده است. با استفاده از شرایط مرزی دوره‌ای بلچ^{۱۳}، ساختار باند TM محاسبه شده است. این شرایط به این معنا هستند که تابع موج در مرزهای سیستم به گونه‌ای رفتار می‌کند که مشابه با یکدیگر باشد، به طوری که ویژگی‌های سیستم در نقاط مختلف تکرار شوند. نتایج شبیه‌سازی FDTD برای قطبش TE و TM در شکل (۵)،



شکل ۶- نحوه انتشار نور در ساختار بلور فوتونی، بالا: نقشه کانتور^{۱۴}، پایین: مقدار نمایشگر^{۱۵}.

از ResNet برای طراحی بلورهای فوتونی در مقایسه با روش‌های دیگر، مزایا و تفاوت‌های قابل توجهی دارد؛ ResNet قادر است در زمان کوتاهی طراحی‌های بهینه را ارائه دهد، درحالی‌که روش‌های سنتی زمان‌بر هستند. روش‌های دیگر مانند شبکه‌های عصبی کانولوشنی^{۱۶} ساده، U-Net (یک شبکه عصبی پیچشی برای بخش‌بندی تصاویر، به دلیل شکل خاص u شکل) خود به این نام شناخته می‌شود، الگوریتم‌های مبتنی بر بهینه‌سازی و شبکه‌های عصبی دیگر می‌تواند برای این مسأله استفاده شود، اما هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایب خود را دارند. به‌عنوان مثال CNN ساده، برای مسائل ساده‌تر مناسب است، اما ممکن است برای ساختارهای بسیار پیچیده کافی نباشد. U-Net، در مسائل تقسیم‌بندی تصویر عملکرد خوبی دارد و می‌تواند برای تحلیل ساختار بلورهای فوتونی مفید باشد. اما در بهینه‌سازی چندین پارامتر، ممکن است دچار مشکل شود. روش‌های کلاسیک مانند الگوریتم ژنتیک یا بهینه‌سازی ذرات، همچنان در این حوزه کاربرد دارند. اما معماری ResNet

می‌تواند نامرئی‌ساز را ایجاد کند. ساختاری که یادگیری عمیق پیشنهاد داده در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، تغییر در اندازه میله سمت راست باعث شد که نور در حلقه و میله سمت راست منتشر نشود و بنابراین نامرئی‌سازی در این بخش رخ دهد. دو نمایشگر در بالا و پایین قرار داده شده که خطوط قرمز و سبز، نشان دهنده مقدار نور دریافتی در این نقاط است. این دو نمایشگر در تمامی زمان‌ها مقدار صفر را ثبت کردند که نشان می‌دهد در کل زمان روشن بودن منبع، نوری به آن نرسیده است. این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که آیا پارامترهای بهینه شده توسط مدل‌های یادگیری عمیق منجر به عملکرد نوری مورد نظر می‌شوند. با شبیه‌سازی‌های عددی، توزیع میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی و نقشه‌های پراکندگی امواج نشان داده شده تا عملکرد نوری ساختارها ارزیابی شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت استفاده



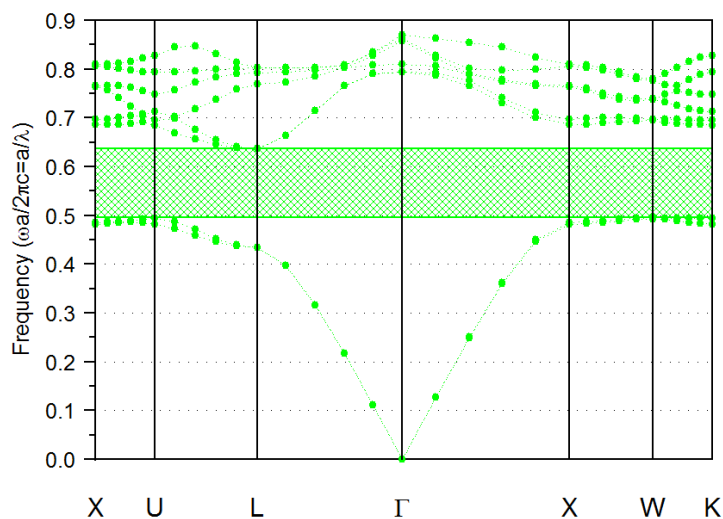
شکل ۷- نحوه انتشار نور در ساختار پیشنهادی یادگیری عمیق.

جدول ۲- مقایسه نظری بهینه‌سازی طراحی بلورهای فوتونی با یادگیری عمیق و روش‌های ابتکاری و سنتی

روش‌های سنتی	روش‌های فراابتکاری	ResNet	ویژگی
متوسط	متوسط	بالا	دقت
متوسط	کند	سریع	سرعت طراحی
محدود	محدود	بسیار بالا	قابلیت بهینه‌سازی
کم	متوسط	بالا	پیچیدگی محاسباتی
کم	متوسط	بسیار بالا	انعطاف‌پذیری
کم	کم	زیاد	نیاز به داده‌های آموزشی
محدود	متوسط	بالا	توانایی طراحی ساختارهای پیچیده
محدود	خوب	بسیار بالا	قابلیت پیش‌بینی خواص نوری

بهینه‌سازی بلورهای فوتونی باشد، اما محدودیت‌هایی نیز دارد؛ مانند نیاز به محاسبات زیاد و نیاز به طراحی بزرگ. مقایسه نظری با روش‌های دیگر، در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به جدول (۲)، روش مبتنی بر یادگیری عمیق می‌تواند همزمان چندین پارامتر را بهینه و قادر به استخراج و

به دلیل توانایی در یادگیری ویژگی‌های عمیق و حل مشکل گرادیان ناپدیدشونده، می‌تواند برای مسائل پیچیده‌تر مناسب باشد. همچنین انتخاب روش بهتر از میان این روش‌ها، به پیچیدگی مسئله، حجم داده‌های در دسترس و اهداف پژوهش بستگی دارد. اگرچه ResNet می‌تواند گزینه قدرتمندی برای



شکل ۸- نقشه ساختار باند.

واقع، شکاف باند نشان‌دهنده حداقل انرژی مورد نیاز برای انتقال یک الکترون از باند ظرفیت به باند رسانش است. این ویژگی به‌طور مستقیم بر رفتار الکترونیکی و نوری مواد تأثیر می‌گذارد و می‌تواند تعیین‌کننده نوع ماده (رسانا، نیمه‌رسانا یا عایق) باشد. نقشه شکاف باند، یک روش محاسباتی برای تحلیل ساختار باند است و می‌تواند اطلاعات دقیقی درباره انرژی‌های الکترونیکی و نحوه پراکندگی آن‌ها در مواد ارائه دهد. در این شبیه‌سازی‌ها، با استفاده از مدل‌های ریاضی و الگوریتم‌های عددی، رفتار الکترون‌ها در شرایط مختلف بررسی می‌شود. این نقشه‌ها اثرات مختلفی مانند دما، فشار و ترکیب شیمیایی را بر روی خواص الکترونیکی مواد بررسی کرده و طراحی مواد جدید با ویژگی‌های مطلوب را تسهیل می‌نماید.

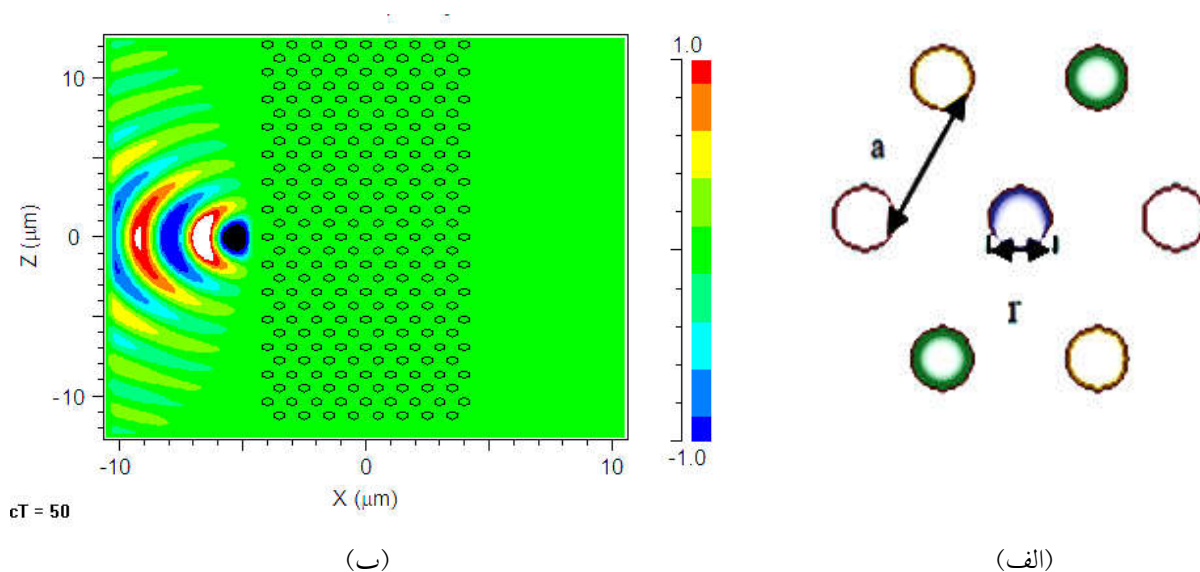
در ساختار مورد بررسی، فرکانس نرمالیزه بین $f_1=0.495(a/\lambda)$ و $f_2=0.6410(a/\lambda)$ وجود دارد که این بازه به‌عنوان شکاف باند برگی شناخته می‌شود. در اولین باند فوتونی، ناحیه‌ای برای شکست منفی وجود دارد و رفتارهایی مشابه تمام‌مواد را نشان می‌دهد که دارای ضریب شکست منفی است.

از بین ساختارهای پیشنهادی دیگر توسط یادگیری عمیق، ساختاری که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، انتخاب و با شبیه‌سازی نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد.

یادگیری ویژگی‌های پیچیده هندسی و نوری است. در مقابل روش‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک نسبت به ResNet زمان‌برتر است و محدودیت‌های بیش‌تری در پیچیدگی ساختار دارد (۲۰). روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی دقیق هستند اما نیاز به زمان محاسباتی زیادی دارند و برای طراحی معکوس مناسب نیستند. روش‌های تحلیلی سریع هستند اما برای ساختارهای پیچیده محدودیت دارند و نمی‌توانند همه جزئیات را در نظر بگیرند؛ بنابراین استفاده از ResNet برای طراحی بلورهای فوتونی ترکیبی از سرعت، دقت و انعطاف‌پذیری را ارائه می‌دهد که در روش‌های دیگر به این شکل وجود ندارد. این روش به‌ویژه برای طراحی ساختارهای پیچیده و بهینه‌سازی چندهدفه مناسب است و می‌تواند زمان توسعه فناوری‌های جدید را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد.

در فرآیند طراحی نامرئی‌ساز، استفاده از ویژگی‌های منحصر به فرد بلورهای فوتونی مانند اثر خودجمع‌کنندگی و وجود شکاف باند بسیار حائز اهمیت است. نقشه شکاف باند در شکل (۸) نشان داده شده است.

ساختار باند، به بررسی نحوه توزیع انرژی الکترون‌ها در مواد و وجود شکاف‌های باند می‌پردازد. شکاف باند به ناحیه‌ای از انرژی اشاره دارد که در آن هیچ حالت الکترونیکی وجود ندارد و این ناحیه بین باند ظرفیت و باند رسانش قرار دارد. در



شکل ۹- الف: سطح مقطع نامرئی‌ساز، ب: انتشار نور در ساختار.

مزایای قابل توجهی دارد؛ از جمله سرعت بالاتر در طراحی و بهینه‌سازی ساختارها، توانایی استخراج الگوهای پیچیده از داده‌های ورودی و قابلیت یادگیری و تعمیم به ساختارهای جدید. با این حال، روش ResNet در نامرئی‌سازی با چالش‌هایی مانند نیاز به داده‌های شبیه‌سازی شده حجیم برای آموزش مؤثر، حساسیت به دقت در تنظیم ساختارها و پارامترهای شبکه نیز روبرو است. نتایج شبیه‌سازی FDTD نشان داد که پدیده شکست منفی در بلورهای فوتونی و نحوه انتشار نور در این ساختارها به‌طور دقیق قابل بررسی است. همچنین، شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان داد که با تنظیم دقیق ابعاد و آرایش نانومیله‌ها، می‌توان به نامرئی‌سازی مؤثری دست یافت. این اطلاعات می‌تواند به درک بهتر رفتار نوری این ساختارها و بهبود طراحی آن‌ها کمک کرده و نه تنها دقت طراحی را افزایش می‌دهند، بلکه زمان لازم برای توسعه فناوری‌های جدید را نیز کاهش می‌دهند. با این حال، هنوز چالش‌های زیادی در زمینه بهینه‌سازی ساختار، انتخاب مواد و پیش‌بینی رفتار نوری این ساختارها وجود دارد که نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه احساس می‌شود. به‌طور خاص، بررسی تأثیر پارامترهای ساختاری مختلف بر عملکرد نوری و همچنین توسعه

شبیه‌سازی FDTD به‌کار گرفته شده و برای این شبیه‌سازی یک منبع نور گوسین در سمت چپ و مرکز ساختار قرار داده شده است. نتایج این شکل نشان می‌دهد که نور تابیده شده در چپ منعکس شده و به سمت راست منتشر نشده است؛ بنابراین در سمت راست یک نامرئی‌ساز ایجاد شده است.

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی بلورهای فوتونی و توانایی‌های آن‌ها در کنترل انتشار نور با هدایت امواج الکترومغناطیسی در زمینه نامرئی‌سازی اشیاء پرداخته شد. با طراحی دقیق نانومیله‌ها و استفاده از مواد نیمه‌رسانا با خواص نوری خاص، می‌توان به ویژگی‌های مطلوبی در کنترل نور دست یافت. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از معماری شبکه عصبی عمیق ResNet، می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی ساختارهای بلور فوتونی برای کاربردهای نامرئی‌سازی بسیار مفید باشد. ResNet با استخراج ویژگی‌های پیچیده هندسی و نوری از داده‌های ورودی، می‌تواند به طراحان در انتخاب مواد مناسب و تعیین ابعاد و آرایش بهینه نانو ساختارها کمک کند. روش پیشنهادی مبتنی بر ResNet در مقایسه با روش‌های قبلی طراحی بلورهای فوتونی،

تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

روش‌های جدید بهینه‌سازی می‌تواند در پیشرفت این حوزه مؤثر باشد. همچنین، توسعه روش‌های یادگیری با داده‌های کمتر و بهبود کارایی محاسباتی می‌تواند به بهبود عملکرد ResNet در این زمینه کمک کند.

واژه‌نامه

1. deep learning
2. multi-objective optimization
3. finite-difference time-domain (FDTD)
4. deep convolutional neural networks
5. rectified linear unit (ReLU)
6. pooling
7. encoder
8. decoder
9. upsampling
10. Poynting
11. transverse electric (TE)
12. transverse magnetic (TM)
13. Bloch boundary conditions
14. contour map
15. monitor value
16. convolutional neural networks (CNN)

مراجع

1. Khan MS, Shakoor R, Fayyaz O, Ahmed EM. A focused review on techniques for achieving cloaking effects with metamaterials. *Optik*. 2023;171575. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.171575>
2. Dorrani Z. Biosensor for detection of biological components using photonic crystal. *Majlesi J Electr Eng*. 2023;12(3):135-9. Doi: 10.30486/mjtd.2023.1984324.1032
3. Molaei-Yeznabad A, Abedi K. Optimal design of graphene-based plasmonic enhanced photodetector using PSO. *Sci Rep*. 2024;14(1):15291. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65311-x>
4. Long Y, Zou L, Yu L, Hu H, Xiong J, Zhang B. Inverse design of topological photonic time crystals via deep learning. *Opt Mater Express*. 2024;14(8):2032-9. <https://doi.org/10.1364/OME.525396>
5. Aghaei GhR, Izadpanah MR, Eftekhari M. Prediction of structural characteristics and magnetic properties of nanostructured Fe-Ni powders by artificial neural network. *J Adv Mater Eng (Esteghlal)* 2022; 32(2): 117-24 (In Persian). <https://doi.org/20.1001.1.2251600.1392>
6. Yao K, Zheng Y. Deep-Learning-Assisted Inverse Design in Nanophotonics. *Nanophotonics and Machine Learning: Concepts, Fundamentals, and Applications*: Springer; 2023; 13(1):113-140. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20473-9_4
7. Dorrani Z. Two-dimensional Photonic Crystal Sensor for Detection of Biomaterial. *Majlesi J Electr Eng*. 2020;14(1):25-8. https://mjee.isfahan.iau.ir/article_696385.html
8. Dorrani Z. Negative Refraction, Subwavelength Lensing Effect and Total Mirror with a Photonic Crystal Structure. *Majlesi J Electr Eng*. 2018;12(1): 55-60. https://mjee.isfahan.iau.ir/article_696385.html
9. Noguchi T, Matsumoto T, Miyake A, Igami Y, Haruta M, Saito H, et al. A dehydrated space-weathered skin cloaking the hydrated interior of Ryugu. *Nat Astron*. 2023;7(2):170-81. <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01841-6>
10. Dorrani Z. Traffic scene analysis and classification using deep learning. *Int J Eng*. 2023;37(3):496-502. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.03c06>
11. Dorrani Z. Road Detection with Deep Learning in Satellite Images. *Majlesi J Telecom Dev*. 2023;12(1):43-7. <https://doi.org/10.30486/mjtd.2023.1979006.1024>
12. Ma W, Cheng F, Liu Y. Deep-learning-enabled on-demand design of chiral metamaterials. *ACS Nano* 2018;12(6):6326-34. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b03569>
13. Wei H, Chen X, Zhao D, Zhao M, Wang Y, Zhang P. Temperature sensing based on defect mode of one-dimensional superconductor-semiconductor photonic crystals. *Cryst*. 2023;13(2):302-311. <https://doi.org/>

- 10.3390/cryst13020302
14. Akbarshahi L, Ghassai H. Investigation of Key Factors on Manufacture of Fused Silica Parts by Gel-Casting Method. *J Adv Mater Eng (Esteghlal)* 2022; 33(1):117-126 (In Persian). <https://doi.org/20.1001.1.2251600.1393.33.1.10.6>
15. Naderi-Samani H, Shoja Razavi R, Mozafarini R. Investigating the Effect of Laser Wavelength and Environment on the Synthesis of Copper and Copper Oxide Nanoparticles by Nanosecond Nd:YAG Laser in Liquid. *J Adv Mater Eng (Esteghlal)* 2024;43(1): 27-39 (In Persian). <https://doi.org/10.47176/jame.43.1.1037>
16. Zamani A, Loghman Estraki MR, Hosseini SR, Ramezani M, Al-Haji A. Influence of Temperature, Time, pH, Capping Agent Concentration and Zn/Se Molar Ratio on Morphology and Phase Evolution of Zinc Selenide Nanoparticles Synthesized by Hydrothermal Method. *J Adv Mater Eng (Esteghlal)* 2022;39(3):19-39 (In Persian). <https://doi.org/10.47176/jame.43.1.1037>
17. Jafari E, Mansouri-Birjandi MA, Tavousi A. Achieving high sensitivity by adding rings to a plasmonic metasurface with nano-holes. *Mater Sci Eng B*. 2024; 299:117046. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.117046>
18. Adibnia E, Ghadrhan M, Mansouri-Birjandi MA. Chirped apodized fiber Bragg gratings inverse design via deep learning. *Optics & Laser Technology*. 2025; 181:111766. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111766>
19. Dorrani Z, Farsi H, Mohamadzadeh S. Deep Learning in Vehicle Detection Using ResUNet-a Architecture. *Jordan J Electr Eng*. 2022;8(2):160-176. <https://doi.org/10.5455/jjee.204.1638861465>
20. Long Y, Zou L, Yu L, Hu H, Xiong J, Zhang B. Inverse design of topological photonic time crystals via deep learning. *Opt Mater Express* 2024;14(8): 2032-9. <https://doi.org/10.1364/OME.525396>